

การปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์
ของการไฟฟ้านครหลวง โดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสา

IMPROVEMENT OF MEA's 69 kV TRANSMISSION LINE LIGHTNING
PERFORMANCE BY ADDING EXTERNAL GROUND WIRE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-020-051

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์
ของการไฟฟ้านครหลวง โดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสา

IMPROVEMENT OF MEA's 69 kV TRANSMISSION LINE LIGHTNING
PERFORMANCE BY ADDING EXTERNAL GROUND WIRE



อพ.
พ 2327
2552

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 105064
วัน,เดือน,ปี..... 12 พ.ย. 2552

b. 121.65785
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-020-051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IMPROVEMENT OF MEA's 69 kV TRANSMISSION LINE LIGHTNING
PERFORMANCE BY ADDING EXTERNAL GROUND WIRE**

PORNCHAI SESTASOMBUT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2009

KMITL-2009-EN-M-020-051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง โดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสา

Thesis Title Improvement of MEA's 69 kV Transmission Line Lightning Performance by Adding External Ground Wire

นักศึกษา นายพรชัย เศรษฐสมบัติ




รหัสประจำตัว 50060205

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-020-051

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ศุภี	บรรจงจิตร	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.ดร.อิสระชัย	งามหรรุ	
ผศ.ดร.กীরติ	ชยะกุลศิริ	
ผศ.ดร.ชาย	ชมภูอินไหว	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 09.30-11.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้านครหลวง โดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสา
นักศึกษา	นายพรชัย เศรษฐสมบัติ
รหัสประจำตัว	50060205
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ชัย ชมภูอินไหว

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้านครหลวง(กฟน.)โดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสา ซึ่งก่อนปรับปรุงเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงที่ยอดเสา คลื่นฟ้าผ่าที่เคลื่อนที่ระหว่างยอดเสา และฐานเสาจะมีความเร็วประมาณ 123 เมตรต่อไมโครวินาที โดยผ่านสายดินภายในเสา แต่เมื่อต่อเพิ่มสายดินนอกเสาจะทำให้คลื่นฟ้าผ่ามีความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 300 เมตรต่อไมโครวินาที หรือประมาณความเร็วแสง โดยผ่านสายดินนอกเสาเป็นผลให้คลื่นสะท้อนที่ฐานเสาสามารถเคลื่อนที่กลับมาหักล้าง แรงดันเกินที่ยอดเสาได้เร็วขึ้น ทำให้แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวข้อนกลับมีค่าลดลง ในการวิเคราะห์ได้ใช้โปรแกรม ATP-EMTP จำลองการเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 69 กิโลโวลต์ ของ กฟน. ศึกษาเปรียบเทียบผลของการลดลงของอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวข้อนกลับเนื่องจากฟ้าผ่า หลังจากมีการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา ที่ความต้านทานดินอิมพัลส์ เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า และระยะห่างระหว่างเสา ค่าต่างๆ จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP พบว่าการต่อเพิ่มสายดินนอกเสาจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อความต้านทานดินที่ฐานเสาความถี่ต่ำมีค่าไม่เกิน 10 โอห์ม ซึ่งเท่ากับค่าความต้านทานดินที่ กฟน. แนะนำสำหรับระบบสายส่ง ตัวอย่างเช่น ที่ความต้านทานดินอิมพัลส์ 5 โอห์ม หรือประมาณเท่ากับ ความต้านทานดินที่ฐานเสาความถี่ต่ำ 10 โอห์ม เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 2 ไมโครวินาที ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวข้อนกลับมีค่าลดลงจาก 3.93 เหลือ 1.92 ครั้ง/100กม./ปี หรือลดลงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อต่อเพิ่มสายดินนอกเสา และเมื่อความต้านทานดินอิมพัลส์ที่ค่ามากกว่า 100 โอห์ม การต่อเพิ่มสายดินนอกเสาจะไม่ช่วยลดอัตราการเกิดวาบไฟตามผิว สำหรับเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า และระยะห่างระหว่างเสา ค่าต่างๆ

Thesis Title Improvement of MEA's 69 kV Transmission Line Lightning Performance by Adding External Ground Wire

Student Mr. Pornchai Sestasombut

Student ID. 50060205

Degree Master of Engineering

Program Electrical Engineering

Year 2009

Thesis Advisor Assist. Prof. Dr. Chai Chompoo-inwai

ABSTRACT

This thesis proposes the method to improve MEA's 69 kV transmission line lightning performance by adding external ground wire. When lightning occurs at top pole in the existing system, velocity of lightning wave moving between top pole and bottom pole is approximately 123 meter per microsecond through internal ground wire. In case adding external ground wire, velocity of lightning wave increase to 300 meter per microsecond (approximately equal velocity of light). This wave goes through external ground wire and it makes reflect wave moving from bottom pole to top pole faster than existing system. This can decrease overvoltage at top pole and reduce voltage across insulator and backflashover rate. This study which is based on ATP-EMTP program will analyze the direct stroke lightning impulse to MEA's 69 kV transmission line. The paper also compares the reduction of backflashover rate due to lightning stroke after adding external ground wire at the various value of impulse resistance, front wave time of lightning and distance between concrete pole. The simulated from ATP-EMTP program show adding external ground wire will be effective if footing ground resistance at low frequency is not more than 10 ohms which is recommended by MEA. for transmission line system. For example, impulse resistance at 5 ohms or footing ground resistance at low frequency is 10 ohms, front wave time at 2 microsecond, distance between pole at 80 meter, 4 units of insulator, the backflashover rate reduces from 3.93 to 1.92 times/100km/year or 50% when adding external ground wire. However impulse resistance exceeds 100 ohms, adding external ground wire can not reduce the rate of backflashover at front wave time and any distance of concrete pole.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือ และความกรุณา จากบุคคลหลายๆ ท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศศ.ดร. ชาย ชมภูอินไหว ซึ่งอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วยดี รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ในที่สุด ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ศศ.ดร. สำเริง อินท่าไม้ และ ดร. นาดยา กล้ายเรือง ที่กรุณาให้คำปรึกษา และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ การไฟฟ้านครหลวง ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า กองวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้การสนับสนุนด้านข้อมูลในการทำวิจัยนี้ และพี่ๆ เพื่อนๆ จากการไฟฟ้านครหลวง ที่ให้การสนับสนุนในทุกด้าน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ต่างๆ ที่ดีแก่ข้าพเจ้า และให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

พรชัย เศรษฐสมบัติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น.....	6
2.1 ข้อมูลฟ้าผ่าในประเทศไทย.....	6
2.1.1 บทนำ.....	6
2.1.2 ล่าฟ้าผ่า (Lightning Stroke).....	6
2.1.3 ประโยชน์ของข้อมูลฟ้าผ่า.....	7
2.1.4 ข้อมูลฟ้าผ่า.....	7
2.1.5 ระบบหาตำแหน่งที่เกิดฟ้าผ่า ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.).....	9
2.1.6 ตัวอย่างของข้อมูลฟ้าผ่าจาก LLS.....	10
2.2 แรงดันไฟฟ้าเกิน (Overvoltage).....	13
2.2.1 แรงดันไฟฟ้าเกินภายนอก (External Overvoltage).....	14
2.2.2 แรงดันไฟฟ้าเกินภายใน (Internal Overvoltage).....	15

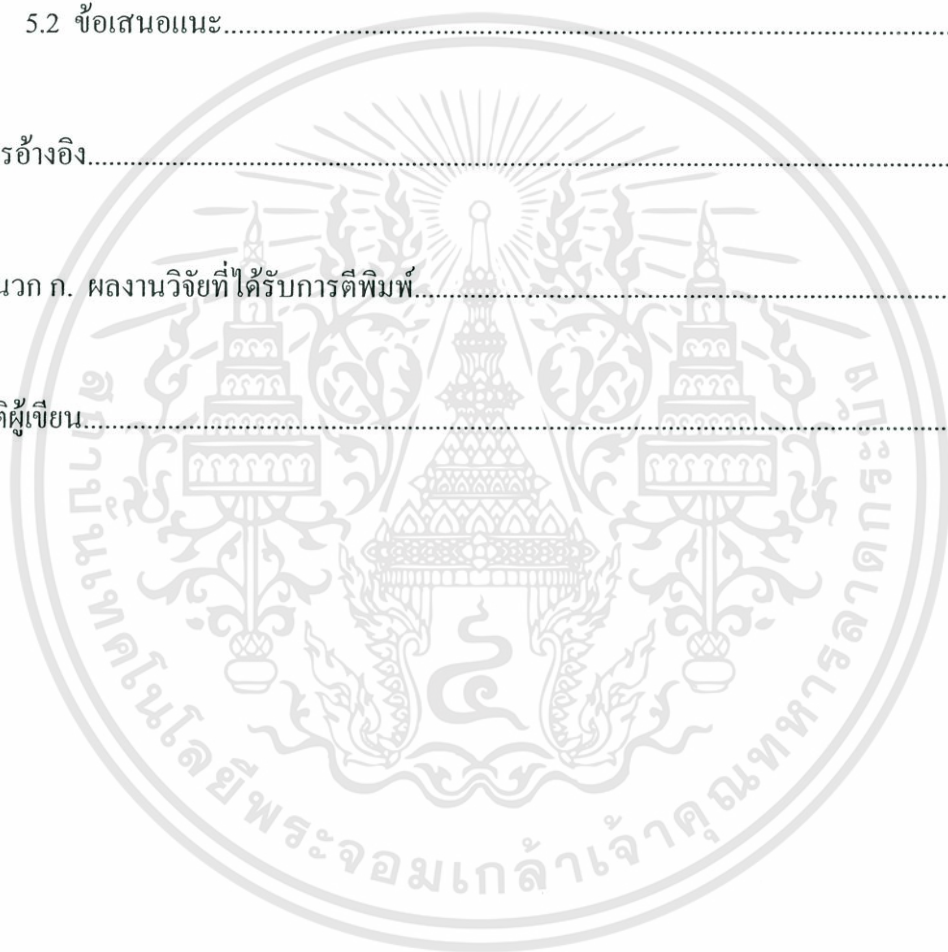
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ทฤษฎีแรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่า.....	18
2.3.1 ผลของความต้านทานดินต่อแรงดันเกิน.....	20
2.3.2 ผลของระยะห่างระหว่างเสาต่อแรงดันเกิน.....	22
2.4 คลื่นจร (Traveling wave).....	24
2.4.1 เสรีจิมพีแดนซ์.....	24
2.4.2 พฤติกรรมของคลื่นที่จุดความไม่ต่อเนื่อง.....	27
2.4.3 วิธีการคำนวณด้วย Lattice Diagram.....	30
2.5 การต่อลงดิน.....	32
2.5.1 ความหมายของดินในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	33
2.5.2 หลักดินกับความต้านทานการต่อลงดิน.....	33
2.5.3 จุดประสงค์ของการต่อลงดิน.....	33
2.5.4 ความต้านทานดินเมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลผ่าน.....	35
2.6 ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่า และการป้องกัน.....	39
2.6.1 ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่า.....	39
2.6.2 การป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบสายส่ง.....	44
2.7 อัตราการเกิดวาวไฟตามผิว (Flashover Rate).....	46
2.7.1 อัตราการวาวไฟตามผิวเนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำ.....	47
2.7.2 อัตราการเกิดวาวไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน.....	50
2.7.3 อัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ.....	58
บทที่ 3 องค์ประกอบของระบบสายส่ง และการสร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้า.....	63
3.1 องค์ประกอบของระบบสายส่งที่ศึกษา.....	63
3.1.1 สายตัวนำในระบบสายส่ง.....	64
3.1.2 เสาไฟฟ้าคอนกรีต.....	64
3.1.3 ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า.....	66
3.1.4 ลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีตีเกลียว.....	68
3.1.5 แท่งหลักดิน.....	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การสร้างแบบจำลองในระบบไฟฟ้า.....	70
3.2.1 แบบจำลองสายส่ง.....	70
3.2.2 แบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีต.....	73
3.2.3 แบบจำลองลูกถ้วย.....	76
3.2.4 แบบจำลองความต้านทานดินอิมพัลส์.....	77
3.2.5 แบบจำลองสายดินนอกเสา.....	81
3.2.6 แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า.....	82
3.2.7 ความต้านทานลุ่มฟ้าผ่า.....	83
บทที่ 4 กระบวนการ และผลการวิเคราะห์.....	85
4.1 กระบวนการ และผลการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาโครงสร้างการต่อลงดินนอกเสารูปแบบต่างๆ และเลือกโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดตามหลักความคุ้มทุน.....	86
4.2 กระบวนการ และผลการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาผลของความต้านทานดินอิมพัลส์ ระยะห่างระหว่างเสา เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า และ จำนวนฉนวนลูกถ้วย ที่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมพวงฉนวนลูกถ้วย และ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ.....	101
4.3 กระบวนการ และผลการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาเปรียบเทียบผลของอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่าค่าต่างๆ.....	186
4.4 กระบวนการ และผลการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาเปรียบเทียบผลของอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ที่ระยะห่างระหว่างเสา ค่าต่างๆ.....	195
4.5 กระบวนการ และผลการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 5 ศึกษาหาค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่ทำให้ฉนวนลูกถ้วย ไม่เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ.....	207

4.6 กระบวนการ และผลการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 6	
ศึกษาเปรียบเทียบผลของกระแสฟ้าผ่าชั่วคราว และกระแสฟ้าผ่าชั่วลบ	
ที่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลู่ถ้วย.....	211
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	213
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	213
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	216
เอกสารอ้างอิง.....	217
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	219
ประวัติผู้เขียน.....	224



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าคงที่ A และ B สำหรับคำนวณระยะฟ้าผ่า..... 52
2.2	ข้อมูลระบบสายส่งการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.)..... 60
3.1	คุณลักษณะแฟลชโอเวอร์ของฉนวนลูกถ้วยแขวนขนาดลูกถ้วย เท่ากับ 10 นิ้ว x 5 3/4 นิ้ว..... 67
3.2	ความถี่ของสายที่พิจารณา..... 71
3.3	ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำแต่ละเส้น..... 73
3.4	พารามิเตอร์สำหรับหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำลงดินนอกเสา..... 81
3.5	ค่าความต้านทานล้าฟ้าผ่า..... 83
4.1	ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที..... 88
4.2	ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที..... 88
4.3	ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที..... 89
4.4	ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที..... 90
4.5	ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที..... 90
4.6	ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ที่เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที..... 91
4.7	ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที..... 92
4.8	ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที..... 92
4.9	ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ที่เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที..... 93
4.10	ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที..... 94
4.11	ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที..... 94
4.12	ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ที่เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที..... 95
4.13	อัตราความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเนื่องจากไฟฟ้าดับ..... 97
4.14	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินความคุ้มค่าของการติดตั้งสายดินนอกเสา..... 97
4.15	สรุปราคาค่าติดตั้งสายดินนอกเสา..... 97
4.16	สรุปอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ..... 99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17	สรุปอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (คิดค่าเฉลี่ยของ โครงสร้าง ค. และ ง.)..... 99
4.18	ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....102
4.19	ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย..... 103
4.20	ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย..... 104
4.21	ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย..... 105
4.22	ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย..... 106
4.23	ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย..... 107
4.24	ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย..... 108
4.25	ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที..... 109
4.26	ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย..... 110
4.27	ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย..... 111
4.28	ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย..... 112
4.29	ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย..... 113
4.30	ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย..... 114
4.31	ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย..... 115
4.32	ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที..... 116
4.33	ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย..... 117
4.34	ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย..... 118
4.35	ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย..... 119
4.36	ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย..... 120
4.37	ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย..... 121

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.38 ค่าอัตราการเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	122
4.39 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	123
4.40 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย.....	124
4.41 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย.....	125
4.42 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย.....	126
4.43 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	127
4.44 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	128
4.45 ค่าอัตราการเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	129
4.46 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	130
4.47 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย.....	131
4.48 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย.....	132
4.49 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย.....	133
4.50 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	134
4.51 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	135
4.52 ค่าอัตราการเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	136
4.53 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	137
4.54 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย.....	138
4.55 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย.....	139
4.56 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย.....	140
4.57 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	141
4.58 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	142

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.59 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	143
4.60 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	144
4.61 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย.....	145
4.62 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย.....	146
4.63 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย.....	147
4.64 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	148
4.65 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	149
4.66 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	150
4.67 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	151
4.68 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย.....	152
4.69 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย.....	154
4.71 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	155
4.72 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	156
4.73 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	157
4.74 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	158
4.75 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย.....	159
4.76 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย.....	160
4.77 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย.....	161
4.78 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	162
4.79 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	163
4.80 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	164

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.81 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	165
4.82 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย.....	166
4.83 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย.....	167
4.84 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย.....	168
4.85 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	169
4.86 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	170
4.87 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	171
4.88 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	172
4.89 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย.....	173
4.90 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย.....	174
4.91 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย.....	175
4.92 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	176
4.93 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	177
4.94 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	178
4.95 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	179
4.96 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย.....	180
4.97 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย.....	181
4.98 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย.....	182
4.99 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	183
4.100 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	184
4.101 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	185

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.102 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร.....	186
4.103 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร.....	187
4.104 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร.....	188
4.105 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร.....	189
4.106 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร.....	190
4.107 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร.....	191
4.108 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร.....	192
4.109 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร.....	193
4.110 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร.....	194
4.111 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	195
4.112 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	196
4.113 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	197
4.114 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	198
4.115 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	199
4.116 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	200
4.117 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	201
4.118 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	202
4.119 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	203
4.120 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	204
4.121 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	205
4.122 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	206
4.123 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	207
4.124 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	207
4.125 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	207

4.126	ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	208
4.127	ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	208
4.128	ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	208
4.129	ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	209
4.130	ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	209
4.131	ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	209
4.132	ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	210
4.133	ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	210
4.134	ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	210
4.135	ค่าแรงดันตกคร่อมจนวนลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีเกิดกระแสฟ้าผ่า 40 กิโลแอมแปร์ กรณีเกิดกระแสฟ้าผ่าชั่วคราว และกระแสฟ้าผ่าชั่วลบ ที่โครงสร้าง ก.....	211
4.136	ค่าแรงดันตกคร่อมจนวนลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีเกิดกระแสฟ้าผ่า 40 กิโลแอมแปร์ กรณีเกิดกระแสฟ้าผ่าชั่วคราว และกระแสฟ้าผ่าชั่วลบ ที่โครงสร้าง ข.....	212

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	จำนวน Thunderstrom days เฉลี่ยใน 1 ปี (Td) จากข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยา..... 8
2.2	วิธีการ IMPACT ที่ใช้ในกาคำนวณหาตำแหน่งของฟ้าผ่า..... 9
2.3	เปอร์เซ็นต์การกระจายของขนาดกระแสฟ้าผ่าชั่วคราวในช่วงปี 2540..... 10
2.4	เปอร์เซ็นต์การกระจายของขนาดกระแสฟ้าผ่าชั่วคราวในช่วงปี 2540..... 11
2.5	จำนวนครั้งของฟ้าผ่าฟ้าผ่าพื้น โลกชั่วคราวในช่วงปี 2540..... 11
2.6	จำนวนครั้งของฟ้าผ่าฟ้าผ่าพื้น โลกชั่วคราวในช่วงปี 2540..... 12
2.7	เปอร์เซ็นต์ของฟ้าผ่าชั่วคราว และฟ้าผ่าชั่วคราวในช่วงปี 2540..... 12
2.8	การก่อตัวของประจุในก้อนเมฆ..... 14
2.9	ขั้นตอนการเกิดฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆและดิน..... 15
2.10	แรงดันเกินเนื่องจากการเปิดวงจรของระบบที่มีการลัดวงจรอยู่..... 17
2.11	แรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากการเปิด และปิดวงจรความจุไฟฟ้า..... 17
2.12	การเกิดแรงดันเกินเมื่อฟ้าผ่าลงสายดิน..... 19
2.13	การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเมื่อฟ้าผ่าลงสายดิน..... 19
2.14	การเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านตัวกลาง 2 ชนิดที่มีความต้านทานต่างกัน..... 20
2.15	การเคลื่อนที่ของแรงดันฟ้าผ่าเมื่อฟ้าผ่าลงเสา..... 21
2.16	แรงดัน และเวลาเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความต้านทานต่างกัน..... 22
2.17	การเคลื่อนที่ของแรงดันฟ้าผ่าเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงกลางสาย..... 22
2.18	แรงดันสะท้อนกลับจากเสาข้างเคียง..... 23
2.19	แรงดันในสายดิน แรงดันสะท้อนกลับ และแรงดันรวม..... 24
2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่สัมพันธ์กันด้วยค่าเสิร์จิมพีแดนซ์..... 24
2.21	สายตัวนำเดี่ยวเหนือดิน..... 26
2.22	สายเคเบิล..... 26
2.23	วงจรทั่วไปสำหรับพิจารณาสมการของการสะท้อนและการส่งผ่าน..... 27
2.24	วงจรที่พิจารณาตามทฤษฎีบทของเทวินิน..... 29
2.25	วงจรสมมูลของเทวินิน..... 29
2.26	กรณีสายตัวนำ 2 ชนิด..... 30
2.27	Lattice Diagram สำหรับวงจรสายส่ง-เคเบิล..... 31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28	แบบจำลองอย่างง่ายของอิลেকโทรดขณะเกิดเบรคดาวน์.....36
2.29	แสดงอิลีกโทรดแบบครึ่งทรงกลม..... 36
2.30	ความต้านทานอิมพัลส์ของอิลีกโทรดแบบครึ่งทรงกลม.....38
2.31	ความต้านทานอิมพัลส์ของอิลีกโทรดแบบแท่ง.....39
2.32	แรงกลอัมพัลส์กระทำต่อตัวนำ..... 41
2.33	แสดงแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้ำ..... 44
2.34	แสดงระยะตำแหน่งฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายตัวนำ.....48
2.35	แสดงระยะจากตำแหน่งฟ้าผ่าที่แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุด.....49
2.36	ระยะฟ้าผ่าในกรณีต่างๆ..... 51
2.37	การพิจารณาระยะฟ้าผ่าจากรูปแบบการติดตั้งสายดินและสายเฟสโดยให้วงกลมผ่านสายเฟส สายดิน และสัมผัสพื้นดิน.....53
2.38	ฟ้าผ่าลงสายเฟส..... 54
2.39	แบบจำลองทางเรขาคณิตในการหาความล้มเหลวของสายดินป้องกัน..... 56
2.40	นิยามของ Im ที่ Dc มีค่าเป็นศูนย์..... 57
2.41	นิยามของ Dc ที่ $I > Im$57
2.42	โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าเท่ากับ หรือมากกว่ากระแสค่ายอด..... 61
2.43	การกระจายสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย.....62
3.1	การจัดวางสายของ โครงสร้างระบบสายส่ง 69 kV แบบ DC-DC-1..... 63
3.2	สายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย ขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร..... 64
3.3	เสาไฟฟ้าคอนกรีต ขนาด 20 เมตร..... 65
3.4	ลูกถ้วยแขวนแบบปอร์ซเลน..... 66
3.5	ลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีตีเกลียว..... 68
3.6	แท่งหลักดินที่ใช้ในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์.....69
3.7	การจัดวางสายเฟสวางจรเดี่ยวตัวนำคู่ และสายล่อฟ้าของระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์..... 70
3.8	การสร้างแบบจำลองระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ชนิด J.Marti.....72
3.9	การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีต..... 75
3.10	ฉนวนลูกถ้วยที่ใช้ในงานในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์.....76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 การสร้างแบบจำลองของลูกถ้วยโดยใช้คาปาซิเตอร์.....	77
3.12 วงจรสมมูลของรากสายดินเมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลผ่าน.....	79
3.13 การสร้างแบบจำลองความต้านทานของรากสายดินแบบแท่ง.....	79
3.14 การสร้างแบบจำลองตัวเหนี่ยวนำของรากสายดินแบบแท่ง.....	80
3.15 การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุของรากสายดินแบบแท่ง.....	80
3.16 การสร้างแบบจำลองของสายดินนอกเสา.....	82
3.17 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	82
3.18 การสร้างแบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสฟ้าผ่า.....	83
3.19 แบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ใช้ศึกษา.....	84
4.1 กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1.....	86
4.2 แสดงการติดตั้งสายดินนอกเสาแบบต่างๆ.....	87
4.3 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	89
4.4 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	91
4.5 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	93
4.6 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	95
4.7 กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 2.....	101
4.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	103
4.9 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	104
4.10 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	105
4.11 แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	107
4.13 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	108
4.14 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	110
4.15 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	111
4.16 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	112
4.17 แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	113
4.18 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	114
4.19 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	115
4.20 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	117
4.21 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	118
4.22 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	119
4.23 แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	120
4.24 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	121
4.25 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	122
4.26 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	124
4.27 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	125
4.28 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	126
4.29 แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	127

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	128
4.31 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	129
4.32 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	131
4.33 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	132
4.34 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	133
4.35 แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	134
4.36 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	135
4.37 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	136
4.38 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	138
4.39 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	139
4.40 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	140
4.41 แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	141
4.42 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	142
4.43 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	143
4.44 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	145
4.45 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	146
4.46 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	147
4.47 แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	148

4.48	แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	149
4.49	แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	150
4.50	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	152
4.51	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	153
4.52	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	154
4.53	แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	155
4.54	แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	156
4.55	แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	157
4.56	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	159
4.57	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	160
4.58	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที.....	161
4.59	แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	162
4.60	แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	163
4.61	แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	164
4.62	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	166
4.63	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	167
4.64	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที.....	168
4.65	แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	169
4.66	แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	170
4.67	แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.68 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	173
4.69 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	174
4.70 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที.....	175
4.71 แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	176
4.72 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	177
4.73 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	178
4.74 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	180
4.75 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	181
4.76 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที.....	182
4.77 แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	183
4.78 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย.....	184
4.79 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย.....	185
4.80 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25, 1, 2, 4 ไมโครวินาที.....	186
4.81 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25, 1, 2, 4 ไมโครวินาที.....	187
4.82 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25, 1, 2, 4 ไมโครวินาที.....	188
4.83 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25, 1, 2, 4 ไมโครวินาที.....	189

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.84 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25, 1, 2, 4 ไมโครวินาที.....	190
4.85 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25, 1, 2, 4 ไมโครวินาที.....	191
4.86 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25, 1, 2, 4 ไมโครวินาที.....	192
4.87 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25, 1, 2, 4 ไมโครวินาที.....	193
4.88 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25, 1, 2, 4 ไมโครวินาที.....	194
4.89 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	195
4.90 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	196
4.91 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	197
4.92 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	198
4.93 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	199
4.94 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	200
4.95 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	201
4.96 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	202

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.97 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	203
4.98 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	204
4.99 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	205
4.100 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร.....	206
4.101 แสดงค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีเกิดกระแสฟ้าผ่า 40 กิโลแอมแปร์ กรณีเกิดกระแสฟ้าผ่าชั่วคราว และกระแสฟ้าผ่าชั่วลบ ที่โครงสร้าง ก.....	211
4.102 แสดงค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีเกิดกระแสฟ้าผ่า 40 กิโลแอมแปร์ กรณีเกิดกระแสฟ้าผ่าชั่วคราว และกระแสฟ้าผ่าชั่วลบ ที่โครงสร้าง ข.....	212

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานไฟฟ้าถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม และเป็นปัจจัยที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะปัจจุบันที่ความก้าวหน้าทางเศรษฐกิจของประเทศเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก ไม่ว่าจะเป็นทางด้านกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม การท่องเที่ยว และภาคธุรกิจอื่นๆ ด้วยเหตุนี้การขัดข้องของการจ่ายไฟฟ้าแต่ละครั้งย่อมนำมาซึ่งความสูญเสียทางเศรษฐกิจ และความเชื่อถือในการลงทุนด้วย และโดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ในเขตร้อนชื้นที่มีจำนวนวันที่มีฝนฟ้าคะนองสูง การส่งพลังงานส่วนใหญ่จะใช้ระบบสายส่งแบบสายชิงอากาศกลางแจ้ง ฉะนั้นสายส่งเหล่านี้มีโอกาสจะได้รับผลกระทบจากแรงดันเกินเนื่องจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ที่มีช่วงการเกิดระยะสั้นๆ ในลักษณะเสิร์จ หรือทรานเซียนต์ และมีขนาดมากกว่าแรงดันเกินชนิดอื่นๆ แต่มีความสำคัญต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เพราะเนื่องจากเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงเสาหรือสายล่อฟ้าจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำตกคร่อมลูกถ้วย ถ้ามีค่าสูงเกินแรงดันวิกฤตที่ฉนวนลูกถ้วยทนได้ก็อาจจะทำให้เกิดความไวขึ้นที่ฉนวนลูกถ้วย ซึ่งอาจนำไปสู่การลัดวงจร และไฟฟ้าขัดข้องตามมา

ดังนั้นหน่วยงานที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องในการจำหน่ายไฟฟ้าอย่างเช่น การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) จึงต้องรับภาระไม่เฉพาะเพียงแต่จ่ายไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า และรักษาคุณภาพของไฟฟ้าที่จ่ายเท่านั้น ยังต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของการจ่ายไฟฟ้า และความเชื่อถือได้อีกด้วย สำหรับการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) มีหน้าที่ในการบริการการใช้ไฟฟ้าแก่ผู้ใช้ไฟในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ รวมพื้นที่ 3,192 ตารางกิโลเมตร มีระบบสายส่ง 69, 115 กิโลโวลต์ เป็นส่วนสำคัญในการส่งจ่ายพลังงานให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าแรงสูงในระบบ 69, 115 กิโลโวลต์ รวมทั้งเป็นส่วนเชื่อมโยงพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าต้นทางของ กฟน. ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไปให้ผู้ใช้ไฟฟ้ารายย่อยต่อไป แต่จากสถิติที่บันทึกโดย แผนกสถิติระบบไฟฟ้า/กองวิจัยและวางแผนระบบไฟฟ้า/ฝ่ายควบคุมระบบไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดไฟฟ้าดับที่เกิดขึ้นเนื่องจากระบบสายส่งทำงานผิดปกติครั้งนั้นมีสาเหตุหลักอย่างหนึ่งมาจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้งานเป็น

ส่วนใหญ่ โดยเมื่อเกิดไฟฟ้าดับในแต่ละครั้งจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในทุกระดับ และนำมาซึ่งความสูญเสียทางเศรษฐกิจ และความเชื่อถือในการลงทุนด้วย

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอวิธีปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่ง กฟน. โดยการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา (External Ground Wire) กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 69 กิโลโวลต์ ด้วยโปรแกรม Electromagnetic Transients Program (EMTP) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะทรานเซียนต์ โดยมีเป้าหมายที่จะเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ให้กับระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าระดับแรงดัน 69 กิโลโวลต์เดิมที่มีการใช้งานแล้วเป็นส่วนใหญ่ และเป็นแนวทางในการพิจารณาปรับปรุงมาตรฐานการก่อสร้างใหม่เพื่อรองรับการขยายเขตอุตสาหกรรมในอนาคตต่อไป

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการวิเคราะห์ผลของการต่อลงดินนอกเสาเพื่อนำมาใช้ปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง เพื่อลดปัญหาการเกิดไฟฟ้าขัดข้องเนื่องจากการเกิดวาทตามผิวย้อนกลับให้มีค่าต่ำลง โดยมีวัตถุประสงค์หลักๆ ดังต่อไปนี้

1.2.1 ศึกษาผลของการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา ที่มีผลต่อแรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า (Front time) 0.25-4 ไมโครวินาที และระยะห่างระหว่างเสา 40-120 เมตร

1.2.2 ศึกษาอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate) และหาความต้านทานดินอิมพัลส์ที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้เกิดวาทไฟตามผิวของฉนวนลูกถ้วย ของโครงสร้างระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ที่ใช้งานในปัจจุบัน และโครงสร้างที่ปรับปรุงโดยการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาโดยจะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อคือ

1.3.1 ตัวแปรที่มีผลต่อแรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วย และอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate) ของฉนวนลูกถ้วย โดยได้ตั้งสมมติฐานทั้งหมด 7 ตัวแปรหลักๆ คือ

1.3.1.1 ความต้านทานดินอิมพัลส์ของรากสายดิน (Impulse resistance)

1.3.1.2 ขนาดของกระแสฟ้าผ่า และเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า (Front time)

1.3.1.3 ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีต และสายตัวนำในอากาศ

1.3.1.4 ความเร็วของคลื่นฟ้าผ่าที่เคลื่อนที่ภายในเสาไฟฟ้าคอนกรีต และเคลื่อนที่ในสายตัวนำอากาศ

1.3.1.5 จำนวนครั้งของฟ้าผ่าลงสายดิน และความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะเท่ากับหรือมากกว่ากระแสวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วย

1.3.1.6 ค่าความเป็นฉนวนของลูกถ้วย (Critical Flashover)

1.3.1.7 ระยะห่างระหว่างเสา (Span)

1.3.2 จากผลการวิเคราะห์สามารถไปหาอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ และความต้านทานดินอิมพัลส์ที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวของฉนวนลูกถ้วย ของโครงสร้างระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง ที่ใช้งานในปัจจุบัน และโครงสร้างที่ปรับปรุงโดยการต่อเพิ่มสายตัวนำลงดินนอกเสา เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ปรับปรุงความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า และลดปัญหาการเกิดไฟฟ้าขัดข้องอันเนื่องมาจากฟ้าผ่าให้มีค่าลดลง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งการไฟฟ้านครหลวง(กฟน.)โดยการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 69 กิโลโวลต์ ด้วยโปรแกรมATP-EMTP โดยจากสมมติฐานของการศึกษามีตัวแปรที่มีผลต่อแรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วย และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับอยู่หลายตัวแปร ซึ่งการลดปัญหาการเกิดไฟฟ้าดับเนื่องจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสามารถทำได้โดยปรับตัวแปรดังกล่าว เช่น การลดความต้านทานดินหรือการเพิ่มจำนวนฉนวนลูกถ้วย แต่เนื่องจากในบางพื้นที่ของ กฟน. ไม่สามารถทำให้ความต้านทานดินต่ำลงได้ตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงแนะนำ และสำหรับการเพิ่มจำนวนลูกถ้วยนั้นอาจจะต้องดับไฟในการเปลี่ยนเพิ่มฉนวนลูกถ้วยเป็นเวลานาน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา เพื่อทำให้คลื่นฟ้าผ่าที่เคลื่อนที่ระหว่างยอดเสาไฟฟ้า และฐานเสาไฟฟ้า มีความเร็วเพิ่มขึ้นจากประมาณ 123 เมตรต่อไมโครวินาที เป็น 300 เมตรต่อไมโครวินาที หรือประมาณความเร็วแสง ส่งผลให้เมื่อเกิดฟ้าผ่าที่ยอดเสา คลื่นสะท้อนที่ฐานเสาจะเดินทางกลับมาหักล้าง แรงดันเกินที่ยอดเสาได้เร็วขึ้น ทำให้แรงดันตกคร่อมฉนวน และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 สร้างแบบจำลองและจำลองเหตุการณ์ (Simulation) ของระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ แบบวงจรเดียว ตัวนำคู่ ที่มีการจัดวางสายเฟสในแนวตั้ง ของการไฟฟ้านครหลวงที่ใช้งานในปัจจุบัน และโครงสร้างที่ปรับปรุงโดยการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา ในกรณีฟ้าผ่าลงที่หัวเสา โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ในการจำลอง

1.5.2 ศึกษาความเหมาะสมของการติดตั้งสายดินนอกเสา ที่เหมาะสมตามหลักความคุ้มทุนเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากไฟฟ้าดับ

1.5.3 ศึกษาผลของการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา ที่มีผลต่อแรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า (Front time) 0.25-4 ไมโครวินาที ความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม และระยะห่างระหว่างเสา 40-120 เมตร

1.5.4 ศึกษาผลของการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา ที่มีผลต่ออัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า (Front time) 0.25-4 ไมโครวินาที ความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม และระยะห่างระหว่างเสา 40-120 เมตร

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1.6.1 ศึกษาทฤษฎี และมาตรฐานที่ใช้ในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีแรงดันเกินเนื่องจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า จากแหล่งข้อมูลที่เป็นที่ยอมรับ

1.6.3 รวบรวมข้อมูลกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย และข้อมูลสถิติไฟฟ้าดับเนื่องจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในเขตพื้นที่รับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวง

1.6.4 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อขนาดแรงดันเกินคร่อมฉนวนลูกถ้วยสูงสุดและอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ ที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์

1.6.5 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP และสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบสายส่ง เพื่อวิเคราะห์หาแรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วย และกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วยในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์

1.6.6 ใช้โปรแกรม ATP-EMTP เพื่อหาแรงดันหาแรงดันคร่อมพวงฉนวนลูกถ้วย และค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วย ที่ของโครงสร้างสายส่งที่ใช้งานในปัจจุบัน และโครงสร้างที่ปรับปรุงโดยการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา กรณีเกิดฟ้าผ่าลงที่หัวเสาในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.7 นำผลการวิเคราะห์ที่ได้หาค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ความต้านทานดินอิมพัลส์ที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวของฉนวนลูกถ้วย รวมทั้งพิจารณาถึงความเหมาะสมของการติดตั้งสายดินนอกเสาตามหลักความคุ้มทุน

1.6.8 สรุปผลการวิเคราะห์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ข้อมูลฟ้าผ่าในประเทศไทย [1]

2.1.1 บทนำ

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เกิดจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจำนวนมากระหว่างวัตถุที่มีประจุไฟฟ้า ฟ้าผ่าอาจเกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆกับอากาศ หรือระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก ฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สิน และสิ่งปลูกสร้างบนพื้นโลกได้ ฟ้าผ่าชนิดนี้จึงมีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มากที่สุด ข้อมูลฟ้าผ่าโดยเฉพาะข้อมูลของฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกมีประโยชน์อย่างมากในการช่วยลดความเสียหายต่อชีวิต และทรัพย์สินได้โดยใช้ข้อมูลฟ้าผ่าเหล่านี้เป็นเครื่องเตือนภัยในขณะที่เกิดพายุฝน ฟ้าคะนอง ข้อมูลฟ้าผ่าที่สะสมไว้เป็นเวลานาน สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าทางสถิติที่มีประโยชน์ในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของพื้นที่ที่เฉพาะเจาะจงได้

2.1.2 ลำฟ้าผ่า (Lightning Stroke)

วาบฟ้าผ่า (Lightning Flash) จากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลก ตามปกติแล้วจะประกอบด้วยลำฟ้าผ่าหลายลำซึ่งถ่ายเทประจุจำนวนมากจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลก กระแสคายอดของลำฟ้าผ่าจะมีค่าอยู่ในช่วง 5 – 300 กิโลแอมแปร์ (kA) ลำฟ้าผ่าหนึ่ง ๆ จะมีช่วงเวลา 20 – 50 ไมโครวินาที (μs) ลำฟ้าผ่าแต่ละลำจะทิ้งช่วงเวลาห่างกัน 20 – 100 มิลลิวินาที (ms) วาบฟ้าผ่ามักจะประกอบด้วยลำฟ้าผ่า 2 – 3 ลำ แต่อาจจะมีลำฟ้าผ่าได้ตั้งแต่ 1 – 20 ลำ โดยเรียกจำนวนลำฟ้าผ่าในวาบฟ้าผ่าว่า จำนวนการผ่าซ้ำ (multiplicity) ในวาบฟ้าผ่าส่วนใหญ่ ลำฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นหลังจากลำฟ้าผ่าแรกจะสัมผัสพื้นโลกที่จุดเดียวกับลำฟ้าผ่าแรก เนื่องจากเคลื่อนที่ผ่านแนวที่สร้างไว้โดยลำฟ้าผ่าแรก อย่างไรก็ตามประมาณหนึ่งในสามของวาบฟ้าผ่า จะประกอบด้วยลำฟ้าผ่าหลายลำที่สัมผัสพื้นโลกต่างจุดกัน อาจจะห่างกันไม่กี่ร้อยเมตรจนถึงหลายกิโลเมตร ในทางปฏิบัติ นักวิจัยได้กำหนดให้วาบฟ้าผ่าหนึ่ง ๆ ประกอบด้วยลำฟ้าผ่าจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลกที่เกิดขึ้นภายในระยะ 10 กิโลเมตร และเกิดขึ้นภายในระยะเวลา 1 วินาที

2.1.3 ประโยชน์ของข้อมูลฟ้าผ่า

ฟ้าผ่ามีพลังงานมหาศาล สามารถทำอันตรายต่อชีวิต ทำให้เกิดเพลิงไหม้ และทำให้ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าขัดข้อง โดยสามารถใช้ข้อมูลฟ้าผ่า ณ เวลาที่เกิดขึ้น และข้อมูลฟ้าผ่าที่รวบรวมเป็นสถิติมาช่วยลดอันตรายต่าง ๆ ที่เกิดจากฟ้าผ่าได้

ตัวอย่างของกลุ่มคน และกิจกรรมที่ใช้ประโยชน์จากข้อมูลฟ้าผ่า

2.1.3.1 เตือนภัยฟ้าผ่าให้กับคนงานก่อสร้าง และบำรุงรักษาที่ทำงานกลางแจ้ง

2.1.3.2 พนักงานของการไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันฟ้าผ่า และ การจัดส่งพนักงานบำรุงรักษาออกไปซ่อมสายส่งไฟฟ้าที่ถูกลูกฟ้าผ่า

2.1.3.3 การวางแผนการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้หลีกเลี่ยงแนวสายที่กำลังมีฟ้าผ่าเพื่อไม่ให้เกิดไฟดับ

2.1.3.4 หาสาเหตุของการขัดข้องในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าว่ามาจากฟ้าผ่าหรือไม่

2.1.3.5 เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

2.1.4 ข้อมูลฟ้าผ่า

ข้อมูลฟ้าผ่าที่ง่ายที่สุด และนำมาใช้งานเป็นเวลานานแล้ว คือ จำนวนวันที่ได้ยินเสียงฟ้าร้องใน 1 ปี (Thunderstorm Days, Td) ประเทศไทยจะมี Td ตั้งแต่ 50 – 120 ตามแผนที่ที่มีเส้นที่ลากผ่านบริเวณที่มี Td เท่ากัน (Isokeraunic Map) ซึ่งรวบรวมได้จากข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา ดังแสดงในรูปที่ 2.1

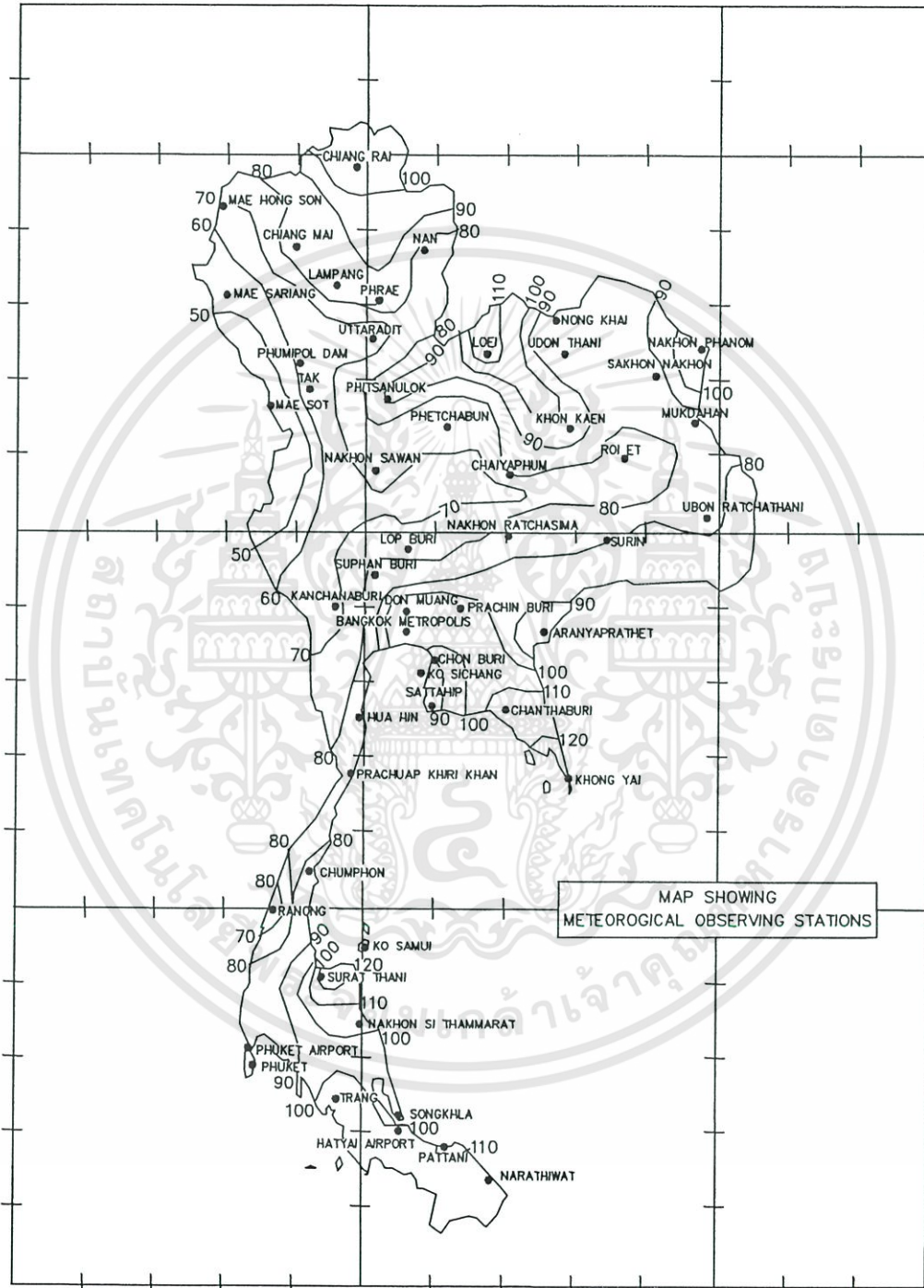
ข้อมูลฟ้าผ่าที่มีความละเอียดขึ้นมา คือ ความหนาแน่นของจำนวนลัมฟ้าผ่าลงสู่ดิน (ground stroke density, N_g) ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 1024-1-1 ปี 1993 แนะนำให้วัด แต่ถ้าไม่มีข้อมูลก็อาจจะประมาณจากค่า Td ได้ สำหรับประเทศไทยได้ติดตั้งเครื่องนับฟ้าผ่า (Lightning Flash Counter, LFC) ในบริเวณพื้นที่ ภาคใต้ของประเทศไทย จำนวน 23 เครื่อง ในช่วงปี 2535 LFC ที่ติดตั้งนี้เป็นชนิด CIGRE 10 kHz ซึ่งมีงานเสอากาศษนิกแบน รัศมีทำการ 20 กิโลเมตร ข้อมูลของความหนาแน่นวาบฟ้าผ่าที่รวบรวมได้มีค่าในช่วง 0.61 – 8.2 ครั้ง ต่อตารางกิโลเมตรต่อปี ถ้าต้องการแปลงเป็น N_g จะต้องมีข้อมูลฟ้าผ่าของภาคใต้วาน 1 วาบฟ้าผ่าจะมีลัมฟ้าผ่าก็เท่ากับการคำนวณ โดยใช้สมการของ IEC

$$N_g = 0.04 \times T_d^{1.25} \quad \text{ครั้งต่อตารางกิโลเมตรต่อปี} \quad (2.1)$$

จาก isokeraunic map ในบริเวณภาคใต้ของประเทศไทยจะมี Td 70 – 120 วัน ซึ่งสามารถคำนวณ N_g ตาม IEC ได้ 8.1 – 15.9 ครั้งต่อตารางกิโลเมตรต่อปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก LFC เป็นเครื่องมือที่ให้ข้อมูลฟ้าผ่าได้เฉพาะค่าที่จะนำมาคำนวณ Ng เท่านั้น ยังมีข้อมูลฟ้าผ่าอีกหลายชนิดที่มีความสำคัญทางวิศวกรรม เช่น ขนาดกระแส ขั้ว จำนวนผ่าซ้ำ ฯลฯ จึงต้องมีระบบตรวจจับฟ้าผ่าที่มีความสามารถมากกว่า LFC



รูปที่ 2.1 จำนวน Thunderstrom days เฉลี่ยใน 1 ปี (Td) จากข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยา

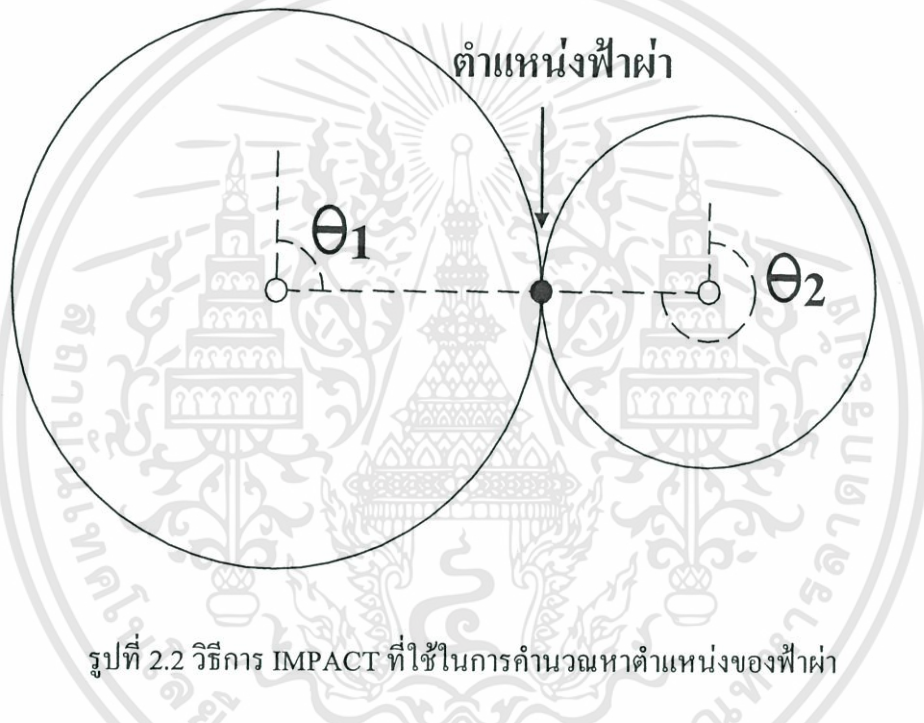
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ระบบหาตำแหน่งที่เกิดฟ้าผ่า ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.)

(EGAT's Lightning Location System or EGAT's LLS)

ระบบหาตำแหน่งที่เกิดฟ้าผ่าของ กฟผ. เป็นระบบ IMPACT (Improved Accuracy From Combined Technology) ที่บริษัทผู้ผลิตในสหรัฐอเมริกาพัฒนาขึ้น โดยรวมเอาวิธีการหาตำแหน่งที่เกิดฟ้าผ่า 2 วิธีเข้าด้วยกัน คือ วิธีการทิศทาง (Direction Finding, DF) กับวิธีการคำนวณเวลาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางจากจุดที่เกิดฟ้าผ่ามายังเสาอากาศที่รับสัญญาณฟ้าผ่า (Time-Of-arrival, TOA) วิธี DF จะได้ข้อมูลของทิศทาง (มุม) ของจุดที่ฟ้าผ่าลงสู่พื้นโลก ส่วนวิธี TOA จะได้ข้อมูลของระยะห่างระหว่างจุดที่ฟ้าผ่าลงสู่พื้นโลกกับจุดที่ตั้งของเสาอากาศรับสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่

2.2



รูปที่ 2.2 วิธีการ IMPACT ที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของฟ้าผ่า

ข้อมูลดิบที่ได้จากเสาอากาศรับสัญญาณฟ้าผ่า คือ ทิศทาง หรือ มุมที่เกิดฟ้าผ่า เวลาที่เกิดฟ้าผ่า และขนาดของสัญญาณฟ้าผ่า ข้อมูลจากเสาอากาศรับสัญญาณแต่ละตัว จะถูกส่งผ่านระบบสื่อสารเข้าไปที่เครื่องวิเคราะห์หาตำแหน่งของฟ้าผ่า (Position, Analyser, PA) ถ้า PA ได้รับข้อมูลจากเสาอากาศตั้งแต่ 2 ตัว ขึ้นไปก็จะสามารถคำนวณหาตำแหน่งของฟ้าผ่าได้ ข้อมูลที่ได้จาก PA คือ ตำแหน่งที่เกิดฟ้าผ่า (ละติจูด ลองจิจูด) เวลาที่เกิดฟ้าผ่า และขนาดของฟ้าผ่า

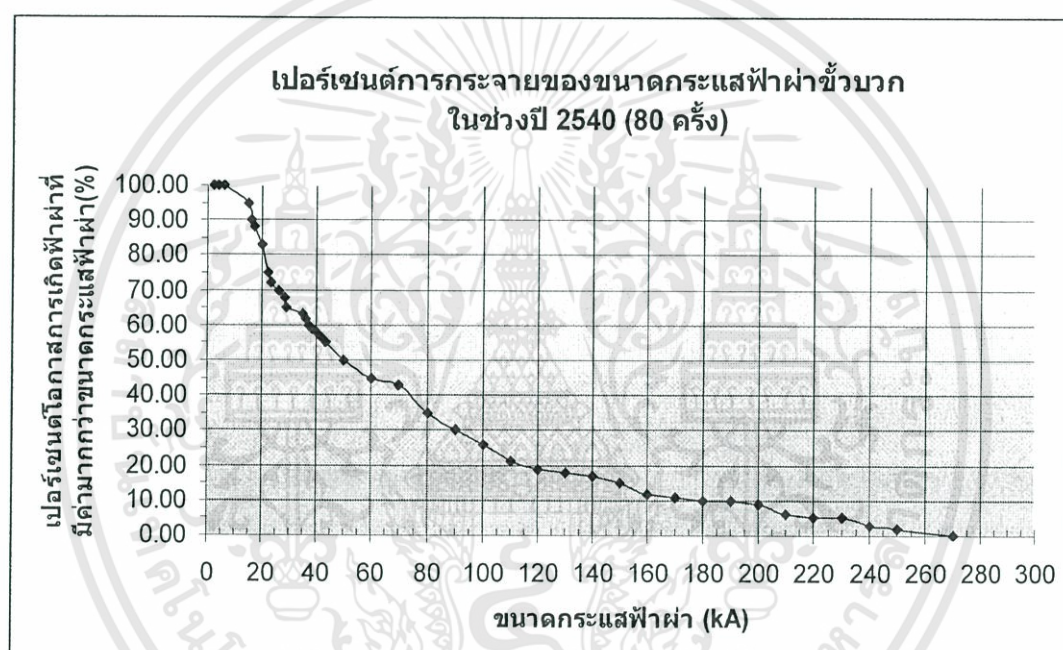
สำหรับ LLS ของ กฟผ. เริ่มติดตั้งใช้งาน ตั้งแต่วันที่ 25 สิงหาคม 2538 ในระยะเริ่มต้นใช้งานนี้ ต้องการให้เป็นโครงการทดลอง โดยให้ครอบคลุมพื้นที่ในบริเวณภาคกลางของประเทศไทย เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดของประเทศไทย LLS ในระยะเริ่มแรกนี้ประกอบด้วยเสาอากาศรับสัญญาณฟ้าผ่า 4 ชุด แต่ละชุดมีระยะห่างกันประมาณ 200 กิโลเมตร ติดตั้งอยู่ที่ บางปะกง เขื่อนศรีนครินทร์ นครราชสีมา และสกลนคร ส่วน PA ติดตั้งอยู่ที่สำนักงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

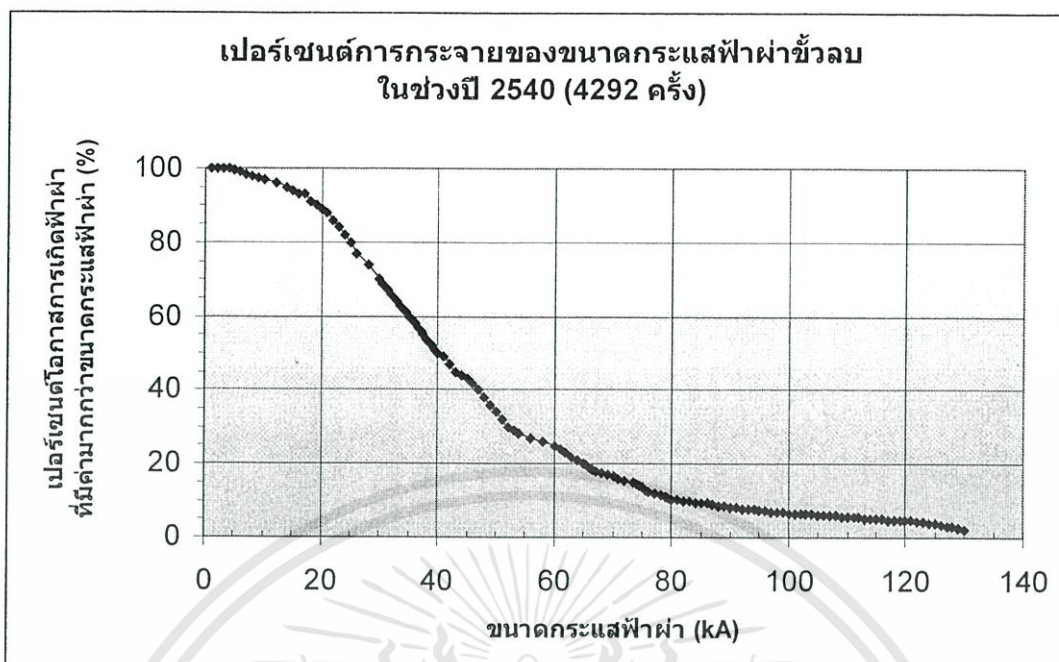
ใหญ่ของ กฟผ. ที่ นนทบุรี ระบบสื่อสารที่เชื่อมโยงระหว่างเสาอากาศรับสัญญาณกับ PA เป็นสายโทรศัพท์ในเครือข่ายของ กฟผ.เอง

2.1.6 ตัวอย่างของข้อมูลฟ้าผ่าจาก LLS

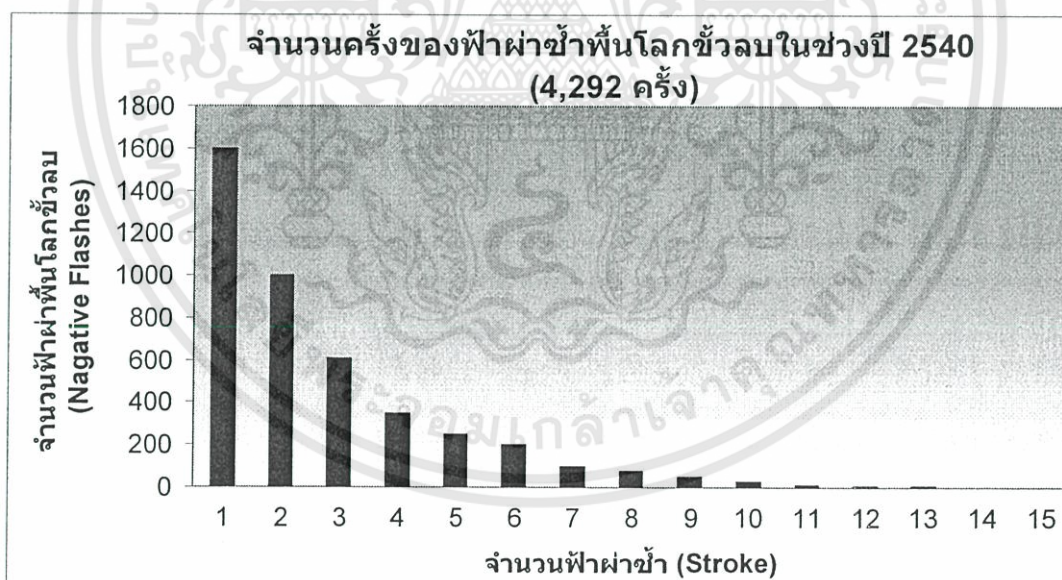
ข้อมูลฟ้าผ่าที่ PA คำนวณออกมา คือ ตำแหน่ง เวลา ชั่วโมง ขนาดของกระแสไฟฟ้า จำนวนการฟ้าผ่า ข้อมูลฟ้าผ่าของประเทศไทยมีจำนวนมาก เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในบริเวณเขตร้อนชื้น และมีลมมรสุมพัดผ่านในช่วงฤดูฝน ข้อมูลฟ้าผ่าที่แสดงในรูปที่ 2.3-2.7 เป็นตัวอย่างของข้อมูลฟ้าผ่าที่รวบรวมได้ในช่วงเดือนกันยายน 2540



รูปที่ 2.3 เปอร์เซ็นต์การกระจายของขนาดกระแสฟ้าผ่าชั่วคราวในช่วงปี 2540

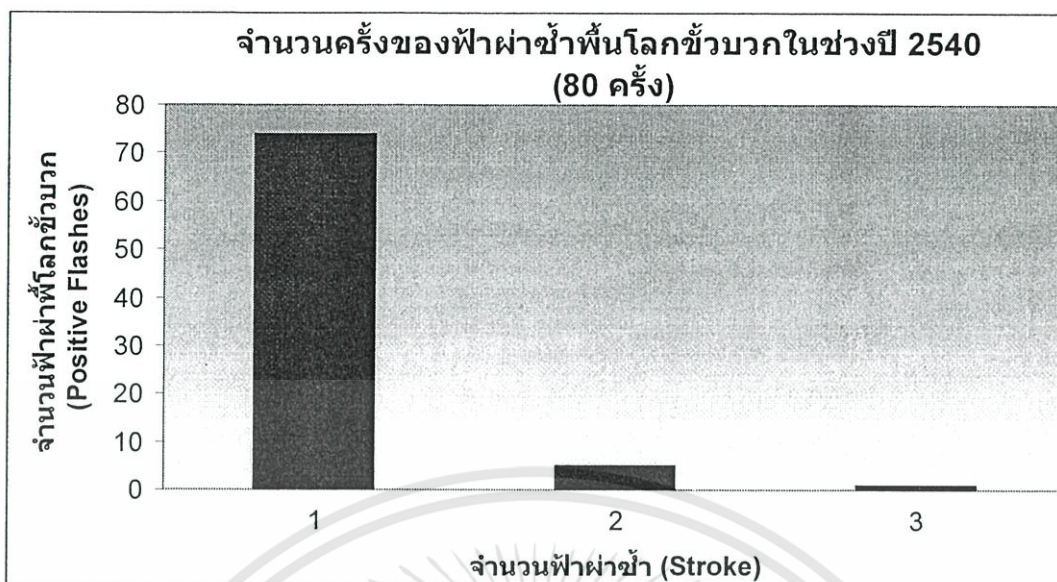


รูปที่ 2.4 เปอร์เซ็นต์การกระจายของขนาดกระแสฟ้าผ่าชั่วลมในช่วงปี 2540

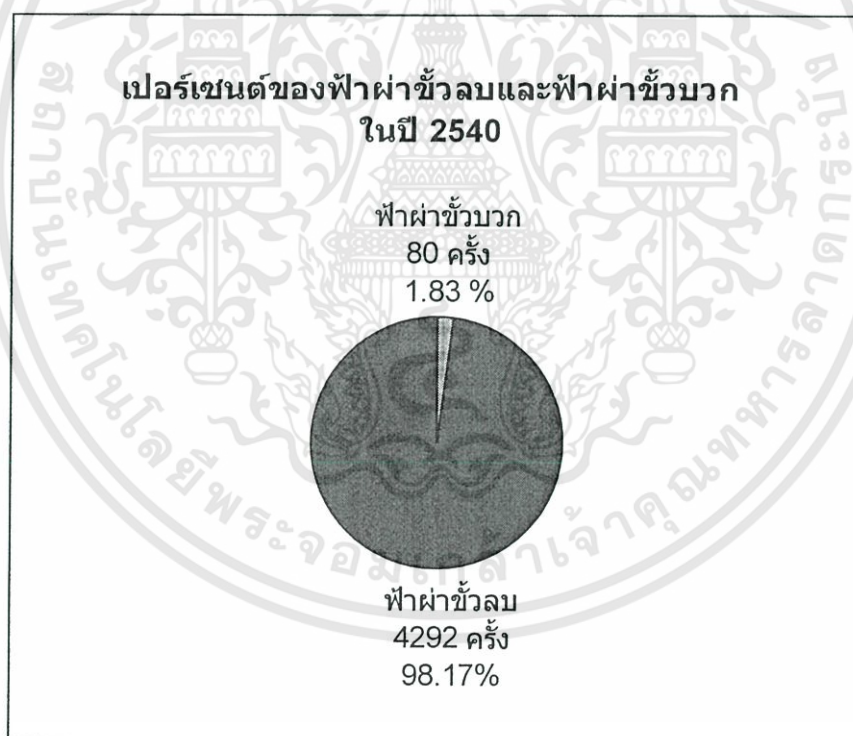


รูปที่ 2.5 จำนวนครั้งของฟ้าผ่าซ้ำพื้นโลกชั่วลมในช่วงปี 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 จำนวนครั้งของฟ้าผ่าเข้าพื้นโลกชั่ววอกในช่วงปี 2540



รูปที่ 2.7 เปอร์เซ็นต์ของฟ้าผ่าชั่ววอก และฟ้าผ่าชั่ววอกในช่วงปี 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แรงดันไฟฟ้าเกิน (Overvoltage) [2]

แรงดันเกิน หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากภายในระบบหรือที่เกิดขึ้นจากภายนอกแล้วเข้ามาครอบงำระบบ โดยมีค่าของแรงดันไฟฟ้าสูงเกินกว่าแรงดันไฟฟ้าปกติที่ระบบทำงานอยู่ แรงดันไฟฟ้าเกินแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ ตามแหล่งกำเนิดของแรงดันเกิน คือแรงดันเกินภายนอก (External Overvoltage) และแรงดันเกินภายใน (Internal Overvoltage)

แรงดันเกินภายนอก (External Overvoltage) หมายถึง แรงดันเกินไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากภายนอกและมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ ฟิวส์ แรงดันไฟฟ้าเกินภายนอกนี้บางครั้งเรียกว่า แรงดันเกินเนื่องจากบรรยากาศ (Atmospheric Overvoltage) แรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่ามีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ามากในระดับ HV-High voltage (น้อยกว่า 230 kV) และ EHV-Extra High voltage (ตั้งแต่ 230-765 kV) เพราะแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่ามีค่าสูงมากกว่าแรงดันเกินไฟฟ้าเกินประเภทอื่นๆ ดังนั้นการพิจารณาการป้องกันแรงดันเกินในระบบ HV และ EHV จึงใช้แรงดันเกินภายนอกนี้มาพิจารณาในการเลือกฉนวนป้องกันอุปกรณ์

แรงดันเกินภายใน (Internal Overvoltage) เกิดไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากภายนอก เช่น การปลดโหลดอย่างทันทีทันใด การปิดเปิดของเบรกเกอร์ในระบบเป็นต้น แรงดันเกินภายในมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ R, L, C ของระบบ และสภาพของเหตุการณ์ที่เกิด เช่น การปิดวงจรของระบบที่มีหม้อแปลงซึ่งไม่ได้จ่ายไฟอยู่ การเปิด และปิดของระบบที่มีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่เป็นต้น ด้วยสภาพของระบบที่ต่างกันแรงดันเกินที่เกิดขึ้นก็มีขนาดต่างกันไปด้วย แต่แรงดันไฟฟ้าเกินแบบนี้มีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบด้วยถ้าแรงดันไฟฟ้าของระบบมีค่าต่ำ แรงดันเกินภายในที่เกิดขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1-3 เท่า ก็มีค่าไม่สูงมาก แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าของระบบมีค่าสูง เช่น 765 หรือ 1,000 kV แรงดันเกินภายในที่เกิดขึ้นภายในที่เกิดขึ้นก็มีค่ามากตามไปด้วย

ดังนั้นในระบบที่แรงดันไฟฟ้าระบบมีค่าสูง แรงดันไฟฟ้าเกินภายในที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมากตามแรงดันไฟฟ้าระบบ ส่วนแรงดันเกินภายนอกไม่ได้ขึ้นอยู่กับแรงดันระบบ การพิจารณาเลือกฉนวนเพื่อป้องกันความเสียหายเพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์เนื่องจากแรงดันเกินในระบบ EHV และ UHV ซึ่งแรงดันระบบมีมีแรงดันไฟฟ้าสูงจึงต้องพิจารณาถึงแรงดันไฟฟ้าเกินภายในเป็นส่วนสำคัญ แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องพิจารณาถึงแรงดันไฟฟ้าเกินภายนอกที่เกิดขึ้นด้วย และเลือกระดับฉนวนใช้งานตามแรงดันที่เกิดขึ้นสูงสุดเป็นเกณฑ์

HV	<	230 kV	พิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าเกินภายนอก
230 kV	<	EHV < 765 kV	พิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าเกินภายนอก และแรงดันไฟฟ้าเกินภายใน
UHV	>	765 kV	พิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าเกินภายใน

2.2.1 แรงดันไฟฟ้าเกินภายนอก (External Overvoltage)

แรงดันไฟฟ้าเกินภายนอกหรือแรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่าเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้เนื่องจากฟ้าผ่าลงที่ระบบ โดยตรงหรือผ่าลงข้างเคียงอุปกรณ์ เช่น สายส่งของระบบ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าเกินขึ้นภายในระบบไฟฟ้า

ฟ้าผ่าเกิดขึ้นเนื่องจากการก่อตัวของประจุภายในก้อนเมฆซึ่งเกิดจากลม ละอองน้ำ โดยลมพัดพาละอองน้ำที่อยู่ภายในก้อนเมฆที่มีความหนาแน่นมากทำให้เกิดเสียดสีระหว่างกัน และมีประจุเกิดขึ้นตามหลักของไฟฟ้าสถิตย์ทำให้ส่วนล่างของก้อนเมฆซึ่งอยู่ในย่านอุณหภูมิต่ำมีประจุลบเป็นส่วนมาก และส่วนบนของก้อนเมฆซึ่งอยู่ในย่านของอุณหภูมิสูงมีประจุบวก การแบ่งกลุ่มของประจุที่เกิดขึ้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การก่อตัวของประจุในก้อนเมฆ

การก่อตัวของประจุในก้อนเมฆตามในรูปที่ 2.8 ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของประจุที่ภาคพื้นดิน และเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆกับดิน สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นถ้าสูงเกินกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศ (วัสดุทุกชนิดมีสนามไฟฟ้าวิกฤตนั้นหมายถึง คุณสมบัติของวัสดุที่สามารถทนสนามไฟฟ้าได้ วัสดุที่อยู่ในสนามไฟฟ้าเกินกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของวัสดุนั้นก็จะเกิดการเบรคดาวน์หรือก็คือวัสดุจะเปลี่ยนสภาพจากฉนวนเป็นตัวนำ สนามไฟฟ้าวิกฤตสำหรับอากาศมีค่า 30 kV/cm ที่ 760 มม. โปรท 20° C) ก็จะทำให้อากาศแตกตัวหรือไอออไนซ์ออกเป็นประจุบวกและลบ คือเปลี่ยนสภาพจากฉนวนเป็นตัวนำ การแพร่กระจายของการเกิดไอออไนซ์จะดำเนินต่อไปหรือไม่จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆกับดินว่ามีค่าสูงมากทุกย่านหรือไม่ ถ้าหากสนามไฟฟ้าบริเวณใต้ก้อนเมฆมีค่าสูงเกินกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ส่วนที่ถัดลงมาบริเวณใต้พื้นดินมีสนามไฟฟ้าต่ำกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตการเกิดไอออไนซ์ของอากาศก็จะหยุดเพียงบริเวณใกล้ๆ ขอบล่างใต้ก้อนเมฆ กรณีจะไม่เกิดฟ้าผ่าจากก้อนเมฆลงสู่ดิน แต่ถ้าสนามไฟฟ้าสูงมากระหว่างก้อนเมฆและดินการเกิดไอออไนซ์สามารถเกิดลามจนถึงดินได้กรณีเรียกว่าเกิดฟ้าผ่า

ประจุที่อยู่ส่วนล่างของก้อนเมฆมีสองกลุ่มแต่ส่วนใหญ่ 80-90 % เป็นประจุลบ ดังนั้นฟ้าผ่าที่เกิดส่วนใหญ่ก็เนื่องมาจากฟ้าผ่าลบซึ่งเรียกว่าฟ้าผ่าลบ แต่ถ้าการ ไอออไนซ์เกิดขึ้นจากกลุ่มของประจุบวกใต้ก้อนเมฆ ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นก็เรียกว่าฟ้าผ่าบวก

รูปที่ 2.9 แสดงการเกิด ไอออไนซ์ของอากาศแล้วเกิดเป็นขั้นๆ (Stepped Leader) ลงมาถึงภาคพื้นดินในรูปที่ 2.9 (ข) เกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วของประจุลบจากก้อนเมฆ และประจุบวกที่ภาคพื้นดิน ทำให้เกิด แสง สี เสียง การเคลื่อนตัวของประจุในรูปที่ 2.9 (ก) ทำให้เกิดกระแสที่อาจมีขนาด 200-300 แอมแปร์ แต่การรวมตัวกันอย่างรวดเร็วของประจุในรูปที่ 2.9 (ข) ทำให้เกิดกระแสสูงมากโดยมีขนาดอย่างน้อยประมาณ 1-2 หมื่นแอมแปร์ กระแสที่เคบบันทีกมีค่าสูงสุดประมาณ 240,000 แอมแปร์ ฟ้าผ่าที่เริ่มจากประจุลบดังรูปที่ 2.9 เรียกว่าฟ้าผ่าลบ



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเกิดฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆและดิน

2.2.2 แรงดันไฟฟ้าเกินภายใน (Internal Overvoltage)

แรงดันไฟฟ้าเกินภายในเกิดขึ้นเนื่องจากการปิดเปิดของวงจรหรือการปลดหรือเพิ่มโหลดอย่างทันทีทันใดในระบบเป็นต้น ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเกินภายในขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ, พารามิเตอร์ของระบบ และสภาพการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินด้วย ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะแรงดันไฟฟ้าเกินที่เกิดจากการปิดเปิดดวงจร หรือที่เรียกว่าสวิตชิ่ง แรงดันไฟฟ้าเกินที่เกิดเนื่องจากสวิตชิ่งมีค่าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าเกินภายในชนิดอื่นๆ

แรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากสวิตชิ่งที่จะกล่าวในที่นี้จะยกตัวอย่างเพื่อให้เข้าใจ ได้แก่

- การเปิดดวงจรของระบบที่มีการลัดวงจรอยู่
- การเปิดและปิดดวงจรของระบบที่มีความจุไฟฟ้า

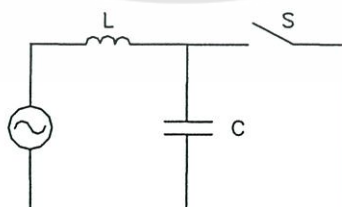
2.2.2.1 การเปิดดวงจรของระบบที่มีการลัดวงจรอยู่

พิจารณารูปที่ 2.10 ระบบประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เบรกเกอร์ และมีการลัดวงจรเกิดขึ้น ขณะที่เกิดลัดวงจรแรงดันไฟฟ้าคร่อมความจุไฟฟ้า C มีค่าเป็นศูนย์ (ถ้าไม่คิดความต้านทานของอาร์กลัดวงจร) และเมื่อเบรกเกอร์เปิดดวงจรออกซึ่งกระแสลัดวงจรจะ ทำให้เกิดอาร์กผ่านหน้าเบรกเกอร์ และอาร์กดับได้ง่ายในช่วงที่สัญญาณกระแสลัดวงจรลง ศูนย์ถึงแม้จะมีการเปิดดวงจรที่สัญญาณกระแสไม่เป็นศูนย์ก็ตาม และเมื่อสัญญาณเป็นศูนย์ จะตรงกับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ความจุไฟฟ้าแกว่งขึ้นไปหาแรงดันไฟฟ้าของระบบ ตามรูปที่ 2.10 แต่เนื่องจากระบบประกอบด้วยพารามิเตอร์ R, L, C ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแกว่งคั้งในรูป และมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟเมื่อเวลาผ่านไปชั่วขณะ

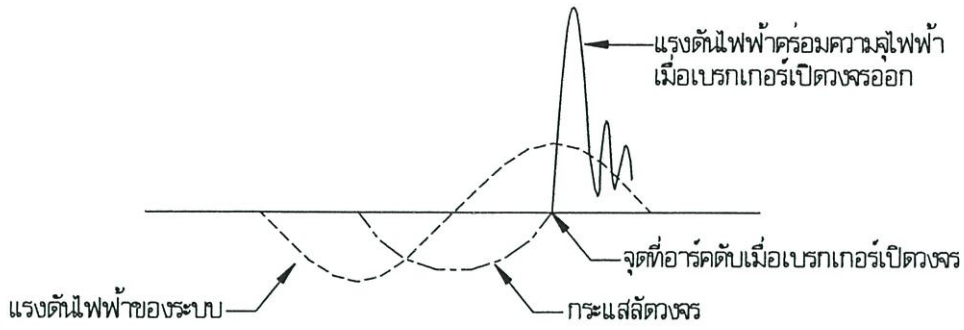
การเปิดดวงจรตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะเห็นว่าระบบที่จะมีแรงดันสูงมากมักเป็นระบบที่กระแส และแรงดันมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา ดังนั้นเมื่อมีการเปิดดวงจรไฟฟ้า อาร์กกระแสจะดับได้ง่ายเมื่อสัญญาณกระแสลงเป็นศูนย์ซึ่งช่วงดังกล่าวแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุด



(ก) ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้าที่จุดลัดวงจร



(ข) วงจรสมมูลของไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของรูป (ก)

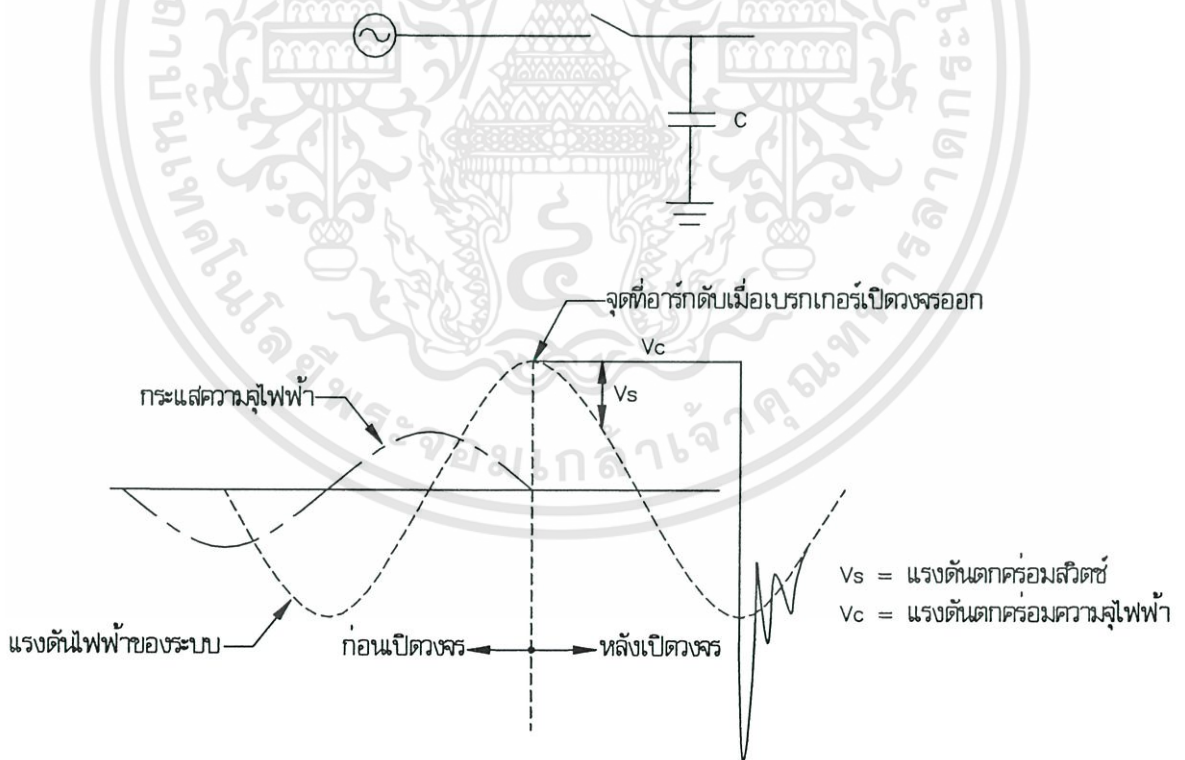


(ค) สัญญาณแรงดันไฟฟ้า และกระแสลัดวงจร

รูปที่ 2.10 แรงดันเกินเนื่องจากการเปิดวงจรของระบบที่มีการลัดวงจรอยู่

2.2.2.2 การเปิดและปิดวงจรของระบบที่มีความจุไฟฟ้า

พิจารณารูปที่ 2.11 แสดงระบบที่มีการเปิดและปิดวงจรที่มีความจุไฟฟ้า ก่อนเปิดวงจรออกกระแสที่ไหลผ่านความจุไฟฟ้านำหน้าแรงดันไฟฟ้าเกือบ 90 องศา ต้องคำนึงว่าอาร์คที่เกิดขึ้นหน้าเบรกเกอร์ดับได้ง่ายที่สุดเมื่อสัญญาณกระแสไฟฟ้ามีค่าใกล้กับศูนย์



รูปที่ 2.11 แรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากการเปิด และปิดวงจรความจุไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.11 เมื่อเปิดวงจรของความจุไฟฟ้าออกอาร์กดับได้ง่ายเมื่อสัญญาณกระแสสูงซึ่งในช่วงนั้นแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงสุดทำให้แรงดันไฟฟ้าคร่อม C เมื่อเปิดวงจรออกมีค่าสูงมากเท่ากับ V ตามรูป เมื่อเวลาผ่านไปแรงดันไฟฟ้าคร่อมหน้าเบรกเกอร์มีค่าสูงมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามขนาด V ในรูปที่ 2.11 และเมื่อ V มีค่าสูงมากจนเท่ากับ 2V ช่วงนี้ถ้าระยะระหว่างหน้าสัมผัสเบรกเกอร์ยังไม่ห่างมากแรงดันไฟฟ้า V ที่สูงดังกล่าวจะทำให้เกิดอาร์กคร่อมหน้าเบรกเกอร์อีกครั้งซึ่งเปรียบเสมือนการปิดวงจรเบรกเกอร์นั่นเอง ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมความจุไฟฟ้าแกว่งเข้าไปหาแรงดันไฟฟ้าของระบบดังในรูปแรงดันไฟฟ้าเกินที่เกิดขึ้นมีค่าแกว่งไปทางลบสูงถึง -3V กรณีอุดมคติ

2.3 ทฤษฎีแรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่า [3]

แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้นจากสาเหตุใหญ่ 2 ประการ คือ เนื่องจากฟ้าผ่า และเนื่องจากสวิตชิง แต่แรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับแรงดันเกินเนื่องจากสวิตชิง ดังนั้นการออกแบบฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจึงพิจารณาจากแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าเป็นหลัก โดยแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าแบ่งได้ 4 กรณี คือ

1. กรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟส
2. กรณีฟ้าผ่าลงสายดิน และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายเฟส
3. กรณีฟ้าผ่าลงดิน และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายเฟส
4. กรณีฟ้าผ่าในแนวเฉียงใกล้สายส่งทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

กรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟสจะทำให้เกิดแรงดันเกินมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ แต่สามารถป้องกันได้โดยการติดตั้งสายดินเหนือสายเฟสเพื่อให้ฟ้าผ่าลงสายดิน จึงทำให้เกิดฟ้าผ่าลงสายดินแทน ซึ่งถ้าไม่พิจารณากรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟสแล้ว กรณีที่ทำให้เกิดแรงดันเกินในสายเฟสรุนแรงที่สุด คือ กรณีฟ้าผ่าลงสายดิน และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายเฟส ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะแรงดันเกินที่จะเกิดขึ้นในสายเฟสเนื่องจากฟ้าผ่าลงสายดิน

พิจารณาจากรูปที่ 2.12 และ รูปที่ 2.13 เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดินทำให้เกิดแรงดันในสายดิน V_1 และเกิดเหนี่ยวนำในสายเฟส V_p ซึ่งจะมีค่าประมาณ 20-30 % ของแรงดันเกินในสายดิน แรงดันในสายดินสามารถคำนวณได้จาก

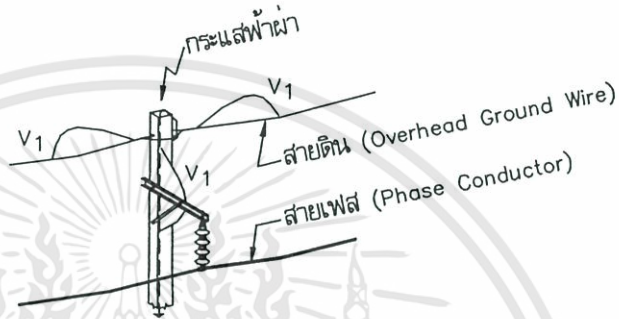
$$V_1 = Z_{total} \times I \quad (2.2)$$

เมื่อ	V_1	คือ แรงดันในสายดิน (กิโลโวลต์)
	I	คือ กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)
	Z_{total}	คือ เสรีจิมพีแดนซ์รวม (โอห์ม)

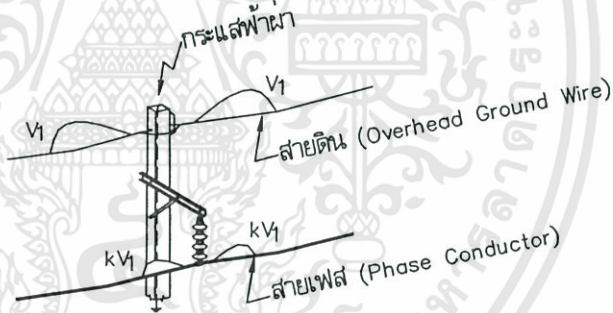
โดยเสิร์จอิมพีแดนซ์รวมคำนวณได้จากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน และเสาขนานกัน

$$Z_{total} = \frac{Z_G \cdot Z_T}{(Z_G + 2Z_T)} \quad (2.3)$$

เมื่อ Z_G คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน (โอห์ม)
 Z_T คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา (โอห์ม)



รูปที่ 2.12 การเกิดแรงดันเกินเมื่อฟ้าผ่าลงสายดิน



รูปที่ 2.13 การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเมื่อฟ้าผ่าลงสายดิน

แรงดันเกินในสายเฟส คำนวณได้จาก

$$V_p = k \cdot V_1 \quad (2.4)$$

เมื่อ V_p คือ แรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส (กิโลโวลต์)
 V_1 คือ แรงดันในสายดิน (กิโลโวลต์)
 k คือ Coupling factor มีค่าประมาณ 0.2-0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันคร่อมฉนวนถูกด้วยคำนวณได้จากสมการที่ (2.5) โดยแรงดันคร่อมฉนวนขึ้นอยู่กับแรงดันเกินในสายดิน ซึ่งมีผลมาจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา และกระแสฟ้าผ่า

$$V_{ins} = V_1 - V_p = (1 - k)V_1 \quad (2.5)$$

เมื่อ V_{ins} คือ แรงดันคร่อมฉนวน (กิโลโวลต์)

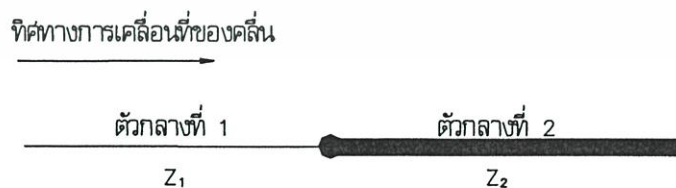
ถ้าพิจารณาเฉพาะแรงดันเกินในสายดิน และแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส ซึ่งมีค่าสูงมากจะทำให้เกิดควาไฟฟ้าตามฉนวนถูกด้วยได้ง่าย แต่ในทางปฏิบัติแรงดันเกินที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสา ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาด้วย

2.3.1 ผลของความต้านทานดินต่อแรงดันเกิน

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความต้านทานต่างกันจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อน โดยคลื่นที่สะท้อนกลับมานั้นจะเสริม หรือหักล้างกับคลื่นเดิมขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนของตัวกลางทั้งสอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความต้านทานตัวกลางนั่นเอง นอกจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนแล้วระยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมา ยังมีผลกับคลื่นด้วย สัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถคำนวณได้จาก

$$\Gamma = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad (2.6)$$

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน
 Z_1 คือ ความต้านทานของตัวกลางที่ 1 ที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน
 Z_2 คือ ความต้านทานของตัวกลางที่ 2 ที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน

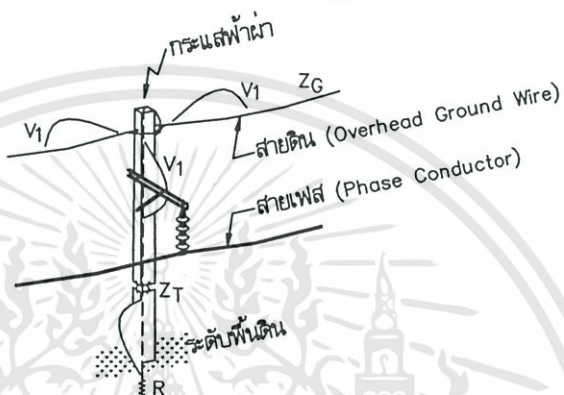


รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านตัวกลาง 2 ชนิดที่มีความต้านทานต่างกัน

คลื่นสะท้อนจะเกิดขึ้นหลังจากคลื่นเดิมเริ่มเดินทางในตัวกลางที่ 1 ด้วยเวลาล่าช้า t ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$t = 2H / v \quad (2.7)$$

เมื่อ	t	คือ เวลาที่เกิดคลื่นสะท้อน (ไมโครวินาที)
	H	คือ ความสูงเสา (เมตร)
	v	คือ ความเร็วคลื่น (เมตร ต่อไมโครวินาที)



รูปที่ 2.15 การเคลื่อนที่ของแรงดันไฟฟ้าเมื่อฟ้าผ่าลงเสา

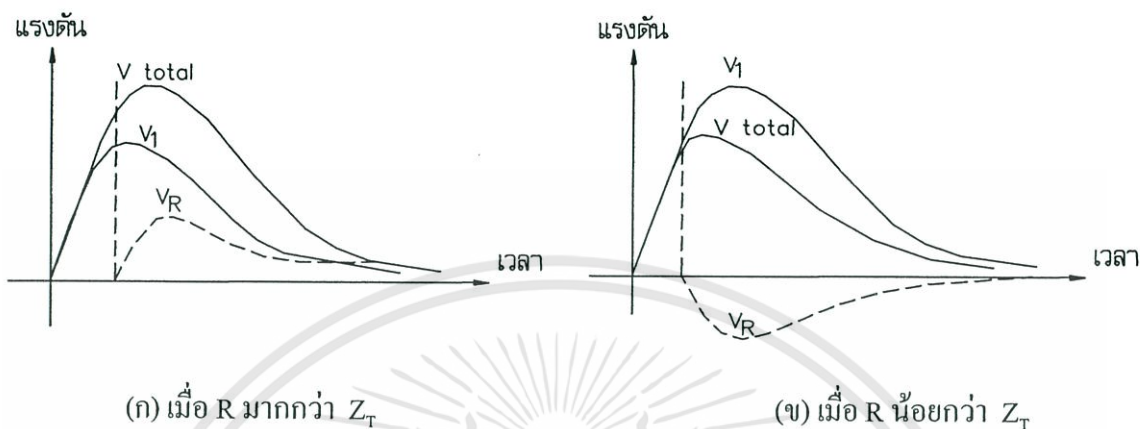
แรงดันในสายดิน V_1 ตามรูปที่ 2.15 เป็นแรงดันที่ยังไม่ได้พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความต้านทานต่างกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากหัวเสาผ่านเสาที่มีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ Z_T มายังความต้านทาน R จะได้แรงดันสะท้อนกลับมีค่า

$$V_R = \Gamma \cdot V_1 = \frac{(R - Z_T)}{(R + Z_T)} \times V_1 \quad (2.8)$$

เมื่อ	V_R	คือ แรงดันสะท้อนกลับ (กิโลโวลต์)
	R	คือ ความต้านทานดิน (กิโลโวลต์)
	Z_T	คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา (โอห์ม)

กรณีความต้านทานดินมีค่ามากกว่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา แรงดันสะท้อนกลับจะมีค่าเป็นบวก และเมื่อรวมกับแรงดันในสายดิน จะทำให้แรงดันรวมมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) แต่ในทางกลับกัน ถ้าความต้านทานดินมีค่าน้อยกว่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา แรงดันสะท้อน

กลับจะมีค่าเป็นลบ เมื่อรวมกับแรงดันในสายดินจะทำให้แรงดันรวมมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.16(ข)

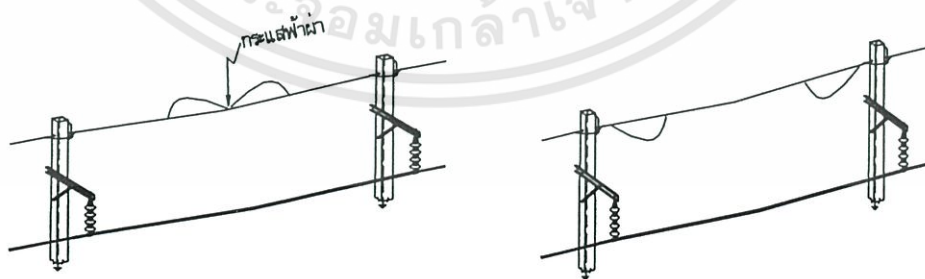


รูปที่ 2.16 แรงดัน และเวลาเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความต้านทานต่างกัน

ความต้านทานดินที่มีค่าต่างกันส่งผลให้เกิดแรงดันรวมที่หัวเสาต่างกัน ดังนั้นถ้าต้องการลดแรงดันเกินที่หัวเสาให้มีค่าน้อยลงจำเป็นต้องลดความต้านทานดินให้มีค่าน้อย แต่ในกรณีที่ไม่สามารถลดความต้านทานดินลงได้อาจใช้วิธีเพิ่มจนวนที่เสาดังกล่าวเพื่อให้สามารถทนแรงดันเกินได้สูงขึ้น

2.3.2 ผลของระยะห่างระหว่างเสาที่อแรงดันเกิน

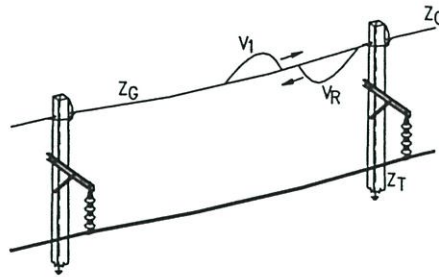
พิจารณาจากรูปที่ 2.17(ก) เมื่อเกิดฟ้าผ่าที่กลางสายคลื่นฟ้าผ่าจะเคลื่อนที่ไปทั้งสองข้างเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปถึงเสาจะเกิดคลื่นสะท้อนกลับเป็นลบ ดังรูปที่ 2.17(ข)



(ก) เมื่อฟ้าผ่าลงกลางสาย

(ข) เมื่อเกิดคลื่นสะท้อน

รูปที่ 2.17 การเคลื่อนที่ของแรงดันฟ้าผ่าเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงกลางสาย



รูปที่ 2.18 แรงดันสะท้อนกลับจากเสาข้างเคียง

รูปที่ 2.18 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากสายดินที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ Z_G ไปถึงหัวเสาที่ประกอบด้วยเสรีจิมพีแดนซ์ Z_G ต่อขนานกันกับเสรีจิมพีแดนซ์ของเสา Z_T แรงดันสะท้อนกลับจะเป็นไปตามสมการ

$$Z_1 = Z_G$$

$$Z_2 = \frac{Z_G \cdot Z_T}{(Z_G + Z_T)}$$

$$\Gamma = \frac{\frac{Z_G \cdot Z_T}{(Z_G + Z_T)} - Z_G}{\frac{Z_G \cdot Z_T}{(Z_G + Z_T)} + Z_G} = \frac{Z_G \cdot Z_T - Z_G(Z_G + Z_T)}{Z_G \cdot Z_T + Z_G(Z_G + Z_T)}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.8) จะได้แรงดันสะท้อนกลับ

$$V_R = \Gamma V_1 = \left[\frac{Z_G \cdot Z_T - Z_G(Z_G + Z_T)}{Z_G \cdot Z_T + Z_G(Z_G + Z_T)} \right] \times V_1 \quad (2.9)$$

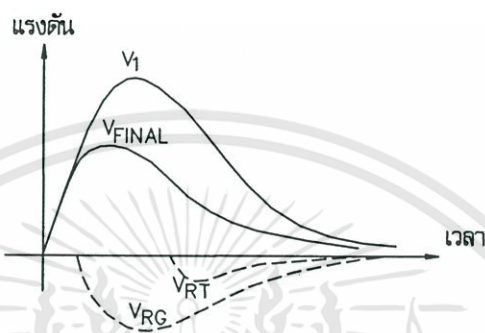
นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับจากเสาข้างเคียงตามสมการที่ (2.9) ซึ่งถ้าคลื่นสะท้อนกลับภายในเวลาก่อนถึงค่ายอดของคลื่นเดิมจะทำให้คลื่นสะท้อนหักล้างยอดของคลื่นเดิมได้ คลื่นพัลส์จึงมีขนาดลดลง

$$t = 2S / v \quad (2.10)$$

เมื่อ	t	คือ เวลาที่เกิดคลื่นสะท้อน (ไมโครวินาที)
	S	คือ ระยะห่างระหว่างเสา (เมตร)
	v	คือ ความเร็วคลื่น (เมตร ต่อไมโครวินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น แรงดันรวมที่หัวเสาจะต้องพิจารณาทั้งแรงดันสะท้อนกลับจากความต้านทานดิน และสะท้อนกลับจากเสาข้างเคียง ขนาดของแรงดันสะท้อนกลับจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน โดยแรงดันสะท้อนกลับจากความต้านทานดินจะเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป $2H/v$ ไมโครวินาที และแรงดันสะท้อนกลับจากเสาข้างเคียงเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป $2S/v$ ไมโครวินาที ลักษณะแรงดันทั้งหมดที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 2.19

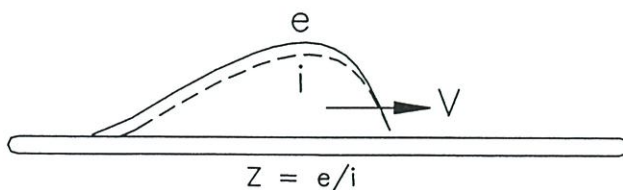


รูปที่ 2.19 แรงดันในสายดิน แรงดันสะท้อนกลับ และแรงดันรวม

2.4 คลื่นจร (Traveling wave) [4]

2.4.1 เสิร์จิมพีแดนซ์

สัญญาณแบบทรานเซียนต์ (transient) ในระบบไฟฟ้า เช่นคลื่นฟ้าผ่า สามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยทฤษฎีของคลื่นจร (Traveling Wave) ในหลักการนี้จะพิจารณาพารามิเตอร์ของสายส่ง (Transmission Line) เป็นแบบกระจาย (Distributed Parameter) คือประกอบด้วยค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมกับค่าความต้านทาน และขนานกับค่าความเก็บประจุ และค่าความต้านทาน จะมีการกระจายตลอดความยาวสายส่ง โดยความสัมพันธ์ของค่ากระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ณ ตำแหน่งใด ๆ จะอยู่ในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ (Partial Differential Equation) คลื่นจรของแรงดัน (e) และกระแส (i) มีความสัมพันธ์กันด้วยค่าเสิร์จิมพีแดนซ์ (Z) และเคลื่อนที่ไปตามสายส่งด้วยความเร็วแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และกระแสที่สัมพันธ์กันด้วยค่าเสิร์จิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสิร์จิมพีแดนซ์ (Surge Impedance, Z) มีคุณสมบัติเป็นความต้านทาน ดังนั้นคลื่นแรงดัน และกระแสจะมีรูปร่างเหมือนกันแต่มีขนาดต่างกันขึ้นอยู่กับค่าเสิร์จิมพีแดนซ์ วงจรที่พิจารณา พารามิเตอร์ของสายแบบกระจาย เช่นระบบสายส่งเหนือดิน, สายเคเบิล โดยค่าของเสิร์จิมพีแดนซ์ และความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นสามารถคำนวณได้จากค่าอินดักแตนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.11)$$

$$L = \frac{Z}{v} \quad C = \frac{1}{Zv} \quad (2.12)$$

เมื่อ	Z	คือ ค่าเสิร์จิมพีแดนซ์ของสาย (โอห์ม)
	L	คือ ค่าอินดักแตนซ์ของสาย (ไมโครเฮนรี่ต่อเมตร)
	C	คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ของสาย (ไมโครฟาร์ัดต่อเมตร)
	v	คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น (เมตรต่อไมโครวินาที)

2.4.1.1 สายอากาศเหนือดิน (Overhead Lines)

สำหรับสายตัวนำเดี่ยวที่มีรัศมี (r), ความสูงเหนือดิน (h) ตามรูปที่ 2.21 และสมมติว่าความต้านทานดินมีค่าเป็นศูนย์สามารถคำนวณค่าอินดักแตนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์ ได้ดังนี้

$$L = 0.20 \ln \frac{2h}{r} \quad \text{ไมโครเฮนรี่ต่อเมตร} \quad (2.13)$$

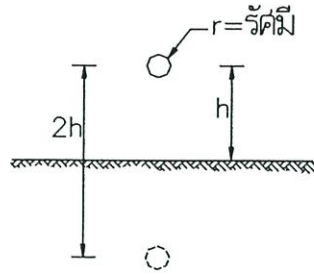
$$C = \frac{10^{-3}}{18 \ln \frac{2h}{r}} \quad \text{ไมโครฟาร์ัดต่อเมตร} \quad (2.14)$$

ดังนั้น

$$Z = 60 \ln \frac{2h}{r} \quad \text{โอห์ม} \quad (2.15)$$

$v = 300$ เมตรต่อไมโครวินาที หรือ 1000 ฟุตต่อไมโครวินาที

สังเกตว่าในกรณีนี้ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในสายอากาศเหนือดินเท่ากับความเร็วแสง ค่าเสิร์จิมพีแดนซ์มีค่าประมาณ 400-500 โอห์ม



รูปที่ 2.21 สายตัวนำเดี่ยวเหนือดิน

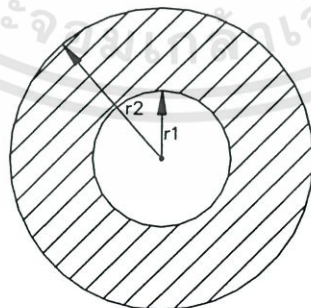
2.4.1.2 สายเคเบิล (Cables)

ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในสายอากาศเหนือดินจะประมาณเท่ากับความเร็วแสง แต่สำหรับความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในสายเคเบิลตามรูปที่ 2.22 จะประมาณเท่ากับ 1/2 หรือ 1/3 ของความเร็วแสง ขึ้นอยู่กับค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity, k) ซึ่งในสายเคเบิลจะมีค่าประมาณ 2.4-4.0 ดังนั้นค่าเสรีจิมพีแดนซ์ และความเร็วของคลื่นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Z = \frac{60}{\sqrt{k}} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{โอห์ม} \quad (2.16)$$

$$v = \frac{300}{\sqrt{k}} \text{ เมตรต่อไมโครวินาที หรือ } \frac{1000}{\sqrt{k}} \text{ ฟุตต่อไมโครวินาที}$$

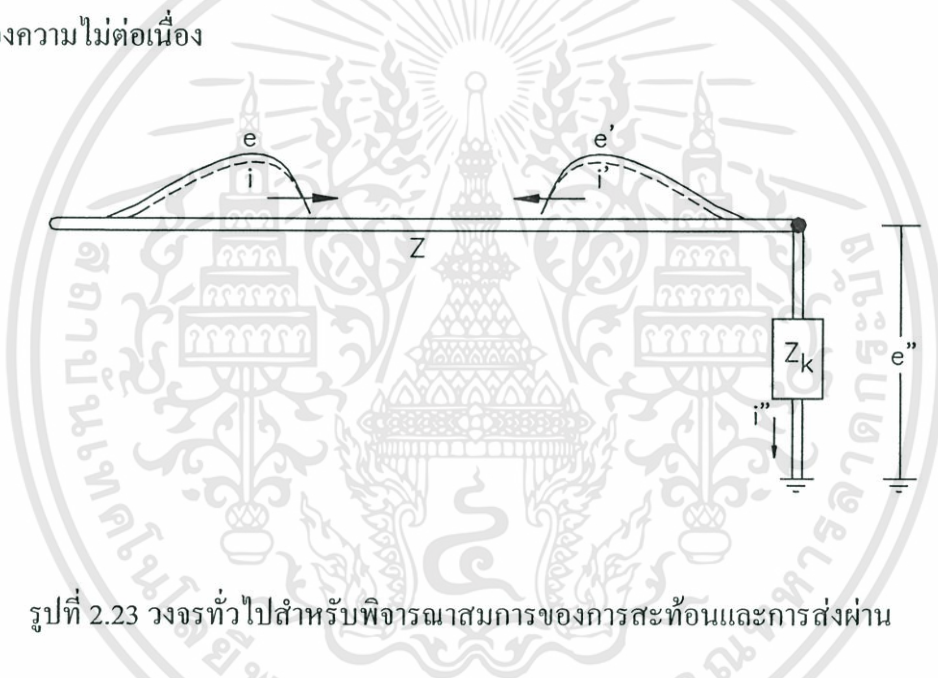
ค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลจะมีค่าประมาณ 30-60 โอห์ม



รูปที่ 2.22 สายเคเบิล

2.4.2 พฤติกรรมของคลื่นที่จุดความไม่ต่อเนื่อง

เมื่อคลื่นของแรงดันและกระแสเดินทางมาตามสายส่งจนถึงจุดของความไม่ต่อเนื่องที่ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร คลื่นของแรงดันและกระแสส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิด อีกส่วนหนึ่งจะส่งผ่านไปข้างหน้า พิจารณาสายส่งที่ปลายด้านหนึ่งต่อกับค่าอิมพีแดนซ์ Z_k ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยสายตัวนำมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ Z ค่า Z_k อาจเป็นค่าความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ความเก็บประจุ หรือผลรวมขององค์ประกอบต่าง ๆ เหล่านี้ คลื่นแรกเริ่มเคลื่อนที่ไปดังแสดงด้วย e และ i ซึ่งเป็นแรงดันและกระแสตามลำดับ ที่ตำแหน่งจุดต่อกับ Z_k คือค่าแรงดันและกระแสที่ส่งผ่านจะแสดงด้วย e'' และ i'' ส่วนคลื่นแรงดันและกระแสที่สะท้อนกลับจากจุดของความไม่ต่อเนื่อง แสดงด้วย e' และ i' โดยทั่วไปสมการที่ใช้ในการหาคำตอบ คือ Normal Equation ซึ่งใช้อธิบายตัว Traveling Waves และ Boundary Equation ซึ่งใช้กำหนดเงื่อนไขที่จำเป็น ณ จุดของความไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 2.23 วงจรทั่วไปสำหรับพิจารณาสมการของการสะท้อนและการส่งผ่าน

Normal Equations

$$e = iZ$$

$$e' = i'Z$$

$$e'' = i'' Z_k$$

Boundary Equation

$$i'' = i - i'$$

$$e'' = e + e'$$

(2.17)

ต้องการหา e'' ในเทอมของ e

$$e'' = e + e' = e + i'Z = e + (i - i'')Z \quad (2.18)$$

$$= 2e - i''Z = 2e - \frac{Ze''}{Z_k}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$e'' = \frac{2Z_k}{Z + Z_k} e \quad (2.19)$$

และ

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

$$e' = e'' - e = \frac{Z_k - Z}{Z + Z_k} e \quad (2.20)$$

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

ถ้า $Z_k = 0$ หรือลัดวงจรจะได้

$$\begin{aligned} e'' &= 0 & i'' &= 2i \\ e' &= -e & i' &= -i \end{aligned} \quad (2.21)$$

ถ้า Z_k มีค่าเป็นอนันต์ หรือเปิดวงจรจะได้

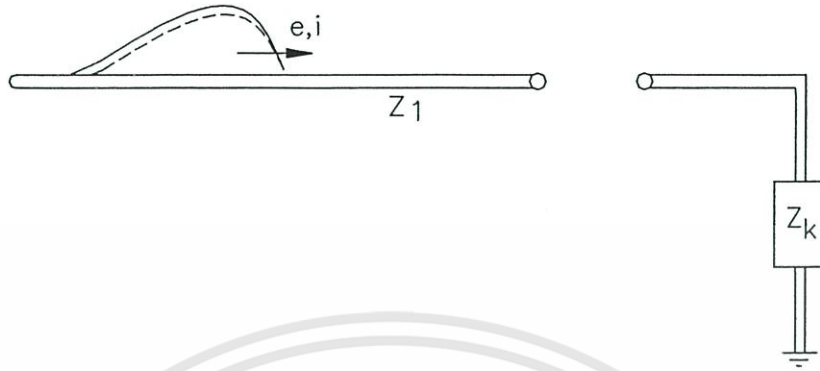
$$\begin{aligned} e'' &= 2e & i'' &= 0 \\ e' &= e & i' &= i \end{aligned} \quad (2.22)$$

จะเห็นว่าแรงดันแรงดันจะมีค่าเป็นสองเท่าเมื่อเปิดวงจร และกระแสจะมีค่าเป็นสองเท่าเมื่อลัดวงจร

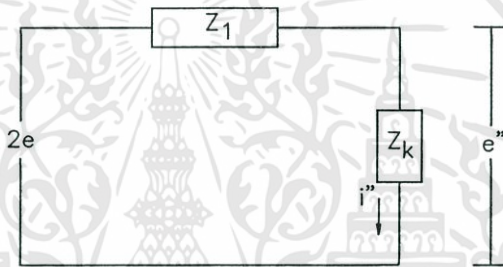
2.4.2.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีบทของเทวินิน

ทฤษฎีบทของเทวินิน (Thevenin's Theorem) สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรในรูปที่ 2.24 เพื่อหาแรงดันตกคร่อม Z_k ในขั้นตอนแรกให้เปิดวงจรที่จุดของความไม่ต่อเนื่อง และคำนวณหาค่าแรงดันเปิดวงจร จากสมการที่ 2.22 แรงดันเปิดวงจรมีค่าเท่ากับ $2e$ ขั้นตอนต่อไปหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรโดยมองกลับจากตำแหน่งเปิดวงจรเข้าไปในวงจร วงจรสมมูลของเทวินินแสดงในรูปที่ 2.25 สามารถใช้คำนวณหาค่าแรงดัน e'' และกระแส i'' ส่วนแรงดัน e' และกระแส i' สามารถหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ $e' = e'' - e$ และ $i' = i - i''$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 วงจรที่พิจารณาตามทฤษฎีบทของเทวินิน



รูปที่ 2.25 วงจรสมมูลของเทวินิน

2.4.2.2 กรณีที่ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ปลายสายเป็นค่าความจุไฟฟ้า

สมมติให้ Z_k เป็นตัวเก็บประจุ (C_k) และ e คือ Unit Step Function ที่มีขนาด E จะ
ได้

$$e'' = \frac{2}{Z + \frac{1}{C_k s}} \frac{E}{s} = \frac{2E}{2C_k} \frac{1}{s \left(s + \frac{1}{ZC_k} \right)} \tag{2.23}$$

โดยที่ s คือ Laplace Operator ดังนั้นจะได้

$$e'' = 2E \left[1 - e^{-\frac{t}{ZC_k}} \right] \tag{2.24}$$

$$e' = E \left[1 - 2e^{-\frac{t}{ZC_k}} \right] \tag{2.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.3 กรณีมีสายตัวนำ 2 ประเภทต่อกัน

ในกรณีนี้ อิมพีแดนซ์ (Z_k) คือสายส่งหรือเคเบิลเส้นอื่นๆ ดังนั้น Z_k จึงมีเพียงแต่ค่าความต้านทานและ e'' คือแรงดันส่งผ่านในสายส่งหรือเคเบิลดังแสดงในรูปที่ 2.26 เมื่อนำวงจรสมมูลของเทวินินตามรูปที่ 2.25 และสมการต่างๆดังที่ผ่านมามาประยุกต์ใช้ โดยสมมติให้ $Z_k = 30$ และ $Z_1 = 400$ จะได้ $e'' = 0.14e$



รูปที่ 2.26 กรณีสายตัวนำ 2 ชนิด

2.4.3 วิธีการคำนวณด้วย Lattice Diagram

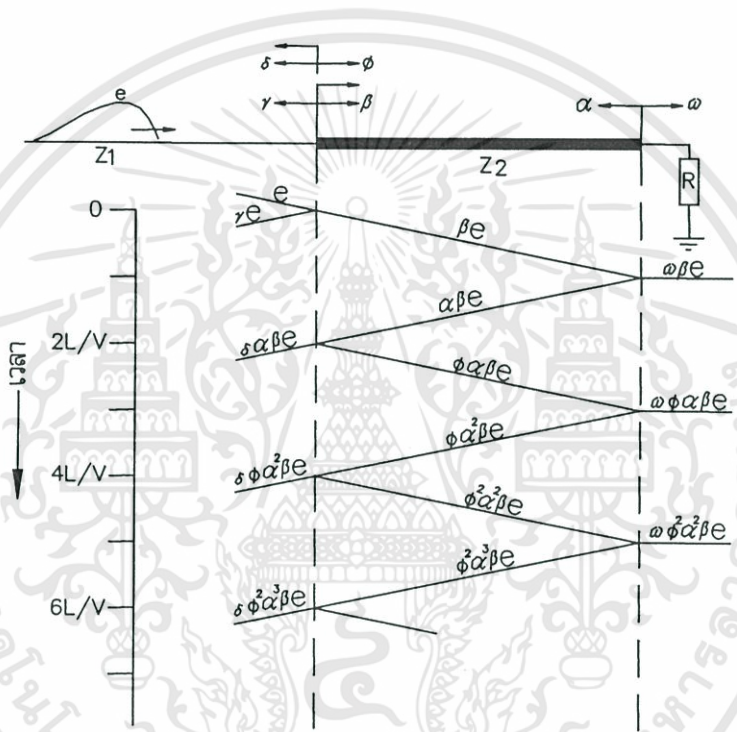
เมื่อคลื่นเสิร์จจึงมากระทบที่จุดความไม่ต่อเนื่อง จะเกิดทั้งคลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่าน ในกรณีที่มีจุดของความไม่ต่อเนื่องอยู่หลายจุด จึงต้องหาวิธีการเพื่อติดตามและตรวจสอบการกระทบและส่งผ่านทั้งหมดที่เกิดขึ้น ได้แก่วิธี Lattice Diagram ซึ่งเสนอโดย Bewley แม้ว่าในปัจจุบันนี้จะมีวิธีการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนอย่างมีประสิทธิภาพจากโปรแกรมดิจิทัลทอลทรานเซียน เช่น EMTP หรือ ATP วิธีนี้ยังเป็นวิธีคำนวณสมการทั่วไปเพื่อแก้ปัญหาพื้นฐาน และสามารถตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงวิธี Lattice Diagram พิจารณารูปที่ 2.26 ถ้าเคเบิลมีความยาวไม่จำกัด แรงดันจะมีค่าเท่ากับที่คำนวณไว้ อย่างไรก็ตามสำหรับเคเบิลที่มีความยาวจำกัดคลื่นเสิร์จจะสะท้อนจากปลายของเคเบิลและวิ่งกลับมายังจุดต่อ สายส่งกับเคเบิล และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มแรงดัน เมื่อพิจารณาเคเบิลที่มีความยาวจำกัดดังรูปที่ 2.27 และที่ด้านปลายของเคเบิลสมมติให้มีค่าความต้านทาน R ต่ออยู่

ในลำดับแรกต้องคำนวณสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนและการส่งผ่านโดยระบุทิศทางของการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.27 ตัวอย่างเช่นเมื่อคลื่นแรงดันเสิร์จ e วิ่งจากเคเบิลไปหาสายส่ง แรงดันส่งผ่านไปสายส่งคือ δe และคลื่นสะท้อนกลับไปยังเคเบิลคือ ϕe สัมประสิทธิ์เหล่านี้สามารถหาค่าได้โดยอาศัยสมการที่ 2.19 และ 2.20 ดังนี้

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} & \gamma &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} & \omega &= \frac{2R}{R + Z_2} \\ \alpha &= \frac{R - Z_2}{R + Z_2} & \delta &= \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} & \phi &= \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \end{aligned} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของ Lattice Diagram ประกอบด้วยแกนเวลาที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวตั้งลง เวลาเริ่มต้น $t = 0$ คือเวลาที่คลื่นเสร็จ e วิ่งมาถึงจุดต่อสายส่งกับสายเคเบิล เส้นทแยงลงคือคลื่นแรงดันที่วิ่งไปมา เกิดการสะท้อนและส่งผ่านโดยค่าที่กำกับเหนือแต่ละเส้นคือเส้นแรงดันแรกเริ่ม e คูณกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านต่างๆ ดังเช่นคลื่นแรงดัน e เมื่อมาถึงจุดต่อสายส่ง-เคเบิล เกิดคลื่นส่งผ่านมีค่า βe และคลื่นสะท้อนมีค่า γe คลื่นนี้เมื่อวิ่งมาถึงปลายสายเคเบิลจะเกิดสะท้อนกลับโดยคลื่นสะท้อนกลับมีขนาด $\alpha\beta e$ แรงดันที่ปลายของสายเคเบิลมีค่า $\omega\beta e$ จากนั้นคลื่นสะท้อนนี้จะวิ่งกลับไปยังจุดต่อสายส่ง-เคเบิลเกิดแรงดันส่งผ่าน $\delta\alpha\beta e$ และแรงดันสะท้อนกลับ $\phi\alpha\beta e$ เป็นต้น



รูปที่ 2.27 Lattice Diagram สำหรับวงจรสายส่ง-เคเบิล

แรงดันที่ตำแหน่งใดๆ ในเคเบิล คือผลรวมของคลื่นแรงดันที่คลื่นแรงดันที่เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งนั้นๆ โดยจะต้องพิจารณาถึงเวลาที่คลื่นวิ่งมาถึงตำแหน่งนั้นๆด้วย ตัวอย่างเช่นแรงดันที่จุดต่อสายส่ง-เคเบิล e_T มีค่า

$$e_T = e(\beta + \delta\beta\alpha(t - 2T) + \delta\phi\alpha^2\beta(t - 4T) + \delta\phi^2\alpha^3\beta(t - 6T)...) \quad (2.27)$$

T คือ เวลาที่คลื่นเสร็จใช้ในการเดินทางข้ามความยาวของเคเบิล นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{L}{v} \quad (2.28)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของสายส่ง

เทอม $(t-2T)$ หมายถึง คลื่นเสิร์จล่าช้าออกไปเป็นเวลาเท่ากับเวลาเดินทางไปกลับข้ามเคเบิล นั่นคือจะใช้ค่าแรงดันในเทอมนี้คำนวณค่าแรงดันหลังจากเวลา $t = 2T$

สำหรับเทอมแรกของสมการ 2.27, βe สามารถแทนด้วย $(1 + \gamma)e$ และเทอมที่ 2, $\delta\alpha\beta e$ สามารถแทนได้ด้วย $(\alpha\beta + \phi\alpha\beta)e$ ขึ้นอยู่ว่าจะพิจารณาค่าทางด้านใดของเส้นประ ซึ่งไม่แตกต่างกันเนื่องจาก $\beta = 1 + \gamma$ และ $\delta\alpha\beta = \alpha\beta + \phi\alpha\beta$

จากสมการข้างต้นสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$e_T = \beta e (1 + \delta\alpha(t-2T) + \delta\phi\alpha^2(t-4T) + \delta\phi^2\alpha^3(t-6T)) \quad (2.29)$$

และจะได้ว่าแรงดันที่เวลามีค่าเป็นอนันต์ คือ

$$\begin{aligned} E_T(t = \infty) &= \beta e (1 + \delta\alpha(1 + \phi\alpha + \phi^2\alpha^2 + \phi^3\alpha^3 + \dots)) \\ &= \beta e \left[1 + \frac{\delta\alpha}{1 - \phi\alpha} \right] \end{aligned} \quad (2.30)$$

2.5 การต่อลงดิน

การต่อลงดิน [5] คือการใช้ตัวนำหรือสายไฟฟ้าต่อจากส่วนที่ต้องการต่อลงดินเข้ากับดิน การต่อลงดินจึงมิใช่เป็นเพียงการขุดหลุมแล้วเอาตัวนำหรือสายไฟฟ้าใส่ลงในหลุมแล้วกลบดิน เพื่อให้ไอเล็กตรอนไหลลงดินเท่านั้น แต่ต้องต่อกันอย่างดีในทางไฟฟ้า ต้องมีความต้านทานต่ำ สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้มากตามต้องการ และใช้งานได้นาน ตัวนำที่ทำหน้าที่ต่อสายดินเข้ากับดินคือหลักดิน การต่อนี้ต่างจากการต่อสายไฟฟ้าเข้าด้วยกัน เพราะมิใช่เป็นการต่อระหว่างตัวนำสองตัว แต่เป็นการต่อระหว่างตัวนำ(หลักดิน) กับปริมาตรของดินที่มีลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำ ทั้งหลักดินและดินจึงมีความสำคัญในการต่อลงดินทั้งคู่

2.5.1 ความหมายของดินในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในระบบขนาดเล็กเช่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์คำว่า "ดินหรือกราวด์" อาจเป็นแผ่นโลหะหรือแท่นโลหะขนาดเล็ก ๆ แต่ในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีขนาดใหญ่มาก ดินจึงหมายถึงพื้นโลกหรือพื้นดิน ผิวโลกส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกา (Silica) และอะลูมินา (Alumina) ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารละลายเกลือและความชื้นซึ่งเป็นตัวนำที่ดี ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงมาก ระหว่าง 2 ถึง 30,000 โอห์ม-เมตร อุณหภูมิของดินจะมีผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนไปด้วยอุณหภูมิดินสูงขึ้นจะมีผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินลดลง ความต้านทานของดินหาได้จากค่าความต้านทานจำเพาะของดินซึ่งมีตัวแปรหลายตัวด้วยกันเช่น ชนิดของดิน ความชื้นในดิน ส่วนประกอบของเกลือแร่ในดิน และอุณหภูมิของดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินกำหนดเป็นค่าโอห์ม-เมตร โอห์ม-เซนติเมตร หรือโอห์ม-นิ้ว เขียนแทนด้วยอักษร ρ (rho)

2.5.2 หลักดินกับความต้านทานการต่อลงดิน

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลักดินลงดินจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นในดินรอบๆหลักดิน โดยเฉพาะที่ผิวเนื่องจากมีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density) สูงที่สุด การที่จะให้ค่าความต้านทานโดยรวมต่ำจึงต้องทำให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกับหลักดิน โดยเฉพาะพื้นที่ตรงส่วนกลางหลักดินให้มีค่าต่ำที่สุดการออกแบบจึงควรให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางที่ห่างออกไปวิธีดังกล่าวนี้สามารถทำได้โดยการใช้หลักดินที่มีความยาวด้านหนึ่งมากกว่าอีกสองด้านที่เหลือ ดังนั้นการใช้หลักดินที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเป็นเส้น จะให้ค่าความต้านทานที่ต่ำกว่าหลักดินที่มีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม ถึงแม้จะมีพื้นที่เท่ากันก็ตามเช่น แท่งหลักดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 2.40 เมตร ที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร จะมีค่าความต้านทานการต่อลงดินประมาณ 4 โอห์ม ขณะที่แผ่นหลักดิน (Plate) ที่มีพื้นที่เท่ากันจะมีความต้านทานการต่อลงดินประมาณ 9 โอห์ม

2.5.3 จุดประสงค์ของการต่อลงดิน

จุดประสงค์หลักของการต่อลงดินก็เพื่อลดอันตรายต่อบุคคล และลดความเสียหายที่อาจเกิดแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือต่อระบบไฟฟ้า โดยการต่อลงดินจะทำหน้าที่ดังนี้

1. จำกัดแรงดันไฟฟ้าของวงจรไม่ให้สูงจนอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายเมื่อเกิดแรงดันเกินเนื่องจาก SURGE หรือฟ้าผ่า (ฟ้าผ่าเป็น SURGE ชนิดหนึ่ง) และลดแรงดันไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นจากการรั่วหรือการเหนี่ยวนำ ที่เปลือกโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนประกอบ หรือ โครงสร้างอื่น ๆ ซึ่งในภาวะปกติไม่มีไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อลดอันตรายจากการสัมผัสของบุคคล (หรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ)

2. ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้าในกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจรลงดิน โดยทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสที่เกิดขึ้นนี้ให้ไหลผ่านในปริมาณมากพอที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกัน (PROTECTIVE DEVICE) ทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด

การต่อลงดินในทางไฟฟ้าจึงแยกออกได้เป็น

1. การต่อลงดินของระบบไฟฟ้า (SYSTEM GROUNDING)
2. การต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า (EQUIPMENT GROUNDING)
3. การต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า (LIGHTNING PROTECTION GROUNDING)

2.5.3.1 การต่อลงดินของระบบไฟฟ้า (SYSTEM GROUNDING)

การต่อลงดินของระบบไฟฟ้าก็คือการต่อจุดใดจุดหนึ่งในระบบการจ่ายไฟฟ้าลงดิน ซึ่งปกติแล้วจะเป็นการต่อจุดหรือสาย NEUTRAL ลงดิน โดยมีวัตถุประสงค์หลายประการด้วยกันพอสรุปได้ดังนี้

1. ลดแรงดันไฟฟ้าสูงเกินในกรณีที่เกิด SINGLE LINE TO GROUND FAULT (สายไฟฟ้าเส้นใดเส้นหนึ่งรั่วลงสู่พื้นดิน)

2. ลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่สายส่งมีระยะทางยาวมาก ๆ ค่า CAPACITANCE ที่เกิดขึ้นระหว่างสายไฟกับดินของสายส่งที่ไม่มีการต่อลงดินจะมีค่าสูง ซึ่งจะเป็นผลให้ CAPACITIVE CURRENT มีค่าสูงและไหลอยู่ตลอดเวลา ซึ่งก็คือพลังงานไฟฟ้าสูญเสียนั่นเอง

3. การตรวจสอบเมื่อเกิด SINGLE LINE TO GROUND FAULT ในกรณีของระบบที่ไม่มีการต่อลงดินทำได้ยาก เนื่องจากกระแสนี้มีค่าไม่แน่นอน และอาจมีค่าน้อยจนอุปกรณ์ป้องกัน (PROTECTIVE DEVICE) ไม่สามารถตรวจจับได้ การต่อลงดินของระบบไฟฟ้าจะทำให้กระแสที่รั่วลงดินนี้มีค่ามากพอที่จะเป็นผลให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานได้ตามจุดประสงค์

2.5.3.2 การต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า (EQUIPMENT GROUNDING)

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเปลือกนอกเป็นโลหะรวมทั้งส่วนประกอบในการก่อสร้างและโครงสร้างอื่น ๆ ที่เป็นโลหะซึ่งอาจมีแรงดันไฟฟ้าได้ (เกิดจากการรั่วหรือจากการเหนี่ยวนำ) ต้องต่อลงดินโดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความปลอดภัยต่อบุคคล และเพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานได้อย่างถูกต้อง

2.5.3.3 การต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า

1. LIGHTNING ARRESTER คือ อุปกรณ์ที่ช่วยลดแรงดันจากฟ้าผ่าไม่ให้มีค่าสูงจนเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

2 OVERHEAD GROUND WIRE (หรือ STATIC WIRE) คือสายที่ซึ่งอยู่ปลายบนสุดของเสาไฟฟ้า ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำมาใช้ในระบบสายป้อนเขตชานเมืองการติดตั้งมีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับเสาต่อฟ้าที่ติดตั้งตามอาคารสูง ๆ คือช่วยให้ฟ้าผ่าไปลงที่ OVERHEAD GROUND WIRE แทนที่จะลงที่สายไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่เสาไฟฟ้า

2.5.4 ความต้านทานดินเมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลผ่าน

กระแสฟ้าผ่าที่มีขนาดสูงเมื่อไหลผ่านความต้านทานรากสายดิน จะทำให้ดินบริเวณโดยรอบเกิดการแตกตัวเป็นไอออนรอบๆ แท่งอิเล็กโทรด มีผลทำให้ความต้านทานของรากสายดินต่ออิมพัลส์ฟ้าผ่ามีค่าต่ำกว่าความต้านทานที่วัดได้ในสภาพปกติ (Power frequency resistance) K.H. Weck คณะทำงานขององค์การซีเกียร์ (CIGRE Working Group) [4] ได้เสนอวิธีการประมาณค่าความต้านทานอิมพัลส์อย่างง่ายของอิเล็กโทรดแบบแท่ง หรือกราวด์ร็อด (Ground Rod) โดยกำหนดให้ R_o เป็นความต้านทานที่ความถี่กำลัง และกระแสใช้งานปกติ

$$R_o = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_o} - 1 \right) \quad (2.31)$$

เมื่อ	R_o	คือ ความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง (โอห์ม)
	ρ	คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)
	L	คือ ความยาวของรากสายดิน (เมตร)
	r_o	คือ รัศมีของรากสายดิน (เมตร)

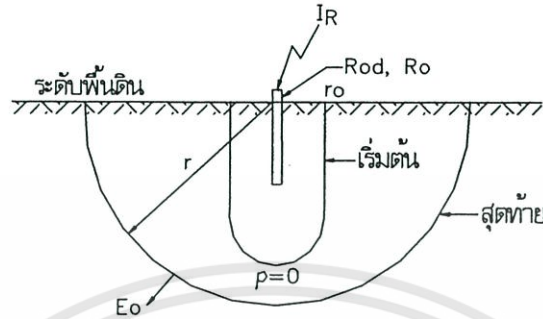
เมื่อจ่ายกระแสอิมพัลส์ I_R ที่อิเล็กโทรด สามารถคำนวณหาความหนาแน่นของกระแส J ที่ระยะห่างจากแท่งอิเล็กโทรดเท่ากับ r และแรงดันเกรเดียนท์ E (Voltage Gradient) ได้ดังนี้

$$J = \frac{I_R}{2\pi \cdot rL} \quad (2.32)$$

$$E = \rho \cdot J = \frac{\rho \cdot I_R}{2\pi \cdot rL} \quad (2.33)$$

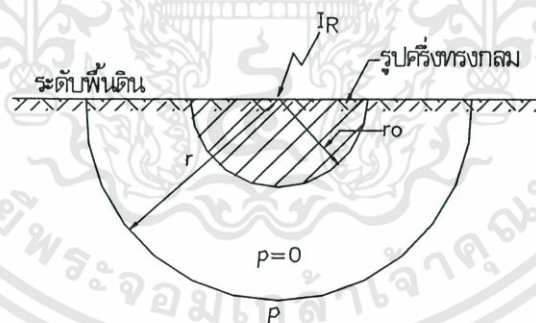
การเกิดฟ้าผ่าที่มีขนาดกระแสสูงๆ ที่ทำให้แรงดันเกรเดียนท์เกินค่าวิกฤติ (E_c) เป็นผลทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินบริเวณรอบๆ แท่งอิเล็กโทรดเกิดการเบรกดาวน์ (Break down) ความต้านทานจำเพาะของดินจะลดน้อยลงจากเดิมจนกระทั่งเป็นศูนย์ ในขณะที่เกิดเบรกดาวน์นั้นจะทำให้ขนาดและความยาวของแท่งอิเล็กโทรดมีลักษณะเหมือนกับขยายออกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งคล้ายครึ่งทรงกลมในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แบบจำลองอย่างง่ายของอิเล็กโทรดขณะเกิดเบรกดาวน์

ในบริเวณที่เกิดการเบรกดาวน์จะแทนได้ด้วยโซนไอโอไนเซชัน (Ionization Zone) ที่มี ความต้านทานจำเพาะของดินเป็นศูนย์ รัศมีเท่ากับ r และแรงดันเกรเดียนท์เป็น E_0 การเกิดไอโอไนเซชันจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนมีลักษณะคล้ายกับทรงกลม (Spherical) ดังนั้นที่กระแสสูงๆ อิเล็กโทรดแบบแท่ง (Ground Rod) สามารถแทนได้ง่ายๆ ด้วยอิเล็กโทรดแบบครึ่งทรงกลม (Hemisphere electrode) ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงอิเล็กโทรดแบบครึ่งทรงกลม

สำหรับอิเล็กโทรดแบบครึ่งทรงกลมที่มีรัศมี r_0 สามารถคำนวณหาความต้านทานดินได้ดังนี้

$$R_o = \frac{\rho}{2\pi \cdot r_0} \quad (2.34)$$

$$J = \frac{I_R}{2\pi \cdot r^2} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \rho \cdot J = \frac{\rho \cdot I_R}{2\pi \cdot r^2} \quad (2.36)$$

เมื่อให้ความต้านทานจำเพาะในโชนไอโอไนเซชันเป็นศูนย์ หมายความว่าดินกลายเป็นตัวนำที่สมบูรณ์ รัศมีของอิเล็กโทรดรูปครึ่งทรงกลมจะขยายออกไปเป็น r ซึ่งสามารถคำนวณหาความต้านทานอิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรดรูปครึ่งทรงกลมได้ดังนี้

จากสมการที่ 2.34 แทนรัศมี r_0 ด้วยระยะห่าง r และความต้านทาน R_0 ด้วย R_i จะได้

$$R_i = \frac{\rho}{2\pi \cdot r} \quad (2.37)$$

หรือ

$$r^2 = \left[\frac{\rho}{2\pi \cdot R_i} \right]^2 \quad (2.38)$$

จากสมการที่ 2.36 กำหนดให้ $E = E_0$ จะได้

$$r^2 = \left[\frac{\rho \cdot I_R}{2\pi \cdot E_0} \right]^2 \quad (2.39)$$

จากสมการที่ 2.38 และ 2.39 แก้สมการทั้งสองหาค่า R_i จะได้

$$\left[\frac{\rho}{2\pi \cdot R_i} \right]^2 = \frac{\rho \cdot I_R}{2\pi \cdot E_0} \quad (2.40)$$

$$R_i^2 = \left[\frac{E_0 \cdot \rho}{2\pi \cdot I_R} \right] \quad (2.41)$$

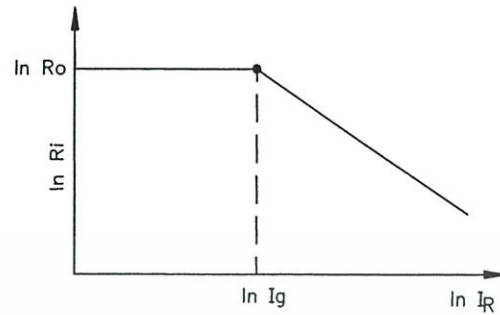
$$R_i = \sqrt{\frac{E_0 \cdot \rho}{2\pi \cdot I_R}} \quad (2.42)$$

หรือเขียนเป็นฟังก์ชันลอการิทึมจะได้

$$\ln R_i = \frac{1}{2} \left[\ln \frac{E_0 \cdot \rho}{2\pi} - \ln I_R \right] \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.42 จะเห็นว่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ R_i เป็นสัดส่วนผกผันกับรากที่สองของกระแสอิมพีแดนซ์ I_R ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันลอการิทึมได้ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ความต้านทานอิมพีแดนซ์ของอิล็กโทรด์แบบครึ่งทรงกลม

อย่างไรก็ตาม อาจจะไม่เกิดความต้านทานอิมพีแดนซ์ขึ้นจนกว่าจะมีกระแสนอนเพียงพอที่จะทำให้เกิดแรงดันเกรเดียนท์ที่วิกฤติ E_0 ที่ผิวของทรงกลม (Sphere) ซึ่งสามารถหากระแส (I_g) ได้จากสมการที่ 2.36 โดยแทน $E = E_0$ และ $I_R = I_g$

$$I_g = \frac{2\pi \cdot r^2 \cdot E_0}{\rho} \quad (2.44)$$

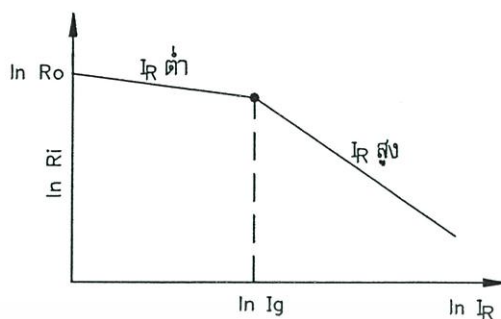
แทนค่าสมการที่ 2.34 เมื่อให้ $r = r_0$ ลงในสมการที่ 2.44 จะได้

$$I_g = \frac{1}{2\rho} \frac{\rho \cdot E_0}{R_0^2} \quad (2.45)$$

ดังนั้นสามารถหาความต้านทานอิมพีแดนซ์ของอิล็กโทรด์แบบแท่งได้จากสมการที่ 2.31 โดยการแทนรัศมี r_0 ด้วย r จากสมการที่ 2.33 จะได้

$$R_i = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \left[\ln \frac{8\pi \cdot L^2 \cdot E_0}{\rho} - 1 - \ln I_R \right] \quad (2.46)$$

ที่กระแสสูงๆ R_i จะมีค่าลดลงคล้ายกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบครึ่งทรงกลม ดังในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 ความต้านทานอิมพัลส์ของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบครึ่งทรงกลม

แทนค่าสมการที่ 2.45 ลงในสมการที่ 2.42 จะได้ความต้านทานอิมพัลส์ของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบครึ่งทรงกลมเป็น

$$R_i = \frac{R_o}{\sqrt{\frac{I_R}{I_g}}} \quad (2.47)$$

เนื่องจากที่กระแสสูงๆ อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบครึ่งทรงกลม (Spheres) ดังนั้นจึงสามารถแทนความต้านทานอิมพัลส์ของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบครึ่งทรงกลมได้จากสมการที่ 2.47 ตามคำแนะนำของ K.H. Weck ได้ดังนี้

$$R_i = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \frac{I_R}{I_g}}} \quad (2.48)$$

2.6 ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่า และการป้องกัน

2.6.1 ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่า [6]

ผลจากฟ้าผ่าที่ก่อให้เกิดความเสียหายหรือเกิดอันตรายอาจแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

- 1) ความร้อนเป็นผลให้เกิดเพลิงไหม้สิ่งที่ถูกฟ้าผ่า
- 2) แรงกลบิดหรือแรงระเบิดเป็นผลให้สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าพังทะลายลงได้
- 3) ผลทางไฟฟ้า เกิดแรงดันเกินในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลเสียแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ เกิดคลื่นรบกวนต่อระบบสื่อสาร เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเกิดแรงดันช่วงก้าวเป็นอันตรายต่อชีวิต

2.6.1.1 ผลทางความร้อน

เมื่อเกิดฟ้าผ่าจะมีลำแสงจ้าของลำฟ้าผ่า ลำแกมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเซนติเมตร และมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000°K อุณหภูมิสูงขนาดนี้ย่อมก่อให้เกิดเพลิงไหม้แก่วัสดุติดไฟได้ ถึงแม้ว่าช่วงระยะเวลาการไหลของกระแสจะสั้นมากก็ตาม กรณีเกิดฟ้าผ่าลงบนโลหะ มักจะมีร่องรอยของการถูกฟ้าผ่า ณ ตำแหน่งที่ผ่า ทั้งนี้เพราะกระแสฟ้าผ่าเมื่อแปลงเป็นพลังงานความร้อน มีค่ามากพอที่จะทำให้โลหะนั้นหลอมละลายได้ พลังงานฟ้าผ่าอาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$W = U \int_0^{\infty} i dt = U_{A-K} Q \quad (2.49)$$

เมื่อ U_{A-K} คือ แรงดันตกคร่อมแอมโนด-แกโอดตรงจุดที่ฟ้าผ่ากระทบ
 Q คือ ประจุไฟฟ้าเป็นคูลอมบ์ (หรือแอมป์-วินาที)

ถ้าทราบชนิดของโลหะ จะสามารถคำนวณปริมาตรของโลหะที่หลอมละลายได้ เช่น กระแสฟ้าผ่า 1 แอมป์-วินาที (=1 คูลอมบ์) จะหลอมทองแดงได้ 5.4 ลูกบาศก์มิลลิเมตร อลูมิเนียมได้ 12 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เหล็กได้ 4.4 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

แสดงว่าถึงโลหะแผ่นบางทั้งหลายมีโอกาสถูกฟ้าผ่าหลอมละลายทะลุตรงจุดที่ฟ้าผ่ากระทบได้ ถ้าความหนาไม่พอ ถ้าเป็นถังเก็บเชื้อเพลิง เช่น ถังน้ำมันก็ย่อมทำให้เกิดการระเบิดเพลิงไหม้ขึ้นได้ ด้วยเหตุผลนี้ การออกแบบระบบสายล่อฟ้าซึ่งต้องใช้เสาต่อฟ้าเป็นตัวล่อ หรือรับให้ฟ้าผ่าลง และมีสายตัวนำลงดิน (down conductor) เป็นทางนำกระแสฟ้าผ่าให้ลงสู่ดินโดยเร็วที่สุด โดยไม่ทำให้สายตัวนำลงดินหลอมละลาย หรืออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จนเป็นเหตุให้เกิดเพลิงไหม้ นั่นคือสายตัวนำลงดินจะต้องมีพื้นที่ภาคตัดขวางขนาดโตพอ

2.6.1.2 ผลทางแรงกล

ผลของฟ้าผ่า นอกจากจะเกิดความร้อนแล้ว ในขณะเดียวกันยังเกิดแรงกลระเบิดสองแบบ คือ แบบหนึ่ง เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำแล้ว ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นแก่ตัวนำนั้น เป็นแรงดึงคูดหรือแรงผลักรขนาดแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นวัดส่วน โดยตรงกับกระแสกำลังสอง

I^2 เป็นสัดส่วนกลับกับระยะห่างระหว่างสายตัวนำทั้งสอง d นั่นคือ แรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยความยาวของตัวนำจะคำนวณได้จากสมการ

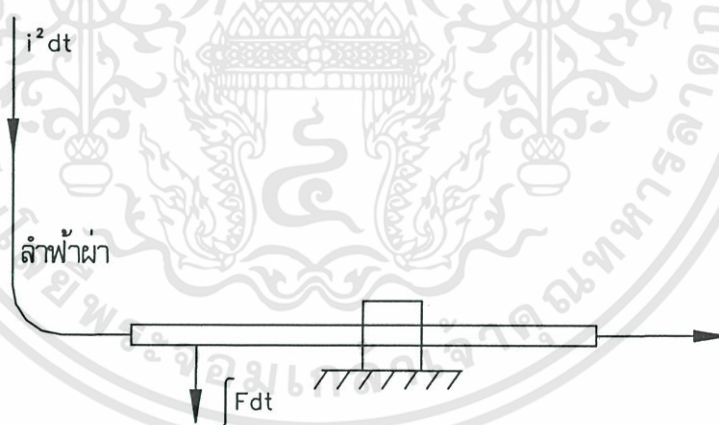
$$(Fdt)' = \frac{10^{-7}}{d} \int i^2 dt \frac{N \text{ sec}}{m} \quad (2.50)$$

ถ้าลำฟ้าผ่าลงตั้งฉากกับแนวของตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.32 จะเกิดแรงอิมพัลส์กระทำต่อตัวนำในแนวต่อตรงออกไปของลำฟ้าผ่า ซึ่งอาจคำนวณได้จาก

$$\int Fdt' = 10^{-7} \int i^2 dt N \text{ sec} \quad (2.51)$$

เมื่อ $I^2 dt$ เป็น $A^2 \text{ sec}$

เช่นเดียวกัน กระแสฟ้าผ่าที่ไหลในตัวนำที่เป็นบ่วง หรือวงแหวน จะเกิดแรงทำให้บ่วงนั้นขยายยี่ดวงกว้างออก ส่วนแรงกลแบบที่สองเป็นแรงระเบิด เนื่องจากลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมาก ทำให้อากาศรอบ ๆ ลำฟ้าผ่าขยายตัวออกอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดคลื่นความดันในย่านความเร็วเหนือเสียงแผ่กระจายออกไปรอบลำฟ้าผ่า เกิดเสียงดังสนั่นหวั่นไหวที่เรียกว่าฟ้าร้องนั่นเอง



รูปที่ 2.32 แรงกลอิมพัลส์กระทำต่อตัวนำ

2.6.1.3 ผลทางไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่ามีหลายลักษณะ คือ

1. การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference, EMI)

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่าประการแรก ก็คือ เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความไว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำถ้าแรงดันเหนี่ยวนำสูงพอก็อาจเกิดสปาร์กได้

2. แรงดันสปาร์กด้านข้าง

ถ้ากระแสไฟฟ้า i ไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ L และมีความต้านทานของดิน R_e จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ และความต้านทาน ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta U = R_e i + L \frac{di}{dt} \quad (2.52)$$

โดยที่ di/dt คือ ความชันของคลื่นกระแสไฟฟ้า

ถ้าหากความต้านทานของรากสายดิน หรือ ความเหนี่ยวนำของสายตัวนำลงดินมีค่าสูงจะทำให้ศักย์ไฟฟ้านี้มีค่าสูงอาจมากพอที่จะทำให้เกิดสปาร์กด้านข้าง หรือกระโดดเข้าหาส่วนที่ต่อลงดินอย่างดี ซึ่งการเกิดสปาร์กด้านข้างนี้ อาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ ถ้ามีสิ่งที่เป็นเชื้อเพลิงอยู่ในบริเวณนั้น

3. แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยตรง ย่อมทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่ง คือ ถ้าฟ้าผ่าเปรียบเสมือนเป็นต้นกำเนิดของตัวจ่ายกระแส เมื่อมีกระแสฟ้าผ่า I วิ่งลงบนสายส่ง ซึ่งมีค่าเสถียรจิมพีแดนซ์ Z_w จะเกิดแรงดันสูงเป็นคลื่นจร วิ่งไปบนสายส่งทั้งสองทางของจุดที่ฟ้าผ่าลง มีค่าเท่ากับ $AU = I \cdot Z_w/2$ แรงดันสูงคลื่นจรนี้ เมื่อวิ่งไปถึงจุดที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่ออยู่ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เหล่านั้นได้สายดินที่ขึงอยู่เหนือสายส่งกำลัง ทำหน้าที่เป็นสายล่อฟ้า หรือเสาไฟฟ้ามีค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานของรากสายดินมีค่าสูง ย่อมทำให้เกิดแรงดันเกินที่เป็นไปตามสมการ 2.52 และอาจมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดควาบไฟตามผิวบนพวงลูกถ้วยฉนวน ที่ใช้ยึดหรือรองรับสายไฟได้ เรียกว่า เกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับ (backflashover) เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น อาจทำให้เกิดการเจาะทะลุบนลูกถ้วยฉนวน เกิดลัดวงจรลงดิน เกิดผิวดร้งขึ้นในระบบ อันเป็นผลกระทบต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

4. แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ

แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในลักษณะที่กล่าวแล้วข้างต้น อาจเกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำได้ เช่นกัน แรงดันดังกล่าวนี้ อาจจะมีค่าไม่สูงเหมือนเช่นที่เกิดในระบบส่งกำลังแรงสูง แต่ก็มีค่าสูงพอที่จะให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในบ้าน ภายในอาคารสำนักงาน หรือโรงงานเพราะอุปกรณ์แรงต่ำเหล่านี้ การฉนวนมีค่าต่ำ ไม่อาจจะทนแรงดันเกินที่มีค่าเป็นสิบล ุ่ กิโลโวลต์ได้และถ้ายังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

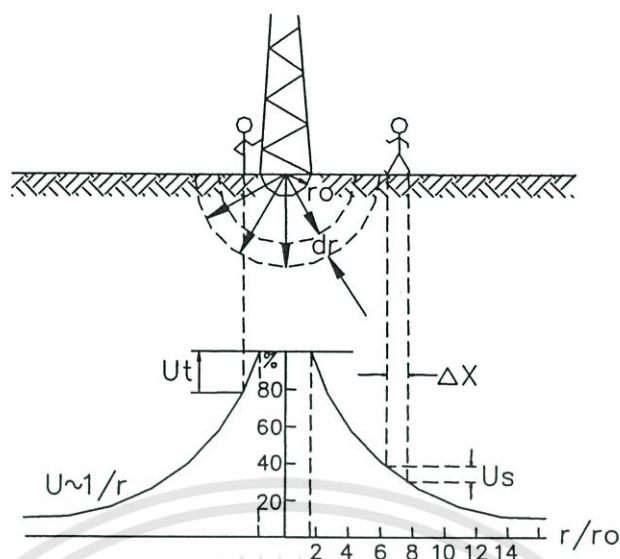
คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ยังมีความไวต่อแรงดันเกินเป็นอย่างยิ่งย่อมก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เหล่านี้ได้ง่าย

5. อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คนโดยตรง

โดยธรรมชาติแล้ว ฟ้าจะผ่าลงสิ่งที่อยู่สูงเด่นกว่าสิ่งอื่น เช่น สิ่งก่อสร้างหรืออาคารสูง ต้นไม้สูงเด่น หรือแม้แต่กระท่อมปลายนาที่ไม่มีต้นไม้ หรือสิ่งอื่นในบริเวณใกล้เคียงที่สูงกว่า หรือคนที่ยืนในที่โล่งแจ้ง อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแก่คนที่อยู่นอกอาคารบ้านเรือนนั้น มีโอกาสเป็นไปได้ถ้าหากไปยืนเด่นในที่กลางแจ้ง เช่น ท้องทุ่งนา สนาม บริเวณกว้างปราศจากต้นไม้ ในแม่น้ำกว้างใหญ่ ในทะเล หรืออยู่ในเส้นทางผ่านของกระแสฟ้าผ่าได้สะดวก เช่น ยืนพิงต้นไม้สูงเด่นที่ถูกฟ้าผ่า หรือหลบฝนอยู่โคนต้นไม้สูงเด่น หรือต้นเดี๋ยวกกลางทุ่งนา ซึ่งมักจะถูกฟ้าผ่าได้ง่าย เกิดอันตรายแก่คนที่หลบใกล้โคนต้นไม้ ทั้งนี้เนื่องจากฟ้าผ่าลงต้นไม้ กระแสฟ้าผ่าไหลลงมาตามต้นไม้ลงสู่ดินนั้น ทำให้ต้นไม้มีศักย์ไฟฟ้าสูงมากพอ จึงเกิดสปาร์กผ่านอากาศเข้าหาคนได้

6. อันตรายจากแรงดันช่วงกาวและแรงดันสัมผัส

ผลของฟ้าผ่าที่มีอันตรายต่อคนและสัตว์ นอกเหนือจากถูกฟ้าผ่าโดยตรงแล้ว ในทางอ้อมยังอาจได้รับอันตรายจาก แรงดันช่วงกาว และแรงดันสัมผัส อันเป็นผลมาจากกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่พื้นดิน ซึ่งมีความต้านทาน การออกแบบระบบบรากสายดินที่ดีและถูกต้อง จะต้องคำนึงถึงการป้องกันอันตรายแรงดันช่วงกาว และแรงดันสัมผัสสองประการนี้แก่คนและสัตว์เมื่อมีกระแสไหลลงสู่ดิน แม้กระจายออกไปในดิน ซึ่งมีความต้านทาน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างสองจุดบนพื้นดิน โดยที่สองจุดนั้นมีระยะห่างเท่ากับช่วงกาวของคน เกิดความต่างศักย์ ระหว่างเท้าซ้ายกับเท้าขวาในขณะที่ก้าวเดิน กรณีคนจะคิดเท่ากับ 1 เมตร หรือระหว่างเท้าหน้ากับเท้าหลังของสัตว์ เรียกว่า แรงดันช่วงกาว ส่วนแรงดันสัมผัส หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ หรือ โครงสร้างที่กระแสไหลผ่านลงไปสู่บรากสายดิน ที่คนมีโอกาสสัมผัสถึงกับดินที่ยืนอยู่ ดังรูปที่ 2.33 แรงดันช่วงกาวและแรงดันสัมผัสจะเป็นอันตรายแก่คนและสัตว์หรือไม่ ก็ขึ้นอยู่กับแรงดันช่วงกาวหรือแรงดันสัมผัสนั้น ทำให้กระแสไหลผ่านร่างกายเกินขีดกระแสอันตรายหรือไม่



รูปที่ 2.33 แสดงแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว

2.6.2 การป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบสายส่ง [7]

การเกิดฟ้าผ่าทำให้เกิดแรงดันเกินที่มีผลกระทบที่ทำให้การฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบเสียหายได้ ฟ้าผ่าถือเป็นต้นกำเนิดเสร็จที่มาจากภายนอกระบบ การป้องกันฟ้าผ่าเบื้องต้นก็คือกันมิให้เข้ามาในระบบก่อนที่จะเข้ามาถึงสถานีหรืออุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน และขั้นที่สองเมื่อเข้ามาแล้วก็ใช้วิธีลดผลกระทบ หรือจำกัดขนาดแรงดันเกินฟ้าผ่าให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่ออุปกรณ์และระบบไฟฟ้า

2.6.2.1 การป้องกันฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยสายดิน

การป้องกันฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยตรงนั้น โดยทั่วไปจะใช้สายดินซึ่งในอากาศเหนือสายส่งกำลังตามแนวความยาวของสายส่ง สายดินจะต้องดินอย่างดี เช่น ต่อเข้ากับโครงเสาโลหะ หรือมีสายนำลงดิน เป็นสายล่อฟ้านั่นเอง โดยติดตั้งให้เป็นแนวเด่นที่จะรับหรือล่อฟ้าผ่าได้ง่ายกว่าที่จะลงสายเฟส คือ ทำหน้าที่เป็นชิลด์ให้กับสายส่งกำลัง และจะช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสอีกด้วย ในทางปฏิบัติการป้องกันด้วยสายดินให้ได้ผลจะต้องให้มุมป้องกันมีมุมแคบๆ เช่น ใช้มุม 30 องศาจากแนวตั้งสำหรับเสาไฟฟ้าสูงไม่เกิน 30 เมตร ในกรณีที่โครงสร้างเสากว้าง หรือชิงสายเรียงกันในแนวระดับจะต้องใช้สายดินสองเส้นเป็นสายล่อฟ้า

ในกรณีของสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งเป็นที่ตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆก็ควรจะต้องมีการป้องกันฟ้าผ่าโดยตรงโดยอาศัยสายดิน และเสาล่อฟ้าทำนองเดียวกับการป้องกันฟ้าผ่าลงบนสายเฟสของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากสถานีไฟฟ้าย่อยมีพื้นที่กว้างขวาง การป้องกันด้วยสายดินจะได้ผลโดยชิงตาข่ายเหนือสถานีไฟฟ้า และต่อลงดินอย่างดี

อย่างไรก็ดีการป้องกันด้วยสายดินบางครั้งก็มีโอกาสล้มเหลวได้ และแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากการทำงานของสวิตช์เปิดวงจร ก็สามารถทำลายการฉนวนของอุปกรณ์ได้ ซึ่งสายดินดังกล่าวไม่อาจป้องกันได้ จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ขึ้นมาป้องกันแรงดันเกิน ได้แก่ ตัวสะกดเสิร์จ (surge suppressors) ตัวเบี่ยงเบนเสิร์จ (surge diverters) และกับดักเสิร์จ (surge arrester) โดยการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเหล่านี้ขนานเข้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการรับการป้องกันให้ได้ใกล้ที่สุด อุปกรณ์ป้องกันเหล่านี้ต่ออยู่อย่างถาวรก็ได้ วัตถุประสงค์ก็คือ ต้องมั่นใจว่าไม่ว่ากรณีใดๆ แรงดันที่คร่อมอุปกรณ์รับการป้องกันจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนด ถึงแม้ว่าจะมีแรงดันเกินเกิดขึ้น ซึ่งจำกัดได้ด้วยอุปกรณ์ป้องกันด้วยการสะกด เบี่ยง หรือดักไว้ ลักษณะสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันก็คือ จะต้องไม่มีกระแสไหลผ่านที่แรงดันใช้งานปกติ ต้องเกิดสปาร์กหรือเบรกควาน์ผ่านได้อย่างรวดเร็วที่สุดเมื่อมีแรงดันเสิร์จวิ่งมาถึงจะต้องสามารถตัดกระแสไหลตาม (follow current) ได้หลังจากเกิดสปาร์กผ่านแล้ว การเกิดสปาร์กหรือเบรกควาน์จะมีลักษณะสมบัติเป็นไปตามหลักการเส้นแรงดันเวลา ซึ่งควรจะต้องอยู่ต่ำกว่าระดับ BIL อุปกรณ์ป้องกันที่นิยมใช้สำหรับป้องกันแรงดันเกินในเชิงปฏิบัติควรมีค่าไวในที่นี้คือ ร็อดแกป (rod gap) และกับดักฟ้าผ่า

2.6.2.2 การป้องกันแรงดันเกินด้วยร็อดแกป

ร็อดแกปเป็นอุปกรณ์ที่ง่าย และราคาประหยัดสำหรับป้องกันแรงดันเกิน โดยตั้งระยะแกปให้เกิดเบรกควาน์ที่ระดับแรงดันต่ำกว่าแรงดันคงทนอยู่ได้ของอุปกรณ์ ที่รับการป้องกันไม่เกิน 30% มีข้อเสียก็คือร็อดแกปไม่สามารถดับอาร์กตาม (follow arc) ความถี่พลังงานได้ จะทำให้เกิดการลัดวงจร ระบบป้องกันกระแสเกิน (ซึ่งมีเซอร์กิตเบรกเกอร์รวมอยู่ด้วย) จะทำงาน คือ ตัดวงจร ทำให้เกิดการลัดวงจร ระบบป้องกันกระแสเกิน (ซึ่งมีเซอร์กิตเบรกเกอร์รวมอยู่ด้วย) จะทำงาน คือ ตัดวงจร ทำให้การจ่ายกระแสไฟฟ้าหยุดชะงักเกิดไฟฟ้าดับนั่นเอง การแก้ปัญหาโดยวิธีที่ไม่แพงนักก็คือ การใช้แกป ดับอาร์กเองได้ เช่น ใช้แกปเขา (horn) หรือ แกปวงแหวนอาร์ก (arcing ring) ติดตั้งที่ส่วนบนและส่วนล่างของพวงลูกถ้วย เมื่อเกิดเบรกควาน์ระหว่างแหวนอาร์ก ถ้าอาร์กจะร้อนจึงลอยตัวขึ้นทำให้ถ้าอาร์กยี่ดออก และอาร์กดับได้ อย่างไรก็ตามยังมีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่เหมาะสมกว่า สามารถจำกัดแรงดันได้ โดยไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดหรือเกิดอาร์กขึ้นได้ นั่นคือ กับดักเสิร์จนั่นเอง ซึ่งมี คุณสมบัติในการป้องกันแรงดันเกินได้ดีกว่าร็อดแกป

2.6.2.3 การป้องกันแรงดันเกินด้วยกับดักเสิร์จ

กับดักเสิร์จหรือกับดักฟ้าผ่า (lightning arrester) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินได้ทั้งที่เป็นเสิร์จสวิตซ์ และแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า มีราคาสูงกว่าร็อดแกปมาก ใช้สำหรับป้องกันอุปกรณ์สำคัญและราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า รีแอกเตอร์ หรืออุปกรณ์ทั้งหลายในสถานีไฟฟ้าย่อยกับดักเสิร์จจะต่อคร่อมอุปกรณ์ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันแรงดันเกิน คือ ต่ออยู่ระหว่างเฟสกับดิน กัปดักเสิร์จจะประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear resistors) โดยทั่วไปทำด้วย SIC และ ZnO มีลักษณะเป็นแผ่นกลมทรงกระบอก ประกอบบรรจุอยู่ในกระบอกปอร์ซเลน ถ้าเป็นชนิด SIC จะมีสปาร์กแกปต่ออนุกรมกับความต้านทาน สปาร์กแกปเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันพิคคักของกัปดักเสิร์จ ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันมิให้กระแสไหลผ่านลงดินในขณะที่ใช้งานกับแรงดันปกติ อันเป็นเงื่อนไขของคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน เมื่อได้รับแรงดันเกินเสิร์จ สปาร์กแกปจะทนต่อแรงดันเกินไม่ได้จะเกิดเบรกควาน์ผ่านแกปโดยเร็วที่สุด แรงดันที่กัปดักเสิร์จเกิดเบรกควาน์ เรียกว่า แรงดันสปาร์กผ่าน (sparkover voltage) U และแรงดันที่เหลือคร่อมความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกัปดักเสิร์จ จะเรียกว่าแรงดันเหลือค้าง (residual voltage) ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนอยู่ได้ของการฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบเมื่อเกิดเบรกควาน์ที่สปาร์กแกปก็เท่ากับเกิดลัดวงจรผ่านความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น กระแสเสิร์จจะไหลผ่านลงดินหายไปในช่วงระยะเวลาอันสั้น และกระแสความถี่พลังงาน (50 Hz) จะไหลตามต่อไปเรียกว่ากระแสไหลตาม (follow current) กระแสไหลตามนี้จะมีค่าน้อยกว่ากระแสเสิร์จมาก ความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับสปาร์กแกปจะมีค่าสูงขึ้น กระแสไหลตามจะลดน้อยลง ทำให้สปาร์กแกปตัดกระแสไหลตามเมื่อผ่านศูนย์ได้เมื่อแรงดันเสิร์จถูกจำกัดด้วยกัปดัก กระแสเสิร์จและกระแสไหลตามสิ้นสุดลง กัปดักก็จะกลับคืนสู่สภาพปกติ เป็นฉนวนรับแรงดันใช้งานของระบบต่อไป แต่ถ้าแรงดันพื้นตัวคร่อมกัปดักเสิร์จเกินค่าพิคคักก็อาจจะทำให้เกิดสปาร์กเข้าได้ เป็นอันตรายต่อกัปดักเสิร์จ

2.7 อัตราการเกิดวาวไฟตามผิว (Flashover Rate) [8]

การคำนวณอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวจะขึ้นกับรูปแบบการจัดวางสาย แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. ระบบที่ไม่มีสายดินขึงในอากาศ

อัตราการเกิดวาวไฟตามผิวของระบบที่ไม่มีสายดินขึงในอากาศ ได้จากผลรวมของสองส่วนคือ อัตราการเกิดวาวไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟสโดยตรง (Direct Lightning Failure Flashover Rate, DLFFOR) และอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเนื่องจากฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่ง (Indirect Lightning Failure Flashover Rate, ILFFOR)

$$FOR = DLFFOR + ILFFOR \quad (2.53)$$

2. ระบบที่มีสายดินซึ่งในอากาศ

อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่มีสายดินซึ่งในอากาศ ได้จากผลรวมของสามส่วน คือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายดินซึ่งในอากาศทำให้เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate, BFOR), อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟสซึ่งเกิดจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (Shielding Failure Flashover Rate, SFFOR), อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเนื่องจากฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่ง (Indirect Lightning Failure Flashover Rate, ILFFOR)

$$FOR = BFOR + SFFOR + ILFFOR \quad (2.54)$$

2.7.1 อัตราการวาบไฟตามผิวเนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำ (Indirect Lightning Failure Flashover Rate, ILFFOR) [4]

ฟ้าผ่าลงพื้นดินบริเวณข้างเคียงมักสร้างปัญหาให้กับระบบที่ฉนวนมีค่า CFO ต่ำกว่า 300 kV ซึ่งส่วนใหญ่เป็นระบบจำหน่าย ส่วนระบบสายส่งจะได้รับผลกระทบน้อยมากเนื่องจากฉนวนมีค่า CFO สูงกว่า 300 kV โดยถ้าฟ้าผ่าที่ผ่าลงบนพื้นดินหรือบนวัตถุใดๆ ที่อยู่ใกล้เคียงกับระบบจำหน่ายจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในสายเฟสหรือสายล่อฟ้า ซึ่งหากความคงทนของฉนวนมีค่าต่ำหรือระบบจำหน่ายไม่มีการติดตั้งสายล่อฟ้า อาจทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) ขึ้นได้

พิจารณารูปที่ 2.34 ที่ระยะถัดจาก x เท่ากับ D_g ถ้าฟ้าผ่าจะลงสู่พื้นดิน ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำไปยังสายตัวนำ Rusck ได้สร้างสูตรคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดในระบบจำหน่ายเนื่องจากฟ้าผ่า ดังสมการที่ 2.55

$$V_{MAX} = 30 \frac{I \cdot h}{x} \left[1 + \frac{\beta}{\sqrt{2 - \beta^2}} \right] \quad (2.55)$$

เมื่อ	I	คือ ขนาดสูงสุดของกระแสฟ้าผ่า (kA)
	h	คือ ความสูงของสายตัวนำเหนือพื้นดิน (เมตร)
	x	คือ ระยะห่างจากตำแหน่งฟ้าผ่าไปยังสายตัวนำ (เมตร)
	β	คือ ความเร็วของคลื่นฟ้าผ่าต่อหน่วยความเร็วของแสง

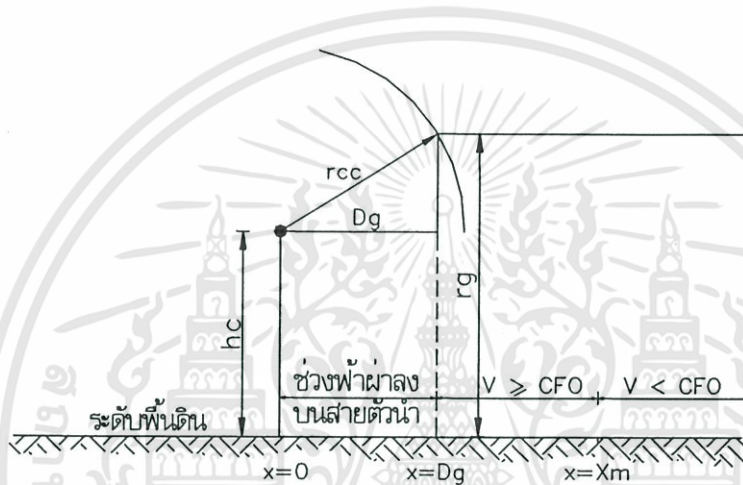
กำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_\beta = \left[1 + \frac{\beta}{\sqrt{2 - \beta^2}} \right] \quad (2.56)$$

ค่าของ β จะขึ้นอยู่กับขนาดกระแสฟ้าผ่าซึ่งมีค่าประมาณตามสมการที่ 2.57 หรือสามารถใช้ค่าเฉลี่ยเป็น 0.3

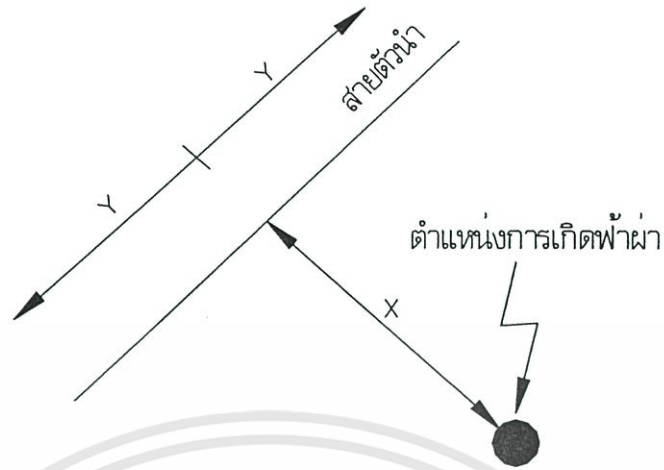
$$\beta = \left(\frac{0.486}{1 + \frac{27.3}{I}} \right) \quad (2.57)$$



รูปที่ 2.34 แสดงระยะตำแหน่งฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายตัวนำ

แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ระยะสั้นที่สุดจากตำแหน่งฟ้าผ่าถึงสายตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.35 และจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่างๆ บนสายตัวนำ ซึ่งเวลาช่วงหนัาค่ดสั้นจะอยู่ในช่วง 1-3 ไมโครวินาที ระยะที่ถัดจาก X_m เป็นตำแหน่งที่แรงดันเหนี่ยวนำในสายตัวนำมีค่าน้อยกว่าความคงทนของฉนวน (CFO) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$X_m = \left(\frac{30 \cdot I \cdot h \cdot k_\beta}{CFO} \right) \quad (2.58)$$



รูปที่ 2.35 แสดงระยะจากตำแหน่งฟ้าผ่าที่แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุด

ดังนั้นอัตราการวับไฟตามผิวเนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำ (Induced Voltage Flashover Rate) มีค่าเป็น

$$IVFOR = 2 N_g L (X_m - D_g) P(I) \quad (2.59)$$

เมื่อ N_g คือ ความหนาแน่นของฟ้าผ่า (จำนวนครั้ง/ตร.กม./ปี)
 L คือ ความยาวของระบบสายจำหน่าย (กิโลเมตร)
 X_m คือ ระยะที่ฟ้าผ่าลงสายดินทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่ามากกว่า CFO

อัตราการวับไฟตามผิวเนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำ (IVFOR) จะขึ้นอยู่กับผลของการติดตั้งสายล่อฟ้า ซึ่งจากสมการที่ 2.59 เป็นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนสายตัวนำเส้นเดี่ยว (Single wire) เหนือพื้นดิน สำหรับสายตัวนำที่มีสายชิลด์ต่อลงกราวด์หรือสายล่อฟ้า จะช่วยลดขนาดแรงดันเหนี่ยวนำที่สายเฟสให้น้อยลง ดังนี้

$$V_p = V_{\max} \left[1 - \left(\frac{Z_m}{Z_g + 2R_g} \right) \left(\frac{h_g}{h_p} \right) \right] \quad (2.60)$$

$$V_g = V_{\max} \left(\frac{2R_g}{Z_g + 2R_g} \right) \left(\frac{h_g}{h_p} \right) \quad (2.61)$$

เมื่อ V_p คือ แรงดันเหนี่ยวนำบนสายเฟส

V_g คือ แรงดันเหนี่ยวนำบนสายล่อฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z_m	คือ มีวหวลเสิร์จอิมพีแดนซ์
Z_g	คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้า
R_g	คือ ความต้านทานรากสายดิน
h_g	คือ ความสูงของสายกราวด์เหนือพื้นดิน
h_p	คือ ความสูงของสายเฟสเหนือพื้นดิน

แรงดันตกคร่อมฉนวนถูกด้วยสามารถหาได้จาก

$$V_{p-g} = V_p - V_g \quad (2.62)$$

แทนค่า V_p และ V_g จากสมการที่ 2.60 และ 2.61 จะได้

$$V_{p-g} = V_{\max} \left[1 - \left(\frac{Z_m}{Z_g + 2R_g} \right) \left(\frac{h_g}{h_p} \right) - \left(\frac{2R_g}{2R_g + Z_g} \right) \left(\frac{h_g}{h_p} \right) \right] \quad (2.63)$$

$$= V_{\max} \left[1 - \left(\frac{Z_m}{Z_g + 2R_g} \right) + \left(\frac{2R_g}{2R_g + Z_g} \right) \left(\frac{h_g}{h_p} \right) \right] \quad (2.64)$$

$$= V_{\max} \left[1 - \left(\frac{Z_m + 2R_g}{Z_g + 2R_g} \right) \left(\frac{h_g}{h_p} \right) \right] \quad (2.65)$$

และระยะ X_m จากภาพที่ 2.35 จะได้เป็น

$$X_m = \left(\frac{30 \cdot I \cdot h \cdot k_\beta}{CFO} \right) \left[1 - \left(\frac{Z_m + 2R}{Z_g + 2R} \right) \left(\frac{h_g}{h_p} \right) \right] \quad (2.66)$$

2.7.2 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (Shielding Failure Flashover Rate, SFFOR)

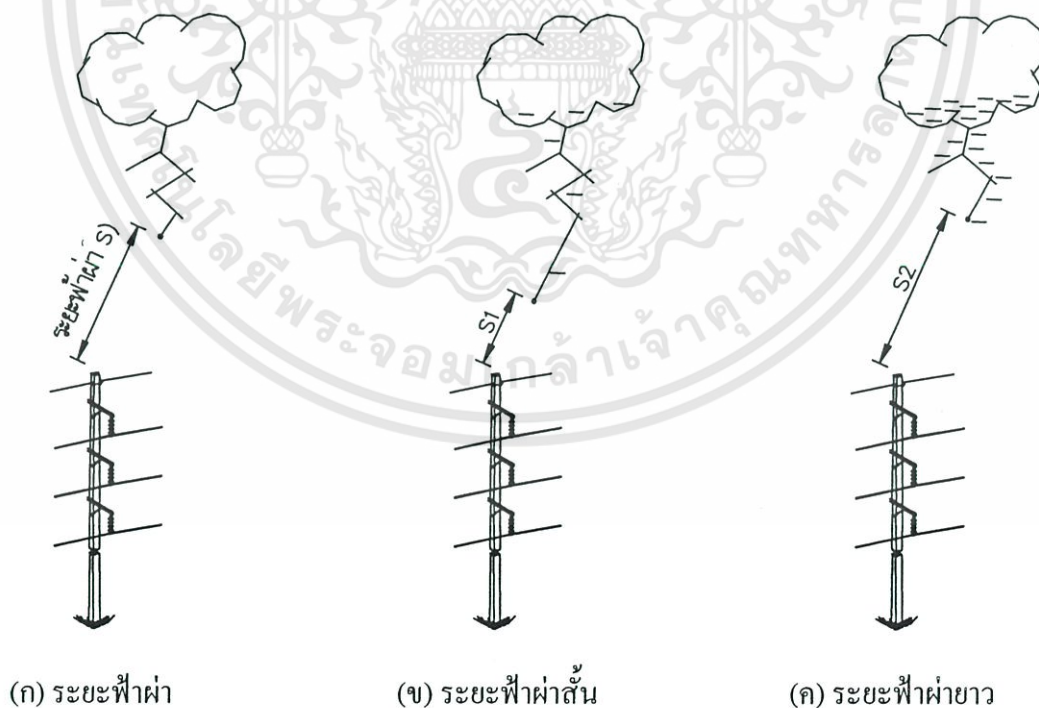
การป้องกันฟ้าผ่าลงสายเฟสของระบบสายส่ง หรือสายจำหน่าย พิจารณาจากการป้องกันด้วยสายดินเพื่อให้ฟ้าผ่าลงที่สายดินแทนที่จะลงที่สายเฟส ดังนั้นถ้าติดตั้งสายดินให้เหมาะสม โดยมีมุมป้องกันที่ดี ฟ้าผ่าก็จะลงที่สายดิน แต่ถ้ามุมป้องกันไม่เหมาะสม โอกาสที่ฟ้าผ่าลงที่สายเฟสก็มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้น หลักเกณฑ์ที่จะพิจารณาว่าฟ้าผ่าจะผ่าลงสายเฟสหรือไม่ พิจารณาได้จากระยะฟ้าผ่า (Striking Distance) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดกระแสฟ้าผ่า

2.7.2.1 ระยะฟ้าผ่า

ระยะฟ้าผ่า (Striking Distance) [9] หมายถึง ระยะทางระหว่างลำฟ้าผ้านำทาง และจุดที่ภาคพื้นดินหรือวัตถุอื่นๆเริ่มเกิดดิสชาร์จ ดังแสดงในรูปที่ 2.36 ระยะดังกล่าวขึ้นอยู่กับประจุบนก้อนเมฆหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือขึ้นอยู่กับกระแสฟ้าผ่า รูปที่ 2.36(ก) แสดงระยะฟ้าผ่าซึ่งเป็นระยะระหว่างลำฟ้าผ้านำทางและเสาส่ง เมื่อเริ่มเกิดดิสชาร์จที่หัวเสา ทำให้ทราบว่าฟ้าผ่าจะลงที่ใด ปกติฟ้าผ่าจะลงมาจากก้อนเมฆยังไม่ทราบว่าจะลงที่จุดใดที่พื้นแต่จะเกิดดิสชาร์จและเคลื่อนที่ลงมาตามทางเรื่อยๆจนกระทั่งเมื่อลำฟ้าผ้านำทางใกล้พื้นดินและถ้าเริ่มเกิดดิสชาร์จที่ภาคพื้นดินเนื่องจากสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดอื่น จึงจะทราบว่าฟ้าผ่าจะลงที่จุดใด รูปที่ 2.36(ข) แสดงระยะฟ้าผ่าสั้นเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆมีน้อย ดังนั้นลำฟ้าผ้านำทางเคลื่อนตัวลงมาเกือบถึงภาคพื้นดินจึงเริ่มเกิดดิสชาร์จที่หัวเสา ระยะ S_1 ในรูปมีค่าน้อยเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆมีค่าน้อยหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ กระแสฟ้าผ่ามีค่าน้อย รูปที่ 2.36(ค) ระยะฟ้าผ่ามากเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆมีมากทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่ภาคพื้นดินเกิดดิสชาร์จได้ง่ายกว่า เมื่อนำฟ้าผ้านำทางเคลื่อนตัวลงมาจึงเหลือระยะทาง S_2 อีกมากกว่าจะถึงพื้นดิน



รูปที่ 2.36 ระยะฟ้าผ่าในกรณีต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะฟ้าผ่าโดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 20-200 เมตร ขึ้นอยู่กับขนาดกระแสฟ้าผ่า มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 2.67

$$S = A x I^b \quad (2.67)$$

เมื่อ I คือ กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)

S คือ ระยะฟ้าผ่า (เมตร)

A, b คือ ค่าคงที่ได้จากการทดสอบหรือการทดลองภาคสนาม

ของนักวิจัยหลายท่าน สรุปได้ดังตารางที่ 2.1[4]

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ A และ b สำหรับคำนวณระยะฟ้าผ่า

ที่มา	Sg หรือ r g ฟ้าผ่าลงสู่ดินหรือพื้นโลก		Sc หรือ rc ฟ้าผ่าลงสายเฟสและสายดินป้องกัน	
	A	b	A	b
Wagner	14.2	0.42	14.2	0.42
Young	27.0	0.32	x. rg ⁽¹⁾	0.32
Armstrong and Whitehead	6.0	0.80	6.7	0.80
Brown and Whitehead	6.4	0.75	7.1	0.75
Love	10.0	0.65	10.0	0.65
Mousa	8.0	0.65	8.0	0.65

(1), $x = 444 / (462-h)$ สำหรับสายเฟสสูง $h > 18$ เมตร, $x = 1$ สำหรับสายเฟสสูง $h < 18$ เมตร

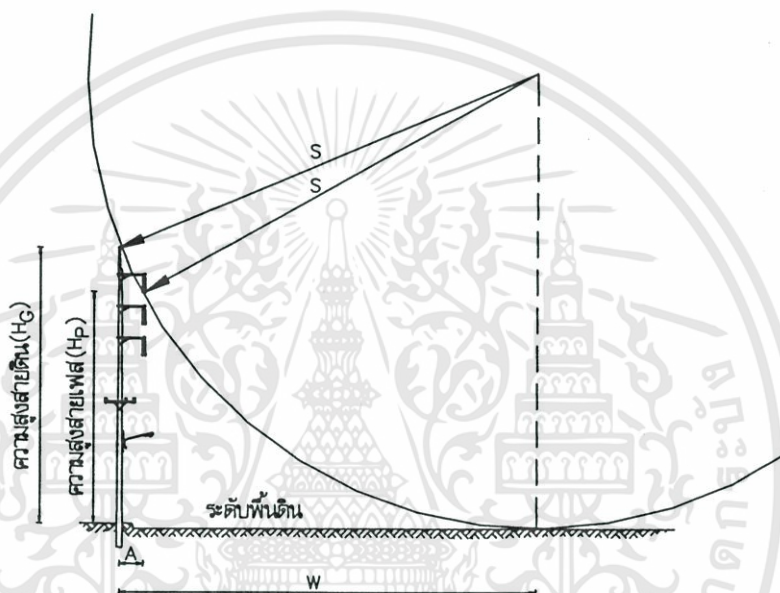
2.7.2.2 การป้องกันสายเฟสอย่างมีประสิทธิภาพ (Effective Shielding) [10]

การพิจารณาว่าสายดินป้องกันสามารถสามารถรับฟ้าผ่าได้หรือไม่นั้น อาจพิจารณาจากรูปแบบการติดตั้งสายดินป้องกันและสายเฟส สัมพันธ์กับระยะฟ้าผ่า (Striking Distance) ดังแสดงในรูปที่ 2.37 รูปวงกลมในรูปจะมีรัศมีเท่ากับระยะฟ้าผ่า ถ้ากระแสฟ้าผ่ามีค่าสูง ระยะฟ้าผ่าก็จะมีค่ามาก ดังนั้นเมื่อเขียนวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะฟ้าผ่าให้วงกลมสัมผัสกับดินและผ่านสายดิน ถ้าสายเฟสอยู่นอกวงกลมแสดงว่าไม่ถูกฟ้าผ่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าสายดินสามารถป้องกันไม่ให้ฟ้าผ่าลงสายเฟสได้ ถ้ากระแสฟ้าผ่ามีค่าต่ำ ระยะฟ้าผ่าก็มีค่าน้อย ขนาดรัศมีวงกลมก็มีค่าน้อย ทำให้โอกาสที่สายเฟสอยู่ในวงกลมมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก นั่นคือ แม้มีสายดินอยู่ด้านบนแล้วยังมีโอกาสที่จะเกิดฟ้าผ่าด้วยกระแสที่พิจารณาลงสายเฟสได้

กระแสฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าวิกฤต (V_{CFO}) ที่จะทำให้อนวนเกิดควาบไฟที่ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบนั้น เรียกว่า “กระแสฟ้าผ่าวิกฤต (I_0)” ในการวิเคราะห์หาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 2.70 คำนวณหาระสีวงกลมที่สัมผัสดิน และผ่านทั้งสายเฟสและสายดินดังแสดงในรูป 2.37 และหากระแสฟ้าผ่าที่มีระยะฟ้าผ่าดังกล่าวได้ตามสมการที่ 2.67



รูปที่ 2.37 การพิจารณาระยะฟ้าผ่าจากรูปแบบการติดตั้งสายดินและสายเฟสโดยให้วงกลมผ่านสายเฟส สายดิน และสัมผัสพื้นดิน

- เมื่อ S คือ ระยะฟ้าผ่าที่น้อยที่สุดที่ฟ้าจะผ่าลงสายดินแทนสายเฟส
 H_G คือ ความสูงของสายดิน
 H_P คือ ความสูงของสายเฟส
 A คือ ระยะห่างระหว่างสายดินกับสายเฟสตามแนวระดับ

$$W = \frac{H_G A + \sqrt{H_G H_P [A^2 + (H_G - H_P)^2]}}{H_G - H_P} \quad (2.69)$$

$$S = \frac{1}{2} \left[H_G + H_P + \frac{A(2W - A)}{H_G - H_P} \right] \quad (2.70)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

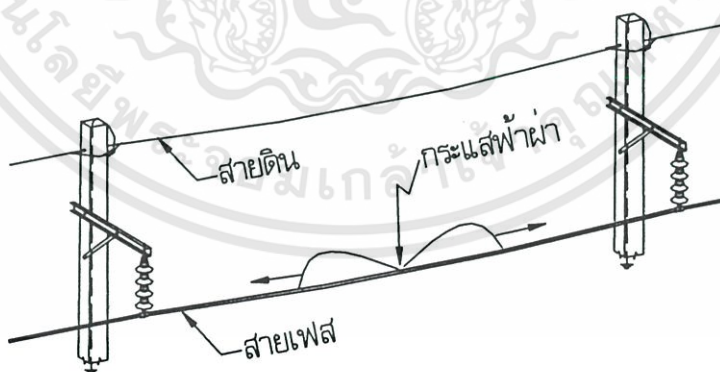
ระยะฟ้าผ่าที่ได้จากสมการ 2.70 สามารถนำมาหาค่ากระแสฟ้าผ่าที่ต่ำที่สุดที่สายดินสามารถป้องกันสายเฟสได้โดยการแทนค่าลงในสมการที่ 2.67

สำหรับการพิจารณาว่าสายดิน และสายเฟสที่ติดตั้งในรูปแบบดังกล่าวนี้สามารถป้องกันฟ้าผ่าได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ พิจารณาจากค่ากระแสฟ้าผ่าที่ได้จากสมการที่ 2.67 เปรียบเทียบกับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้เกิดควาไฟฟ้าย้อนกลับที่ฉนวน (I_o) ดังแสดงในรูปที่ 2.38 ที่มีฟ้าผ่าลงสายด้วยขนาด I_o และมีกระแสไหลไปแต่ละข้าง $I_o/2$ จะเกิดแรงดันบนสาย ซึ่งหาจากสมการที่ 2.71

$$I_o = \frac{2xV_{CFO}}{Z_o} \quad (2.71)$$

เมื่อ V_{CFO} คือ แรงดันไฟฟ้าวิกฤต (Critical Flashover Voltage, kV)
 Z_o คือ เสรีจิมพีแดนซ์ของสาย (โอห์ม)

จากสมการที่ 2.71 ค่า V_{CFO} หาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤตของฉนวน โดยเปิดตารางของฉนวนที่ใช้ในระบบนั้นว่ามีค่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤตเท่าใด ซึ่งมักให้มาโดยผู้ผลิต หรือเปิดจากมาตรฐานทางด้านไฟฟ้าของฉนวนรูปแบบดังกล่าว เมื่อนำค่า V_{CFO} มาแทนในสมการที่ 2.71 จะได้ค่ากระแสฟ้าผ่าที่ได้ I_o ไปแทนในสมการที่ 2.67 เพื่อหาระยะฟ้าผ่า S เมื่อได้ระยะฟ้าผ่า S แล้วนำไปใช้ดังรูปที่ 2.37 โดยให้จัดวางสายเฟส A, B, C ไม่ล้ำเข้ามาในวงกลมที่เขียนด้วยรัศมี S



รูปที่ 2.38 ฟ้าผ่าลงสายเฟส

เมื่อเทียบค่ากระแสฟ้าผ่าที่ได้จากสมการที่ 2.67 กับกระแสฟ้าผ่าที่ได้จากสมการ 2.71 กระแส I เป็นกระแสฟ้าผ่าวิกฤตซึ่งกระแสฟ้าผ่าที่สูงกว่าค่าดังกล่าวจะไม่ผ่าลงสายเฟส แต่ถ้ากระแส I ใดๆที่น้อยกว่า I_0 ผ่าเข้าสายเฟสก็จะไม่ทำให้เกิดวาทไฟที่ฉนวนได้

การติดตั้งสายดินอย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยป้องกันไม่ให้ฟ้าผ่าลงสายเฟส หรือ ถ้าวางสายเฟสก็มีแรงดันไม่มากพอที่จะทำให้เกิดวาทไฟที่ฉนวนของระบบได้ การติดตั้งสายดินเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ดังกล่าวต้องทำให้ $I < I_0$ ซึ่งเป็นการป้องกันฟ้าผ่าลงสายเฟสอย่างมีประสิทธิภาพ

2.7.2.3 ดัชนีการวัดประสิทธิภาพของระบบที่ใช้สายดินป้องกันสายเฟส

ดัชนีการวัดประสิทธิภาพของระบบที่ใช้สายดินป้องกันสายเฟส คือ อัตราการเกิดวาทไฟแม้มีสายดินป้องกัน (Shielding Flashover Rate : SFO) เป็นจำนวนครั้งต่อ 100 กิโลเมตรต่อปี ดังสมการที่ 2.72 โดยพิจารณารูปที่ 2.37 ประกอบ

$$SFO = N_I \cdot P_I \cdot P_\theta \times 10^{-4} \quad (2.72)$$

เมื่อ N_I คือ จำนวนครั้งของฟ้าผ่าลงระบบ
 P_I คือ ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้ฉนวนเกิดวาทไฟ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์
 P_θ คือ ความน่าจะเป็นที่ฟ้าผ่าลงสายเฟสถึงแม้ว่าจะมีการป้องกันด้วยสายดิน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์

สังเกตสมการที่ 2.72 มีค่า 10^{-4} เพราะ P_I และ P_θ มีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้ฉนวนเกิดวาทไฟ P_I แสดงดังสมการดังนี้

$$\log P_I = 2 - \frac{I_0}{60} \quad , \quad I_0 = \frac{2V_{CFO}}{Z_0} \quad (2.73)$$

เมื่อ P_I คือ ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้ฉนวนเกิดวาทไฟ (%)
 V_{CFO} คือ แรงดันวาทไฟวิกฤตของฉนวนลูกถ้วย (กิโลโวลต์)
 I_0 คือ กระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้เกิดแรงดัน V_{CFO} (กิโลแอมแปร์)

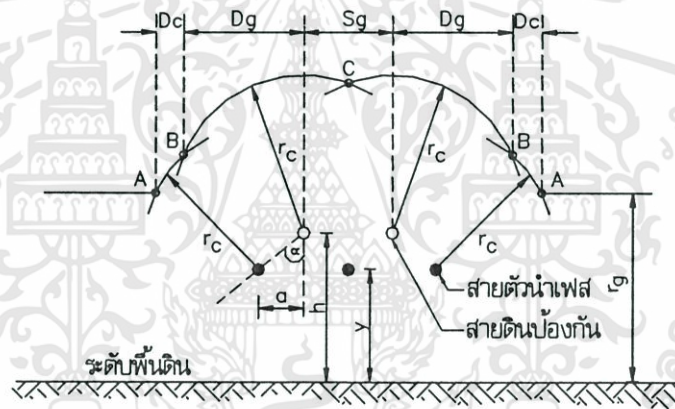
ความน่าจะเป็นที่ฟ้าผ่าลงสายเฟสถึงแม้จะมีการป้องกันด้วยสายดินเนื่องจากมุมป้องกัน θ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\log P_\theta = \frac{\theta_s \sqrt{H_G}}{90} - 2 \quad , \quad \theta_s = \tan^{-1} \frac{A}{H_G - H_p} \quad (2.74)$$

เมื่อค่า A , H_G , H_p เป็นไปตามรูปที่ 2.37 ส่วน θ_s หมายถึง มุมระหว่างเส้นที่ลากผ่านสายเฟส และสายดินเทียบกับแนวดิ่ง ยิ่ง θ_s ยิ่งมากโอกาสที่ฟ้าผ่าจะลงสายเฟสโดยไม่ลงสายดินก็มีมากขึ้น

2.7.2.4 อัตราความล้มเหลวของสายดินป้องกันโดยใช้แบบจำลองทางเรขาคณิต[4]

การหาอัตราความล้มเหลวของสายดินป้องกันสามารถหาโดยใช้แบบจำลองทางเรขาคณิต (Geometric Model) ดังรูปที่ 2.39

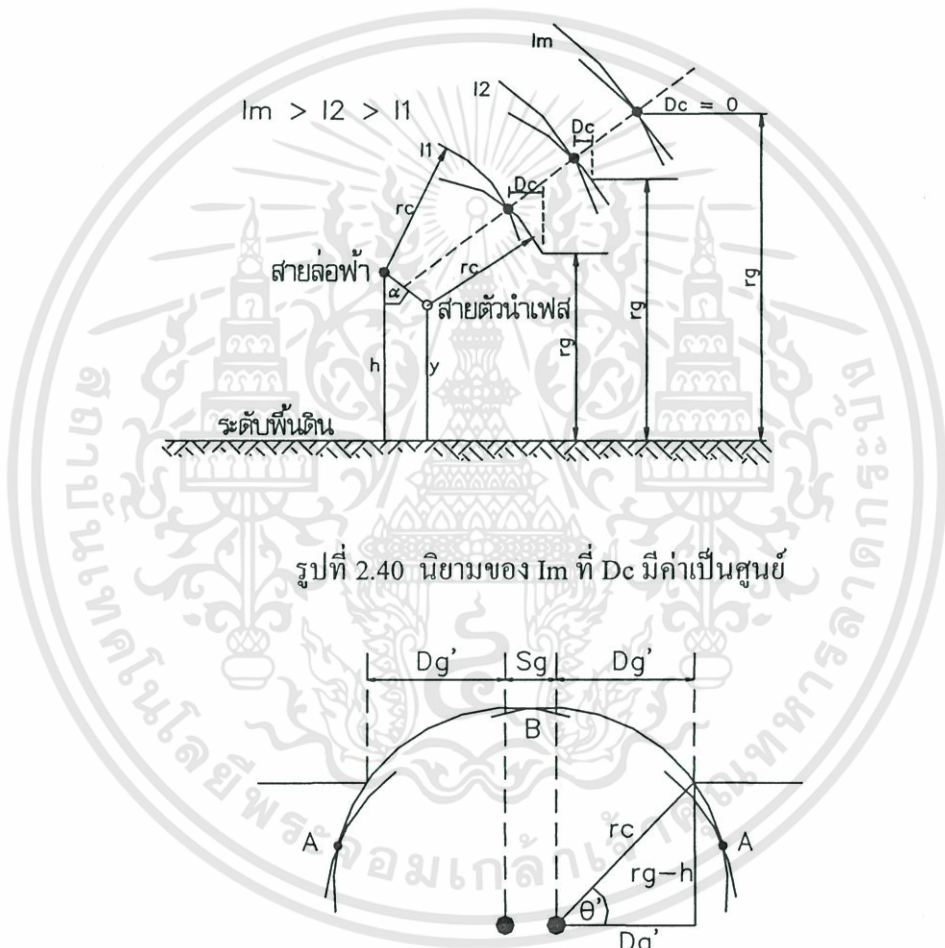


รูปที่ 2.39 แบบจำลองทางเรขาคณิตในการหาความล้มเหลวของสายดินป้องกัน

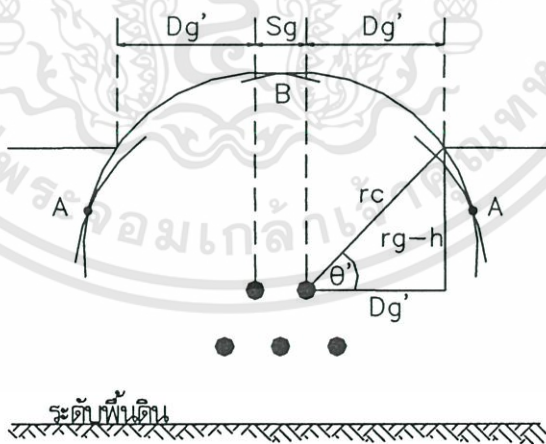
พิจารณารูปที่ 2.39 ที่ค่ากระแสฟ้าผ่าค่าหนึ่ง ส่วนโค้งของวงกลมที่มีรัศมี r_c มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่สายเฟส และสายล่อฟ้า คือระยะฟ้าผ่า (Striking Distance, S) ถ้าฟ้าผ่าลงมาอยู่ในระยะฟ้าผ่าของสายดินป้องกัน (โค้ง BC) ฟ้าผ่าจะผ่าลงที่สายดินป้องกัน และถ้าฟ้าผ่าลงมาอยู่ในระยะฟ้าผ่าของสายเฟส (โค้ง AB) ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายเฟส ซึ่งเป็นกรณีของความล้มเหลวของสายดินป้องกัน แต่ถ้าฟ้าผ่าลงไกลเกินกว่าจุด A ฟ้าผ่าจะผ่าลงสู่ดินหรือพื้นโลก

จากรูปที่ 2.39 ในกรณีฟ้าผ่ามากขึ้นส่วนโค้ง AB จะลดลงนั่นหมายความว่า ความล้มเหลวของสายดินป้องกันจะน้อยลงเมื่อกระแสฟ้าผ่ามีค่าสูงขึ้น ถ้ากำหนดให้ I_m ที่จุด A และ B ทับกันพอดีดังแสดงในรูปที่ 2.40 แสดงว่าสายดินป้องกันจะป้องกันสายเฟสได้อย่างสมบูรณ์ที่กระแสมากกว่า I_m โดยเมื่อกระแสฟ้าผ่ามีค่าสูงกว่า I_m ระยะที่ฟ้าผ่าจะลงสู่

สายดินป้องกัน (Dg) จะกลายเป็น Dg' ในรูปที่ 2.41 ในทางกลับกันถ้าขนาดกระแสฟ้าผ่ามีค่าน้อยลง ระยะส่วนโค้ง AB และความกว้าง Dc จะเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้ากระแสฟ้าผ่ามีค่าต่ำกว่าค่ากระแสวิกฤตของฉนวนลูกถ้วย แรงดันที่คร่อมฉนวนที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าค่าต่ำๆจะไม่ทำให้ฉนวนเกิดวาบไฟ ดังนั้นความล้มเหลวของสายดินป้องกันนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อกระแสฟ้าผ่าอยู่ในช่วง $I_c < I < I_m$ ถ้าสามารถทำให้ $I_m < I_c$ ความล้มเหลวของสายดินป้องกันจะไม่เกิดขึ้น ทำได้โดยการปรับค่ามุมชิลด์ที่เหมาะสม มุมชิลด์ที่เหมาะสมนี้เรียกว่า มุมชิลด์ที่สมบูรณ์ (Perfect shielding angle)



รูปที่ 2.40 นิยามของ I_m ที่ D_c มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 2.41 นิยามของ D_c ที่ $I > I_m$

2.7.3 อัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate, BFR)

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดินที่หัวเสาไฟฟ้าคอนกรีต กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะกระจายลงสู่ดิน และอีกส่วนหนึ่งจะไหลไปตามสายล่อฟ้าไปยังเสาข้างเคียงในลักษณะของคลื่น และเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งทำให้เกิดการหักล้าง หรือเสริมกันกับแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นบนยอดเสา ทำให้เกิดแรงดันในสายดิน (V_p) และเกิดเหนี่ยวนำในสายเฟส (V_p) ซึ่งจะมีค่าประมาณ 20-30 % ของแรงดันเกินในสายดิน ทำให้มีแรงดันคร่อมพวงฉนวนลูกถ้วยเกิดขึ้นตามสมการที่ 2.75 โดยแรงดันคร่อมฉนวนนี้ขึ้นอยู่กับแรงดันเกินในสายดิน ซึ่งมีผลมาจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา และค่ากระแสฟ้าผ่า

$$V_{ins} = V_1 - V_p = (1 - k)V_1 \quad (2.75)$$

เมื่อ V_{ins} คือ แรงดันคร่อมฉนวน (กิโลโวลต์)

ถ้าแรงดันเกินในสายดิน และแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสมีค่าแตกต่างกันมากกว่าค่าความคงทนของฉนวนลูกถ้วยจะทำให้เกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover) ของฉนวนลูกถ้วย และอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดฟ้าผ่าดับต่อมา ซึ่งในทางปฏิบัติแรงดันเกินที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาดับ สำหรับสมการที่ใช้คำนวณหาค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ จะเป็นดังนี้ [4]

$$BFR = N_L * P(I_p) \quad (2.76)$$

เมื่อ BFR คือ อัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)

N_L คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสายดินป้องกัน (ครั้ง/100 กม./ปี)

$P(I_p)$ คือ ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะเท่ากับ หรือมากกว่ากระแสวิกฤตของฉนวนลูกถ้วย (I)

2.7.3.1 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกัน (N_L)

จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกันนั้นสามารถคำนวณได้หลายวิธีจากบทความงานวิจัยต่างประเทศโดยสมการทั้งหมดเป็นสมการที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามทั้งสิ้นสรุปดังนี้

- สมการของ IEEE [11]

$$N_L = Ng \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (2.77)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	N_L	คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกัน (ครั้ง/100 กม./ปี)
	N_g	คือ ความหนาแน่นของฟ้าผ่าลงดิน (ครั้ง/ตร.กม./ปี)
	h	คือ ความสูงของสายดินป้องกัน (เมตร)
	b	คือ ระยะห่างระหว่างสายดินป้องกันแนวราบ (เมตร)

โดยความหนาแน่นของฟ้าผ่าลงดิน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.78

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad (2.78)$$

เมื่อ T_d คือ จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (วัน/ปี)

- สมการของ AIEE [12]

สมการของ AIEE จะให้ค่าที่แม่นยำเมื่อความสูงเสามีค่าเฉลี่ย 30 เมตร เนื่องจากเป็นสมการที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามของประเทศสหรัฐอเมริกาโดยเฉพาะเสาที่มีความสูงเฉลี่ย 30 เมตร

$$N_L = \frac{62}{30} T_d \quad (2.79)$$

เมื่อ N_L คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกัน (ครั้ง/100 กม./ปี)
 T_d คือ จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (วัน/ปี)

- สมการของ รัสเซีย (Burgsdorf) [12]

สมการของ Burgsdorf จะให้ค่าที่แม่นยำเมื่อเสามีความสูง 25-30 เมตร เนื่องจากเป็นสมการที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามของประเทศรัสเซียโดยเฉพาะเสาที่มีความสูงเฉลี่ย 25-30 เมตร

$$N_L = \frac{2.7\bar{h}}{30} T_d \quad (2.80)$$

เมื่อ N_L คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดิน (ครั้ง/100 กม./ปี)
 \bar{h} คือ ความสูงเฉลี่ยของสายดินป้องกัน (เมตร)
 T_d คือ จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (วัน/ปี)

แต่สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะคำนวณจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกัน โดยใช้สถิติฟ้าผ่าดับที่เกิดขึ้นจริงกับระบบสายส่ง กฟน. ตามตารางที่ 2.2 และสมการที่ 2.81 [13] คำนวณจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสายดินป้องกันเพื่อให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในเขตพื้นที่ของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.)

$$Obf = \frac{N_L * Nbf}{100} \quad (2.81)$$

เมื่อ Obf คือ อัตราการเกิดฟ้าดับเนื่องจากการเกิดควาไฟฟ้าตามผิว (ครั้ง/100 กม./ปี)

N_L คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสายดิน (ครั้ง/100 กม./ปี)

Nbf คือ จำนวนครั้งที่เกิดควาไฟฟ้าตามผิวต่อฟ้าผ่าลงสายดิน 100 ครั้ง (กำหนดให้เท่ากับ 70 ครั้ง [14])

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลระบบสายส่งการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) [15] ปี 2550

รายละเอียด	ระบบไฟฟ้า	69 kV	115 kV	230 kV	รวม
ฟ้าดับเนื่องจากฟ้าผ่า (ครั้ง/ปี)		22	-	-	22
ความยาวสายส่ง (กม.)		640	500	26	1166

ดังนั้นจากตารางที่ 2.2 และสมการที่ 2.81 สามารถคำนวณหาจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสายดินในเขตพื้นที่ กฟน. ได้ดังนี้

$$N_L = (22 \times 100) / (6.4 \times 70) = 4.9 \text{ ครั้ง/100 กม./ปี}$$

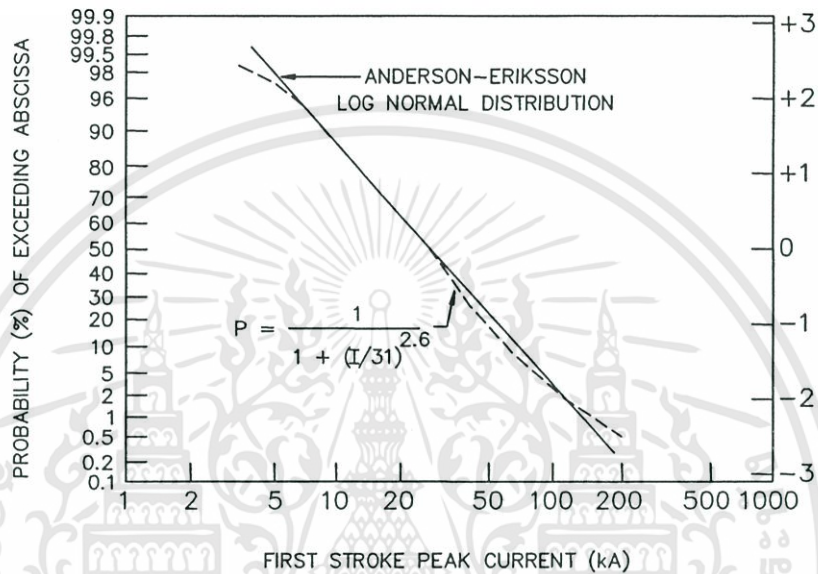
2.7.3.2 ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด

ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด พิจารณาได้จากกราฟความน่าจะเป็นสะสมของกระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในยุโรป และอเมริกา [16] โดยข้อมูลเหล่านี้ได้จากการวัดในภาคสนามโดยนักวิจัยหลายคน ค่าที่ได้จึงแตกต่างกันไปตามพื้นที่และวิธีการตรวจวัด แต่สามารถแสดงในรูปสมการอย่างง่ายของขนาดกระแสฟ้าผ่าเกินกว่ากระแสค่ายอด ได้ดังนี้

$$P(I_p) = \frac{1}{1 + (I / I_{50})^{2.6}} \quad (2.82)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ $P(I_p)$ คือ ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะเท่ากับ หรือมากกว่ากระแส
 ค่ายอด (เปอร์เซ็นต์)
- I คือ กระแสฟ้าผ่าค่ายอด (กิโลแอมแปร์)
- I_{50} คือ กระแสฟ้าผ่าเฉลี่ย = 31 กิโลแอมแปร์ (ยุโรป และอเมริกา)

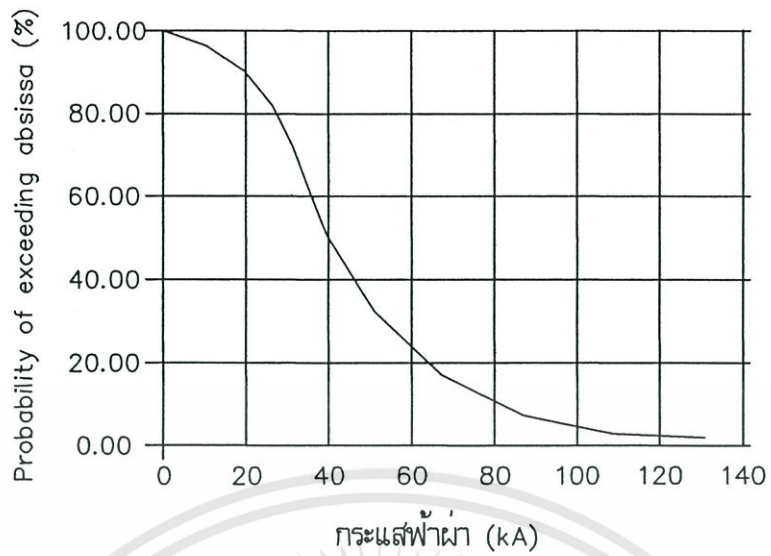


รูปที่ 2.42 โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าเท่ากับ หรือมากกว่ากระแสค่ายอด

สำหรับในประเทศไทยจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการไฟฟ้าผลิต ซึ่งการกระจาย
 สม่ำเสมอของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย เป็นไปตามรูปที่ 2.43 โดยสามารถคำนวณ
 ได้จากสมการที่ 2.83 [17]

$$P(I_p) = \frac{1}{1 + (I/I_{50})^{3.09}} \quad (2.83)$$

- เมื่อ $P(I_p)$ คือ ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะเท่ากับ หรือมากกว่ากระแส
 ค่ายอด (เปอร์เซ็นต์)
- I คือ กระแสฟ้าผ่าค่ายอด (กิโลแอมแปร์)
- I_{50} คือ กระแสฟ้าผ่าเฉลี่ย = 40 กิโลแอมแปร์ (ประเทศไทย) [18]



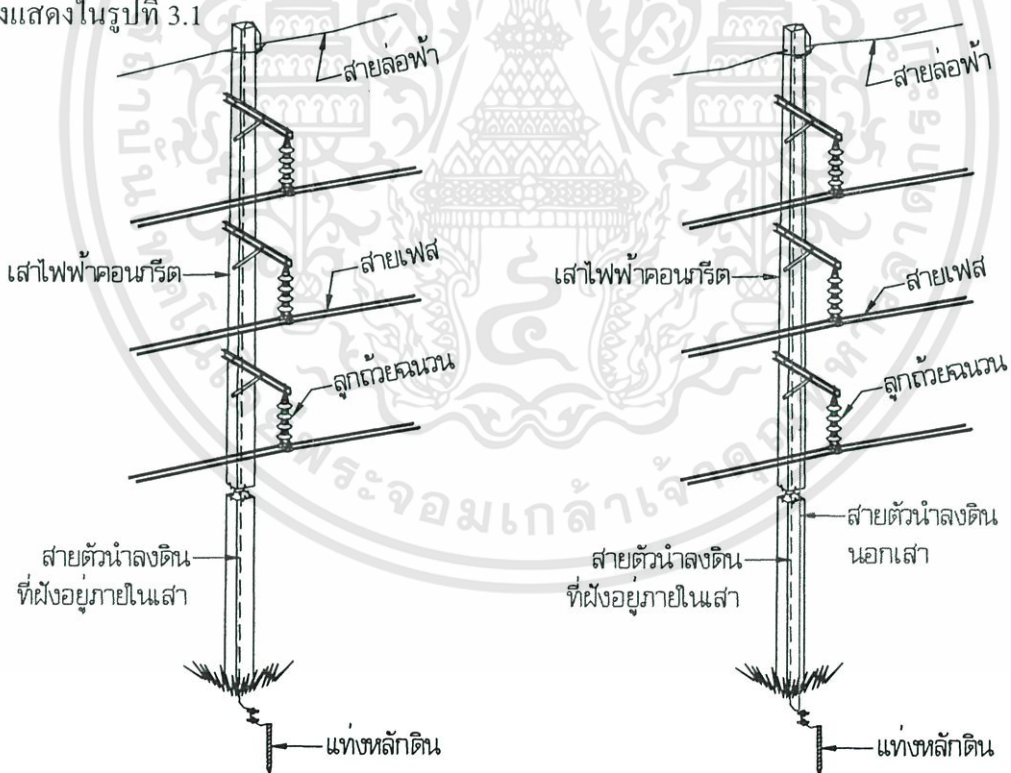
รูปที่ 2.43 การกระจายสะสมของค่ายอดกระแสไฟฟ้าในประเทศไทย



องค์ประกอบของระบบสายส่ง และการสร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้า

3.1 องค์ประกอบของระบบสายส่งที่ศึกษา

ระบบสายส่งที่นำมาศึกษานี้ เป็นเพียงรูปแบบหนึ่งในหลายๆรูปแบบของระบบส่งที่การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ใช้งานในปัจจุบัน การศึกษานี้จะพิจารณาระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ที่ใช้งานเป็นส่วนใหญ่ และมีสถิติไฟฟ้าดับเนื่องจากฟ้าผ่าอยู่บ่อยครั้ง ชนิด DC-DC-1 [19] ซึ่งเป็นแบบวงจรเดี่ยวตัวนำคู่ มีการจัดวางสายเฟสในแนวตั้งประกอบด้วยสายตัวนำคู่ 3 เฟสชนิด All Aluminium Conductor ขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร สายล่อฟ้า 1 เส้นเป็นชนิดสายเหล็กตีเกลียวขนาด 7.93 มิลลิเมตร และเสาไฟฟ้าคอนกรีตสูง 20 เมตร เมื่อสายล่อฟ้ามีการต่อลงดินใน 2 ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1



ก) สายล่อฟ้าต่อลงดินผ่านสายดินภายในเสา
(โครงสร้างที่ใช้งานปัจจุบัน)

ข) จากข้อ ก) เพิ่มการต่อร่วมสายดินนอกเสา
(โครงสร้างที่ปรับปรุง)

รูปที่ 3.1 การจัดวางสายของโครงสร้างระบบสายส่ง 69 kV แบบ DC-DC-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 สายตัวนำในระบบสายส่ง

สายไฟฟ้ามีหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังจุดรับไฟ การพิจารณาเลือกวัสดุที่จะใช้ทำสายไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการนำไฟฟ้า (Conductivity) ความสามารถในการรับแรงดึง (Mechanical Strength) น้ำหนักสายและราคา เช่น เงิน เป็นโลหะไฟฟ้าที่ดีที่สุดแต่มีราคาแพงมากจึงไม่ใช้ทำสายไฟฟ้า ทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมีความสามารถในการรับแรงดึงไฟฟ้าได้ดีพอควรแต่มีราคาแพง อลูมิเนียมเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีพอควรมีน้ำหนักเบา มีความสามารถรับแรงดึงได้จำกัด

สายตัวนำที่ใช้ใน กฟน.ทำจากโลหะสองชนิดด้วยกันคืออลูมิเนียมหรือทองแดง การเลือกที่จะใช้โลหะชนิดใดนั้น จะพิจารณาจากความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน เนื่องจากโลหะทั้งสองชนิดนี้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ขณะที่อลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา และราคาถูกกว่าทองแดงในขนาดพื้นที่หน้าตัดเดียวกัน แต่ทองแดงจะนำกระแสได้สูงกว่า สายอลูมิเนียมจึงนิยมใช้เป็นสายเดินในอากาศ ส่วนสายทองแดงใช้เป็นสายใต้ดิน

สำหรับสายตัวนำที่เดินในอากาศในระบบแรงดัน 69 กิโลโวลต์ ของ กฟน. เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (All Aluminium Conductor : AAC) มีใช้ขนาดเดียวคือ ขนาดพื้นที่หน้าตัด 400 ตารางมิลลิเมตร (ในระบบเก่าเป็นขนาด 795 MCM) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25.65 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 สายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย ขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร

3.1.2 เสาไฟฟ้าคอนกรีต

เสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ผลิตอาจมีรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม สี่เหลี่ยม หรือมากกว่าสี่เหลี่ยม แต่เสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ใช้งานในประเทศไทยจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยวิธีการผลิตเสาไฟฟ้าคอนกรีตมีอยู่ 2 กระบวนการดังนี้ [20]

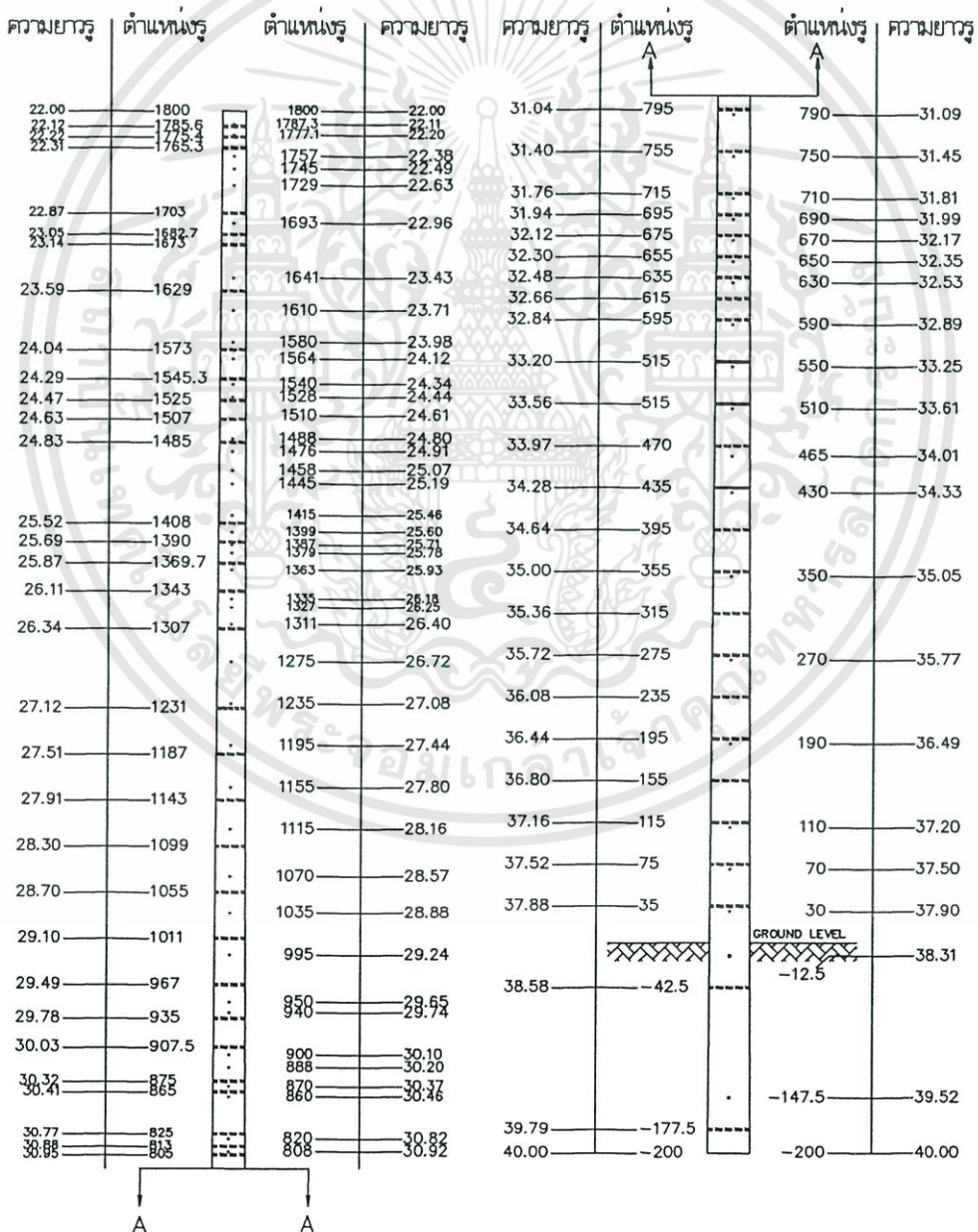
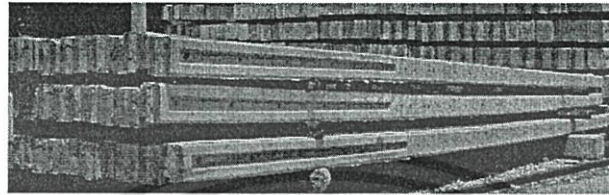
1. กระบวนการผลิตเสาแบบคอนเวนชันนัล (conventional process) เป็นวิธีการผลิตโดยให้แม่แบบติดตั้งอยู่กับที่ ลักษณะของเสาไฟฟ้าคอนกรีตจะตันไม่มีรูกลวงภายใน เสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ผลิตด้วยกระบวนการนี้เรียกว่า เสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรง (Prestress Concrete Pole)

2. กระบวนการการผลิตแบบใช้แรงเหวี่ยง (spun process) เป็นวิธีการผลิต โดยให้แม่พิมพ์หมุนรอบแกนมอเตอร์ ลักษณะของเสาไฟฟ้าคอนกรีตจะมีแกนกลางเป็นท่อกลวง (hollow core)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตลอดความยาวของเสา สำหรับเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ผลิตด้วยกระบวนการนี้เรียกว่าเสาไฟฟ้าคอนกรีตแรงเหวี่ยง

สำหรับเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ใช้ในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของ กฟน. จะใช้เสาคอนกรีตอัดแรง(Prestress Concrete Pole) ขนาดความสูง 20 เมตร มีค่าโมเมนต์ใช้งาน 14 ตัน-เมตร ขนาดหน้าตัดหัวเสา 220 x 220 มิลลิเมตร ขนาดหน้าตัดโคนเสา 400 x 400 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 เสาไฟฟ้าคอนกรีต ขนาด 20 เมตร

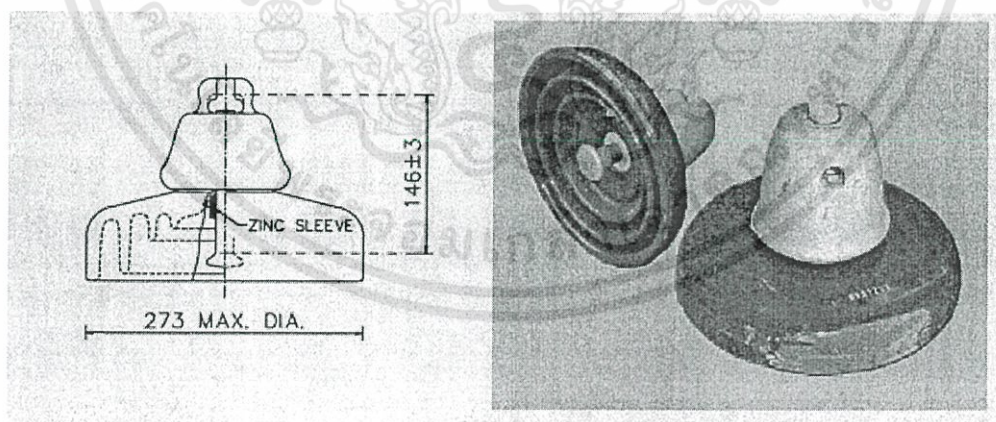
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ฉนวนที่ใช้สำหรับยึด หรือรองรับตัวนำไฟฟ้าที่มีแรงดัน หรือศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าศักย์ดิน ยึดตัวนำไฟฟ้าให้อยู่ห่างกันอย่างมั่นคงพอที่จะไม่ทำให้แกว่ง หรือ เคลื่อนไหวเข้าใกล้กันจนเกิดสปาร์กหรือเบรกดาวน และเกิดการลัดวงจรระหว่างตัวนำที่มี ศักย์ไฟฟ้าต่างกัน โดยมีตัวกลางอื่นเป็นฉนวนกั้น คือ อากาศ ก๊าซ หรือฉนวนเหลว ลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้านอกจากทำหน้าที่ยึดสายไฟฟ้าแรงสูง บัสบาร์ หรือสวิตช์ตัดคอนแล้วยังใช้เป็นภาชนะ ถึงฉนวนห่อหุ้ม เช่น ปลอกฉนวนนำสาย คือ บุซซิง เซอร์กิตเบรกเกอร์ กับดักฟ้าผ่า หม้อแปลง กระแส และแรงดัน (CT, PT) และตัวเก็บประจุเป็นต้น

ถ้าพิจารณาเนื้อสารที่ใช้ทำฉนวนลูกถ้วยไฟฟ้า ลูกถ้วยฉนวนอาจจะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ ปอร์ซเลน (Porcelain) แก้วเหนียว (Toughened glass) และสารสังเคราะห์ เช่น คาสท์เรซิน อี พอกซีเรซินใยแก้ว เป็นต้น ลูกถ้วยประเภทสารสังเคราะห์นิยมใช้ภายในอาคารที่ไม่เปียกชื้น ส่วนที่ ใช้นอกอาคารมักจะเป็นลูกถ้วยฉนวนปอร์ซเลน หรือแก้วเหนียว เพราะมีความคงทนต่อสภาพ อากาศได้ดี

สำหรับชนิดลูกถ้วยที่ใช้ในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของ กฟน. จะใช้ลูกถ้วยแขวนแบบ ปอร์ซเลน (suspension type porcelain insulator) หรือลูกถ้วยฉนวนกระเบื้องเคลือบตาม มอก.354 [21] ซึ่งชนิดติดตั้งแบบห้อยแขวนตามแนวดิ่ง คือ แบบ ค. (แบบ 52-3) โดยทำจากส่วนผสมของดิน เหนียว อะลูมินา ดินขาว หินฟันม้า และหินแก้ว(ควอตซ์)



รูปที่ 3.4 ลูกถ้วยแขวนแบบปอร์ซเลน

พิกัดทางมิติต่ำสุด		
ระยะรั้ว	292	มิลลิเมตร
พิกัดทางกล		
ความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า	66	กิโลนิวตัน
ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล	621	เซนติเมตรนิวตัน
ความทนแรงดึง	33	กิโลนิวตัน
โหลคเวลา	44	กิโลนิวตัน
พิกัดทางไฟฟ้า		
แรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ	80	กิโลโวลต์
แรงดันวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ	50	กิโลโวลต์
แรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก	125	กิโลโวลต์
แรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ	130	กิโลโวลต์
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ	110	กิโลโวลต์
พิกัดทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ		
แรงดันทดสอบความถี่ต่ำ, ค่ารูดมีนสแควร์เทียบกับดิน	10	กิโลโวลต์
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์	50	ไมโครโวลต์

ซึ่งเมื่อประกอบลูกถ้วยแขวนเป็นพวงฉนวนลูกถ้วย ขนาดของแรงดันวาบไฟจะเปลี่ยนไปตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะแฟลชโอเวอร์ของฉนวนลูกถ้วยแขวนขนาดลูกถ้วยเท่ากับ 10 นิ้ว x 5 3/4 นิ้ว (หน่วย : กิโลโวลต์)

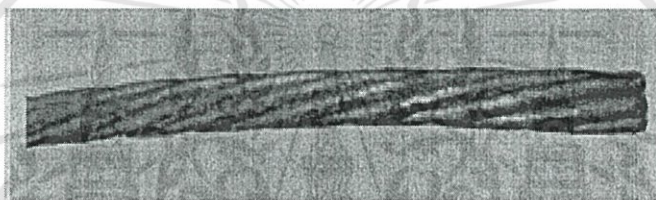
จำนวนลูกถ้วย	ค่าเฉลี่ยวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำ		ค่าเฉลี่ยวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต	
	ผิวแห้ง	ผิวเปียก	ทางบวก	ทางลบ
1	80	50	125	130
2	155	90	255	255
3	215	130	355	345
4	270	170	440	415
5	325	215	525	495
6	380	255	610	585
7	435	295	695	670

3.1.4 ลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีทีเกลียว(Galvanize Steel Wire Strand)

ลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีทีเกลียวตาม มอก. 404 [22] เป็นลวดที่ทำจากเหล็กลวดคาร์บอนต่ำ หรือเหล็กลวดคาร์บอนสูงเคลือบสังกะสีโดยวิธีจุ่มร้อนหรือเคลือบสังกะสีโดยวิธีไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้งานลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีทีเกลียวใน 2 ลักษณะคือ

1. ใช้ทำหน้าที่เป็นสายล่อฟ้า (Overhead Ground Wire) โดยพาดผ่านที่ห้วเสาไฟฟ้าคอนกรีต
2. ใช้ทำเป็นสายต่อลงดินภายในเสา (Internal Ground) และสายต่อลงดินนอกเสา (External Ground)

โดยการใช้งานทั้ง 2 ลักษณะนี้จะใช้ขนาดลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีทีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.93 มิลลิเมตร



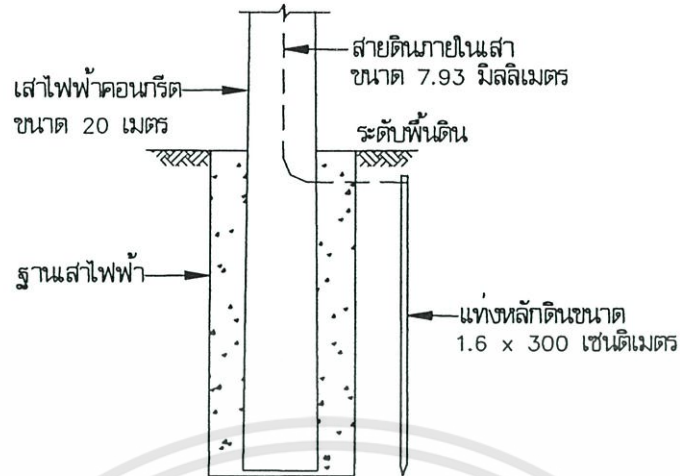
รูปที่ 3.5 ลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีทีเกลียว

3.1.5 แท่งหลักดิน

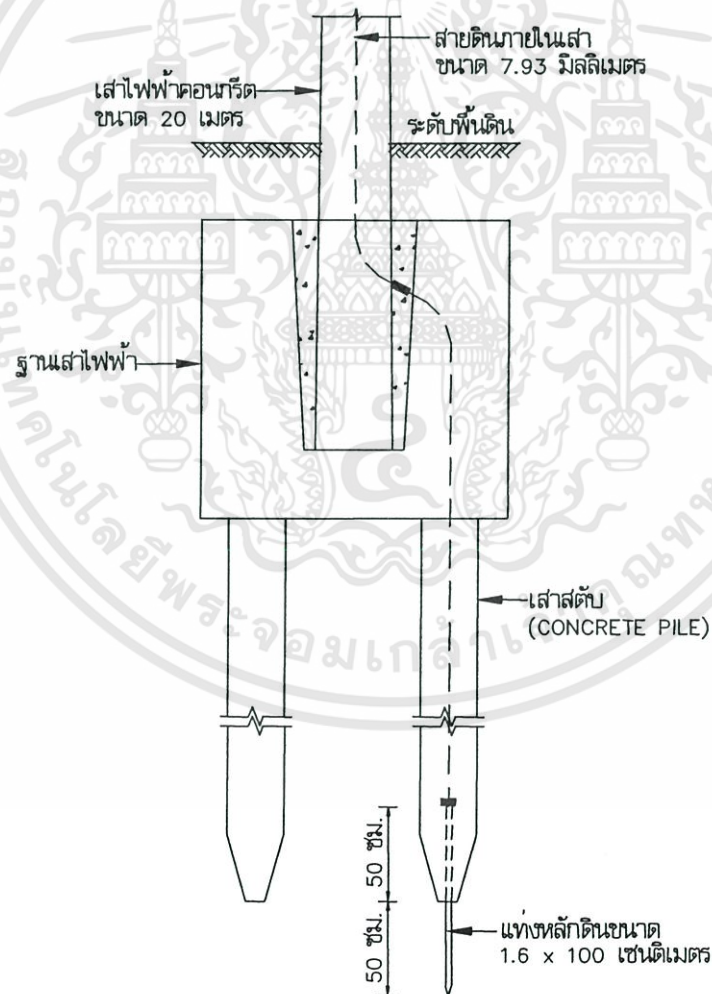
การออกแบบระบบต่อลงดินของระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของ กฟน. เหตุผลหลักเพื่อต้องการลดแรงดันเกินที่เกิดขึ้นที่ห้วเสาอันเนื่องมาจากฟ้าผ่าลงสายดินซึ่งในอากาศให้น้อยลงจะได้เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Backflash over) ที่ฉนวนลูกถ้วยยากขึ้น ซึ่ง กฟน. ได้แนะนำค่าความต้านทานดินในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ไว้ไม่เกิน 10 โอห์ม

แท่งหลักดินที่ใช้ในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของ กฟน. จะทำด้วยเหล็กแท่งอบสังกะสี (GALVANIZED STEEL GROUND ROD) เพื่อป้องกันการผุกร่อน โดยมีขนาด และลักษณะการใช้งานใน 2 ลักษณะดังนี้

1. แท่งหลักดินขนาด 1.6 x 300 เซนติเมตร ใช้กับฐานเสาชนิด Typical Concrete Foundation ตามแบบเลขที่ 3709 หน้าที่ 3 [19] ดังรูปที่ 3.6 (ก)
2. แท่งหลักดินขนาด 1.6 x 100 เซนติเมตร แท่งหลักดินชนิดนี้จะฝังลึกเข้าไปภายในเสา สตัมป์ (Concrete Pile) 50 เซนติเมตร เหลือปลายโผล่ออกมา 50 เซนติเมตร โดยใช้กับฐานเสาตามแบบเลขที่ 3709 หน้าที่ 4 [18] ดังรูปที่ 3.6 (ข)



ก) แท่งหลักดินขนาด 1.6 x 300 เซนติเมตร



ข) แท่งหลักดินขนาด 1.6 x 100 เซนติเมตร

รูปที่ 3.6 แท่งหลักดินที่ใช้ในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์

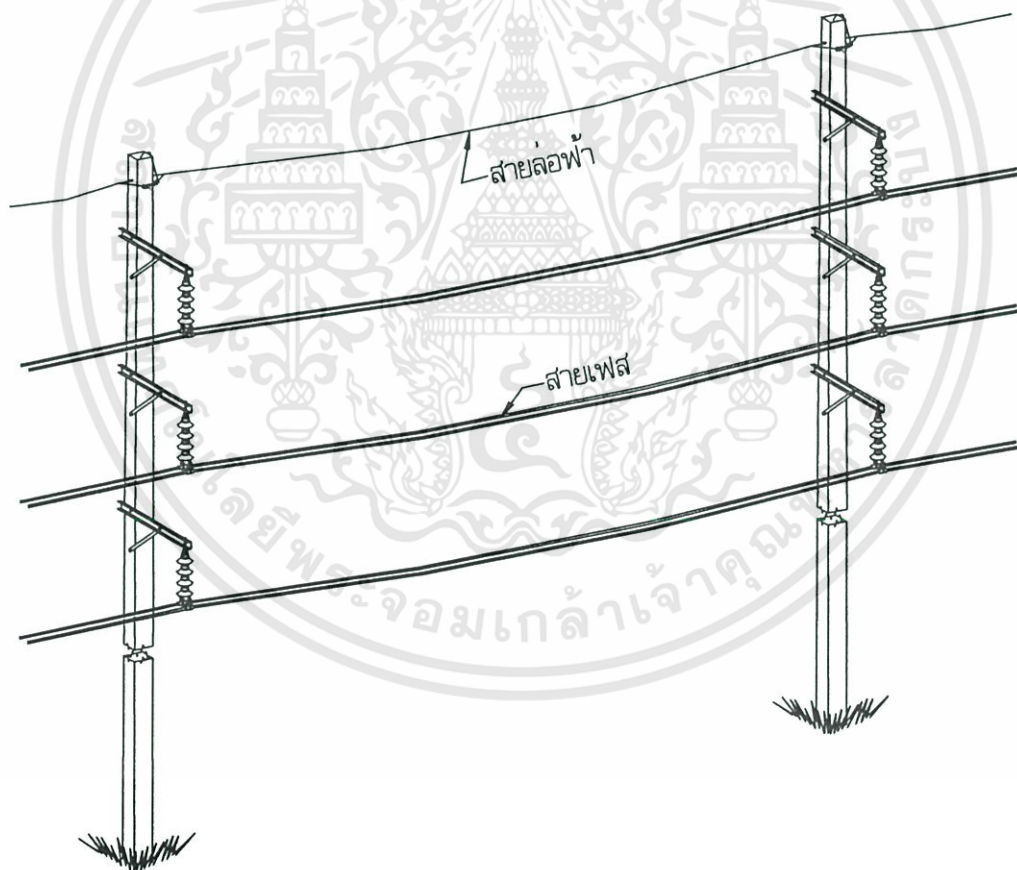
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้างแบบจำลองในระบบไฟฟ้า

ในการศึกษานี้จะใช้โปรแกรม ATP-EMTP เป็นเครื่องมือจำลององค์ประกอบในระบบสายส่งไฟฟ้า ดังนั้นข้อมูลในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์จะถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลงในโปรแกรม ATP-EMTP ซึ่งแบบจำลองของระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ที่ศึกษาจะประกอบด้วย แบบจำลองสายส่ง แบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีต แบบจำลองลูกถ้วย แบบจำลองความต้านทานดินอิมพัลส์ที่ฐานเสา แบบจำลองสายตัวนำลงดินนอกเสา และแบบจำลองกระแสฟ้าผ่า

3.2.1 แบบจำลองสายส่ง

แบบจำลองสายส่งที่ใช้เป็นแบบจำลองพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับความถี่ของ J.Marti จำลองระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ แบบวงจรเดี่ยวตัวนำคู่ ที่มีการจัดวางสายเฟสในแนวคิงประกอบด้วยสายตัวนำคู่ 3 เฟส และสายล่อฟ้า 1 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การจัดวางสายเฟสวงจรเดี่ยวตัวนำคู่ และสายล่อฟ้าของระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์

สายส่งนี้ถูกแทนด้วยแบบจำลองพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับความถี่ (frequency-dependent line model) โดยแต่ละช่วงความยาวสาย สามารถคำนวณหาความถี่ได้จากสมการที่ 4.1 [23]

$$f = \frac{3 \times 10^8}{4l_{Line}} \quad \text{เฮิรตซ์} \quad (4.1)$$

เมื่อ l_{Line} คือ ความยาวสาย (m)

ตารางที่ 3.2 ความถี่ของสายที่พิจารณา

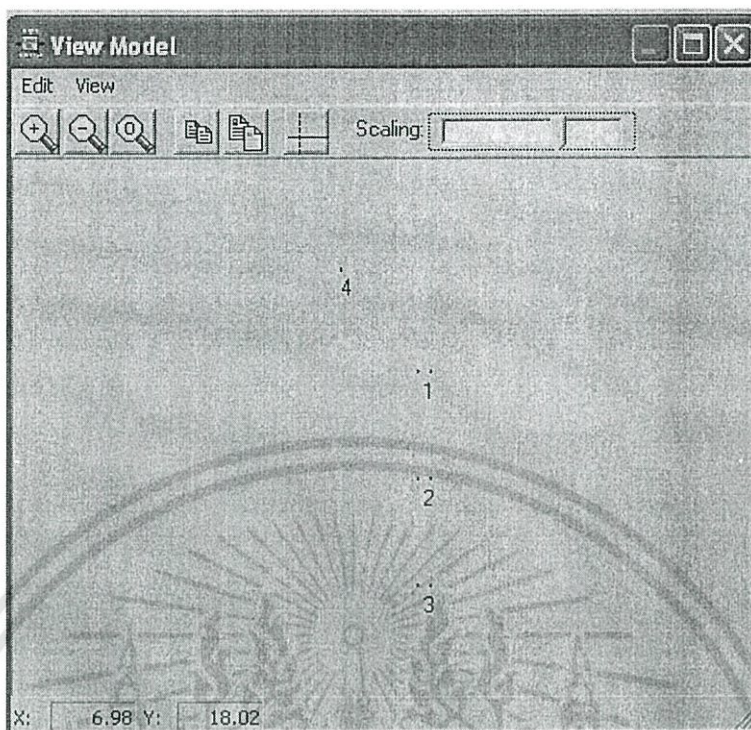
ความยาวระยะห่างเสา (เมตร)	ความถี่ที่พิจารณา (เฮิรตซ์)
40	1,875,000
80	937,500
120	625,000

ในการศึกษาเลือกใช้แบบจำลองแบบ J. Marti ลักษณะเป็นสายความสูญเสียต่ำที่ความถี่สูง โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP สร้างแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.8

Model	Data	Ph.no	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]		
1	1	0	1.282	0.04737467	1.4	16.1	15.16	20	180	2	
2	2	0	1.282	0.04737467	1.4	14.27	13.33	20	180	2	
3	3	0	1.282	0.04737467	1.4	12.44	11.5	20	180	2	
4	4	0	0.396	4.7	0	17.6	17.04	0	0	0	

(ก) แสดงการป้อนข้อมูลของแบบจำลองระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) แสดงรูปแบบการจัดวางสายของแบบจำลองระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์

รูปที่ 3.8 การสร้างแบบจำลองระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ชนิด J.Marti

จากแบบจำลองที่ผ่านการประมวลผลแล้ว ทำให้ได้ผลการคำนวณเป็นอิมพีแดนซ์เมตริก

$[Z_{\text{surge-mode}}]$ และ Transformation Matrix ซึ่งเมตริกทั้งสองนี้สามารถนำมาคำนวณหาอิมพีแดนซ์เมตริก $[Z_{\text{surge-phase}}]$ ได้ตามสมการที่ 4.2

$$Z_{\text{surge-phase}} = [T][Z_{\text{surge-mode}}][T]' \quad (4.2)$$

เมื่อยกตัวอย่างการสร้างแบบจำลองสายที่ระยะห่าง 80 เมตร คำนวณค่าเสรีจิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$[Z_{\text{surge-mode}}] = \begin{bmatrix} 769 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 382 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 255 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 202 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[T] = \begin{bmatrix} 0.411949 & -0.334181 & 0.696195 & -0.472388 \\ 0.457482 & -0.205859 & 0.130104 & 0.812451 \\ 0.725552 & -0.270657 & -0.704939 & -0.341703 \\ 0.307508 & 0.879027 & -0.038024 & -0.003228 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะได้อิมพีแดนซ์เมตริก $[Z_{\text{surge-phase}}$] คือ

$$[Z_{\text{surge-phase}}] = \begin{bmatrix} 341.83 & & & \text{symmetrical} \\ 116.77 & 314.78 & & \\ 171.85 & 197.07 & 583.11 & \\ -21.23 & 37.27 & 87.76 & 368.27 \end{bmatrix}$$

จากอิมพีแดนซ์เมตริก $[Z_{\text{surge-phase}}$] สามารถอ่านค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายแต่ละเส้นได้ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำแต่ละเส้น

สาย	เสิร์จอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
สายดินป้องกัน	368.27
สายตัวนำเฟส A	341.83
สายตัวนำเฟส B	314.78
สายตัวนำเฟส C	583.11

3.2.2 แบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีต

ในการหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การวัดจากการทดสอบเสาจริง การวัดจากการทดสอบแบบจำลองลดขนาด การวิเคราะห์รูปทรงทางเรขาคณิตอย่างง่าย และการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยทฤษฎีทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้จะต้องมีการพิจารณาถึงตัวกลางที่คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งจะมีผลต่อการสูญเสียพลังงาน และทำให้เกิดการลดทอนของคลื่น

การคาดคะเนเสิร์จเนื่องจากฟ้าผ่าของอุปกรณ์ต่างๆ มีความสำคัญมากต่อการออกแบบฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้า ซึ่งเป็นพารามิเตอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งที่มีความสำคัญในการจัดประสานการสัมพันธ์ทางฉนวนในระบบส่งจ่าย และระบบจำหน่ายไฟฟ้า อย่างไรก็ตามที่ผ่านมาได้มีการศึกษา และทดสอบเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าโครงเหล็กอยู่หลายงานวิจัยด้วยกัน ในขณะที่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเสาไฟฟ้าคอนกรีตมีจำนวนไม่มากนัก และส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยที่ทำในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นเสาคอนกรีตกลมภายในกลวง และไม่ได้พิจารณาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีต สำหรับในประเทศไทยมีการใช้เสาไฟฟ้าคอนกรีตในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งเป็นเสาไฟฟ้าคอนกรีตมีขนาดใหญ่วิโคนเสา และเรียวยาวเล็กลงที่ปลายเสา

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้แบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่มีการพิจารณาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีต [24] โดยได้ทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีตที่มีส่วนผสมคอนกรีตสำหรับงานหล่อเสาไฟฟ้าที่มีช่วง 100 วันด้วยเครื่องวัด Impedance/Gain Analyzer ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 40 MHz ด้วยค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.17 % แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และความนำไฟฟ้าของคอนกรีต และเสิร์จอิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ 4.3

$$Z_{pole} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r - j\sigma/(\epsilon_0\omega)}} \ln\left(\frac{h + \sqrt{h^2 + R^2}}{R}\right) \quad (4.3)$$

เมื่อ	Z_{pole}	คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีต (โอห์ม)
	h	คือ ความสูงของเสาไฟฟ้า (เมตร)
	R	คือ รัศมีของเหล็กเส้นภายในเสา (เมตร)
	ϵ_0	คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอากาศ = 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร
	ϵ_r	คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของตัวกลางคอนกรีต = 5.94
	σ	คือ ความนำไฟฟ้าของตัวกลาง (ซีเมนส์ต่อเมตร)
	ω	คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่น (เรเดียนต่อวินาที)

เมื่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีการสูญเสียจะทำให้เกิดการหน่วง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากต้องมิงงานส่วนหนึ่งที่จะต้องกระทำเพื่อเอาชนะแรงหน่วงนี้ ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ และความนำไฟฟ้าของคอนกรีต และความถี่เป็นไปตามสมการที่ 4.4

$$\mu = \frac{C}{\sqrt{\mu_r(\epsilon_r - j\sigma/\epsilon_0\omega)}} \quad (4.4)$$

เมื่อ	μ	คือ ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในเสาไฟฟ้าคอนกรีต(เมตรต่อวินาที)
	C	คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 (เมตรต่อวินาที)

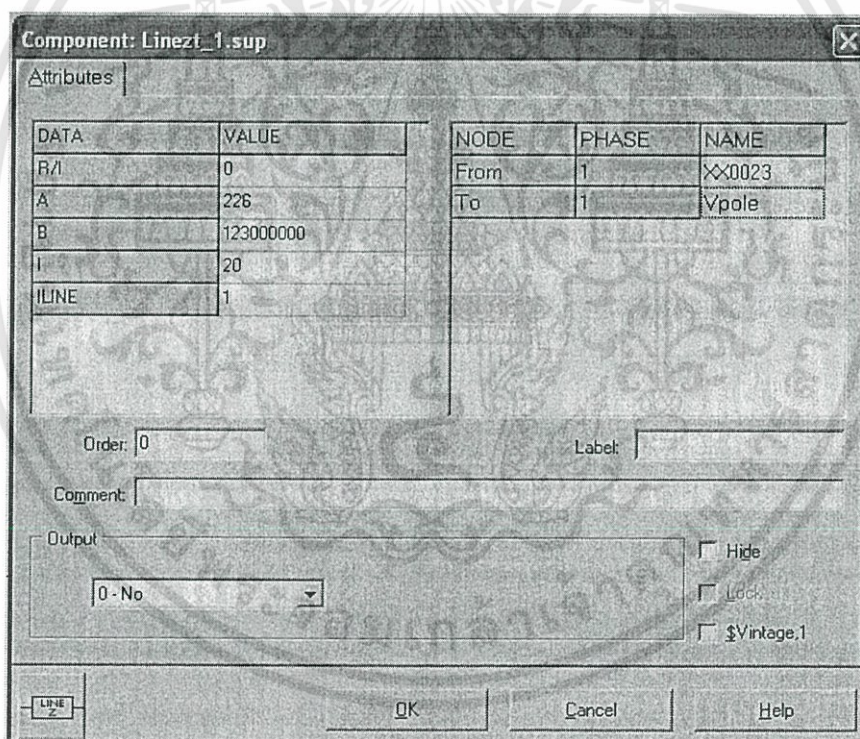
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μ_r คือ relative permeability ของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1
 ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของตัวกลางคอนกรีต = 5.94

หมายเหตุ จากสมการที่ 4.3-4.4 ค่าของ $-j\sigma/\epsilon_0\omega$ มีค่าน้อยมากอาจยกเว้นไม่นำมาคำนวณได้

สำหรับมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวง กำหนดให้ใช้เสาไฟฟ้าคอนกรีตที่มีความสูง 20 เมตร สายล่อฟ้าจะทำการต่อลงดินโดยผ่านลวดเหล็กเคลือบสังกะสีที่ฝังในเสาคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.93 มิลลิเมตร ลงไปยังระบบบรากสายดิน

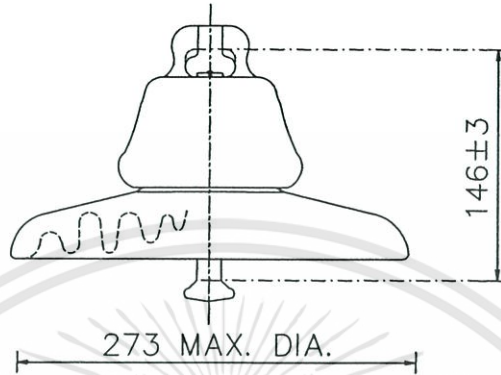
การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตจะใช้ฟังก์ชัน Line Distributed / Transp. Lines โดยมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ และความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นภายในเสาไฟฟ้าคอนกรีตสามารถคำนวณจากสมการที่ 4.3-4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีต

3.2.3 แบบจำลองลูกถ้วย

มาตรฐานการก่อสร้างระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของ กฟน. กำหนดให้ใช้ลูกถ้วย หมายเลข 52-3 ตามมาตรฐาน มอก.354 จำนวน 4 ลูกต่อกัน

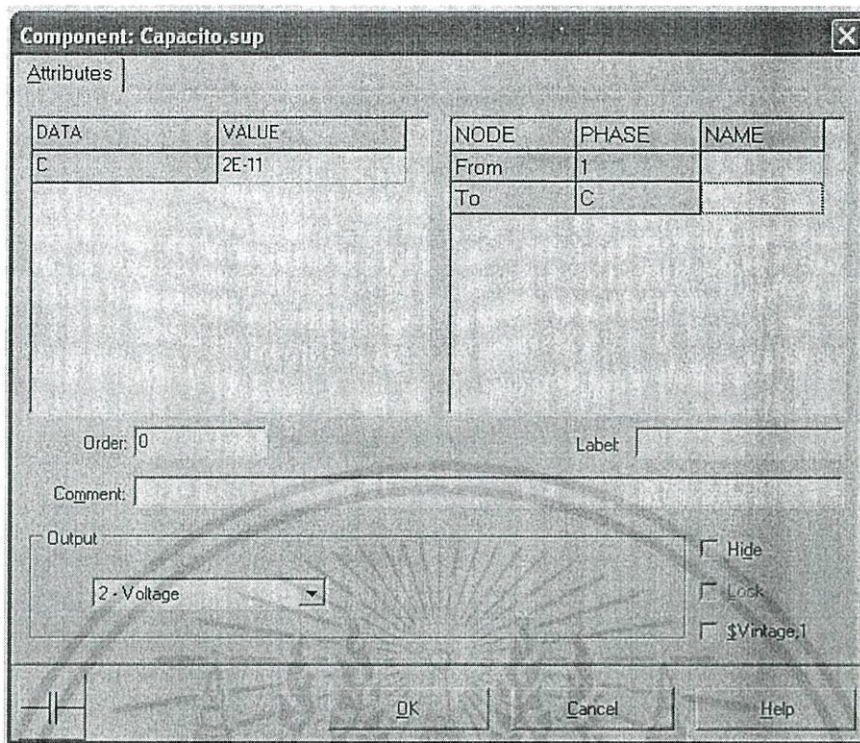


รูปที่ 3.10 ฉนวนลูกถ้วยที่ใช้งานในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์

ในการศึกษาการแพร่กระจายของคลื่น ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบมีผลต่อรูปร่างของคลื่น โดยเฉพาะคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นที่เร็วมาก สำหรับศึกษานี้จะใช้คาปาซิเตอร์แทนลูกถ้วยในระบบ [25] โดยลูกถ้วยแขวนแบบ Suspension insulator มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 80 pF ต่อ 1 ลูกถ้วย

ในระบบ 69 กิโลโวลต์ ของ กฟน. กำหนดให้ใช้ลูกถ้วยแขวนหมายเลข 53-2 จำนวน 4 ลูกต่ออนุกรมสำหรับแขวนสายตัวนำหนึ่งเฟส ในการศึกษาจึงพิจารณาใช้ค่าความจุไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนต่ออนุกรมกัน 4 ลูก ดังนี้

$$C = \frac{80}{4} = 20 \text{ pF}$$



รูปที่ 3.11 การสร้างแบบจำลองของลูกถ้วยโดยใช้คาปาซิเตอร์

3.2.4 แบบจำลองความต้านทานดินอิมพัลส์

ในการศึกษาได้พิจารณาลักษณะของความต้านทานดินเมื่อมีกระแสขนาดสูงแพร่กระจายในดิน หากกระแสฟ้าผ่ามีขนาดสูงพอที่จะสนามไฟฟ้าสูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤติของดิน ณ จุดที่ติดตั้งตัวนำลงดินจะทำให้ดินรอบๆ ตัวนำนั้นเสียสภาพการเป็นฉนวน กลายเป็นตัวนำไฟฟ้าแทนเสมือนว่าตัวนำลงดินนั้นขยายใหญ่ขึ้นออกเป็นรูปครึ่งทรงกลม

โดยทั่วไปค่าความต้านทานดินที่ฐานเสาได้จากการวัดในภาคสนาม หรือได้จากการคำนวณโดยใช้สูตรตามมาตรฐานขึ้นอยู่กับรูปทรงของตัวนำลงดิน ค่าเหล่านี้เป็นค่าความต้านทานที่ความถี่กำลัง แต่ในความเป็นจริงความต้านทานดินที่ฐานเสาลดลงเมื่อมีกระแสฟ้าผ่าความถี่สูงไหล

มาตรฐานของ กฟน. ใช้ตัวนำลงดินเป็นชนิดแท่ง ความต้านทานดินที่ความถี่กำลังที่ฐานเสา หาได้จากสมการที่ 2.31

$$R_o = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_o} - 1 \right)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง กับความต้านทานดินอิมพัลส์สามารถหาได้จากสมการที่ 2.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_i = \alpha R_0$$

เมื่อ	R_0	คือ ความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง (โอห์ม)
	R_i	คือ ความต้านทานดินอิมพัลส์ (โอห์ม)
	α	คือ สัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของความต้านทานดิน

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + (I_R / I_g)}}$$

เนื่องจากค่าความต้านทานดินขึ้นกับชนิด และลักษณะของดินเป็นหลัก และในการปฏิบัติงานภาคสนามมีความไม่แน่นอนของลักษณะของดินขึ้นอยู่กับพื้นที่ปฏิบัติงาน ดังนั้นในการศึกษาโดยโปรแกรม ATP-EMTP จึงทำโดยการแปรผันค่าความต้านทานดินอิมพัลส์เป็นหลายค่าเพื่อพิจารณาผลของความต้านทานดินอิมพัลส์ที่มีผลต่อแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า ในที่นี้แปรผันค่าดังนี้ 5, 25, 50, 75, 100 และ 125 โอห์ม

เมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ระบบบรากสายดินจะแพร่กระจายไหลในดิน แรงดันที่บรากสายดินจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้มีการนำกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นความจุของดิน หาได้จากสมการที่ 4.5 [26]

$$C = \frac{\epsilon_r l}{18 \ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \times 10^{-9} \quad \text{ฟารัด} \quad (4.5)$$

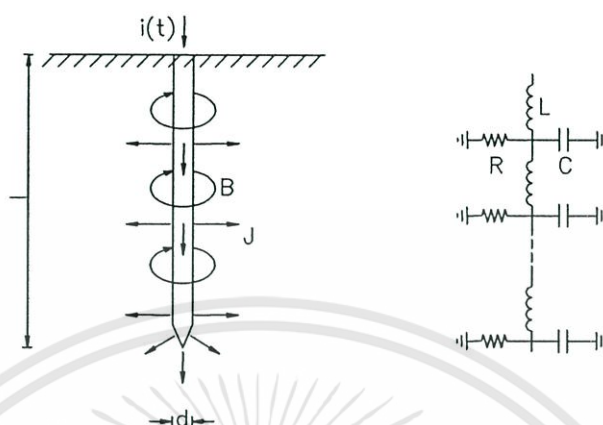
กระแสฟ้าผ่าไหลลงดินโดยผ่านบรากสายดิน จะมีผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่บรากสายดิน หาได้จากสมการที่ 4.6 [26]

$$L = 2l \cdot \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \times 10^{-7} \quad \text{เฮนรี่} \quad (4.6)$$

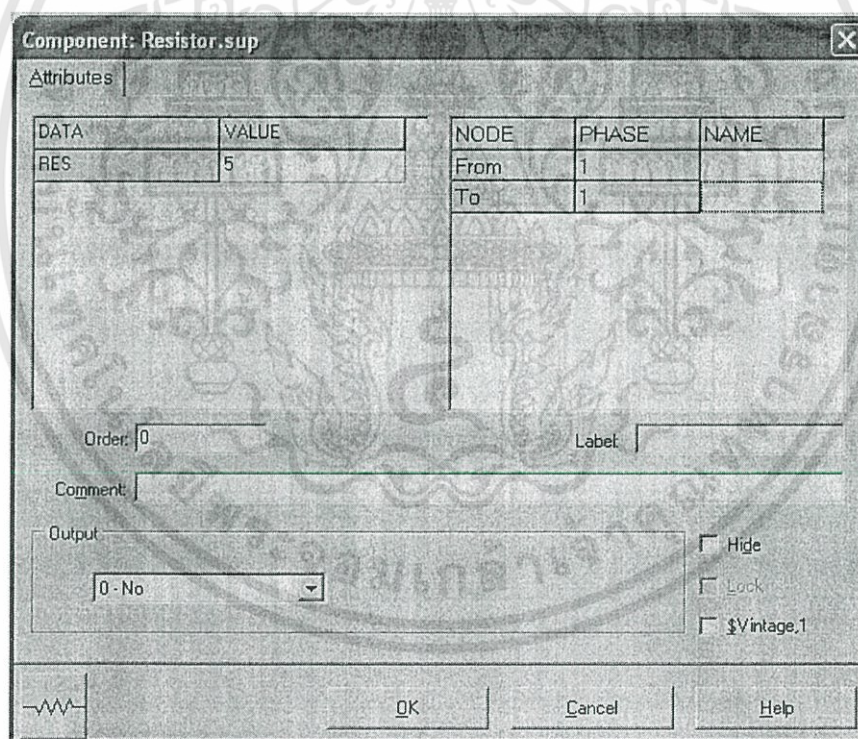
เมื่อ	C	คือ คาปาซิแตนซ์ของบรากสายดิน (ฟารัด)
	L	คือ อินดักแตนซ์ของบรากสายดิน (เฮนรี่)
	l	คือ ความยาวของแท่งหลักดิน (เมตร)
	d	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งหลักดิน (เมตร)
	ϵ_r	คือ relative permittivity ของดิน ($\epsilon_r = 10$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นวงจรสมมูลของรากสายดินเมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ระบบรากสายดินจะประกอบด้วย ความต้านทานดินอิมพีแดนซ์ คาปาซิแตนซ์ และอินดักแตนซ์ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลของรากสายดินเมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลผ่าน



รูปที่ 3.13 การสร้างแบบจำลองความต้านทานของรากสายดินแบบแท่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Component: Inductor.sup

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
L	2.485E-6	From	1	
		To	1	

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No

Hide
 Lock
 \$Vintage.1

OK Cancel Help

รูปที่ 3.14 การสร้างแบบจำลองตัวเหนี่ยวนำของรอกสายดินแบบแบ่ง

Component: Capacito.sup

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
C	1.787E-10	From	1	
		To	1	

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No

Hide
 Lock
 \$Vintage.1

OK Cancel Help

รูปที่ 3.15 การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุของรอกสายดินแบบแบ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 แบบจำลองสายดินนอกเสา

แบบจำลองสายดินภายนอกเสาจะเลือกใช้ลวดเหล็กเคลือบสังกะสีตีเกลียวขนาด 7.93 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 404-2540 ขนาดลงมากับเสาไฟฟ้าโดยประสานเข้าด้วยกันกับลวดเหล็กที่ฝังภายในเสาที่ยอดเสา สามารถคำนวณค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินภายนอก [27] จากสมการที่ 4.7

$$Z = 60 \ln(h / er) - k \cdot \ln\{1 + (rc / D)\} \quad (4.7)$$

เมื่อ	Z	คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสาย (โอห์ม)
	e	คือ ลอกรฐานธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 2.71828
	h	คือ ความยาวสายดินนอกเสา (เมตร)
	r	คือ รัศมีสายดินนอกเสา (เมตร)
	r_c	คือ รัศมีเสาคอนกรีต (เมตร)
	D	คือ ระยะห่างระหว่างผิวเสากับแท่งตัวนำลงดิน (เมตร) มีค่า 1 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่เสิร์จอิมพีแดนซ์เริ่มมีค่าคงที่

โดยคำนวณค่า k จากสมการ

$$k = 0.096 \cdot r_c + 13.95 \quad (4.8)$$

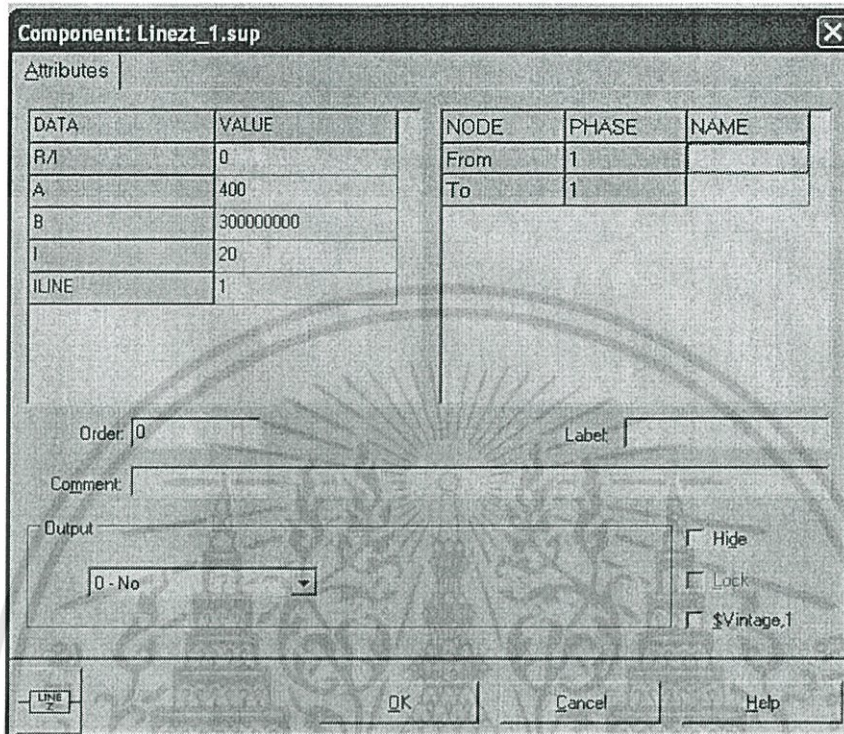
เมื่อ	k	คือ ค่าคงที่
	r_c	คือ รัศมีเสาไฟฟ้าคอนกรีต (เมตร)

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์สำหรับหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสา

พารามิเตอร์	มิติ (เมตร)
ความยาวของสายดินนอกเสา	20
รัศมีเสาไฟฟ้าคอนกรีต	0.155
รัศมีสายตัวนำลงดินนอกเสา	0.00396
ระยะห่างจากผิวเสาดังสายดินนอกเสา	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

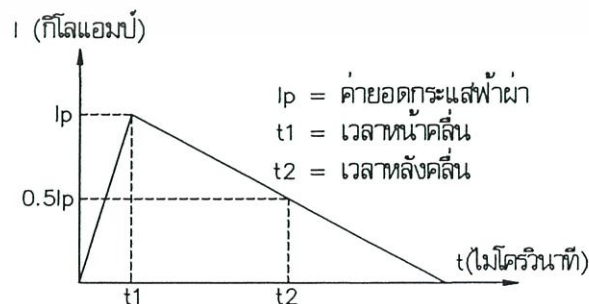
สร้างแบบจำลองสายดินนอกเสาด้วยฟังก์ชัน Line Distributed / Transp.Lines โดยมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสาตามการคำนวณจากสมการที่ 4.7



รูปที่ 3.16 การสร้างแบบจำลองของสายดินนอกเสา

3.2.6 แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า

แบบจำลองกระแสฟ้าผ่าจะแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ต่อขนานอยู่กับเสรีจิมพีแดนซ์ของลำฟ้าผ่า และเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ จะกำหนดให้รูปคลื่นอิมพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้น โดยมีเวลาหน้าคลื่นเป็น 0.25, 1, 2, และ 4 ไมโครวินาที และเวลาหลังคลื่นมีค่าเท่ากับ 50 ไมโครวินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งในโปรแกรม ATP-EMTP ได้เลือกใช้แบบจำลองแหล่งกำเนิดแบบที่ 13 ชื่อ SLOP RAMP ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่ใช้ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Component: Slope_ra.sup

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amp	40000	SR	1	
T0	2E-6			
A1	20000			
T1	5E-5			
TSta	0			
TSto	0.2			

Order: 0 Label: I

Comment:

Type of source

Current Hide

Voltage Lock

OK Cancel Help

รูปที่ 3.18 การสร้างแบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า

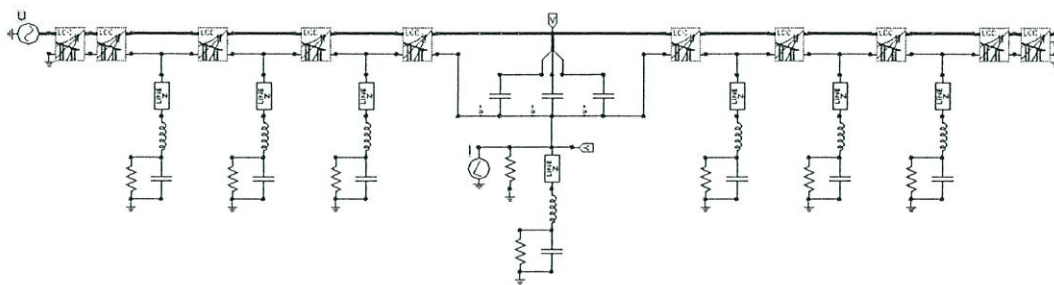
3.2.7 ความต้านทานลําฟ้าผ่า

ขณะที่ก่อนเมฆทำการถ่ายเทประจุลงสู่พื้นดิน ประจุเดินทางผ่านอากาศด้วยกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดสูงทำให้อากาศรอบๆ ลําฟ้าผ่าแตกตัวกลายเป็นตัวนำที่มีค่าความต้านทานค่าหนึ่งขึ้นกับขนาดกระแสไฟฟ้า [4] โดยขนาดค่าความต้านทานลําฟ้าผ่าขึ้นกับขนาดกระแสหาได้ดังนี้

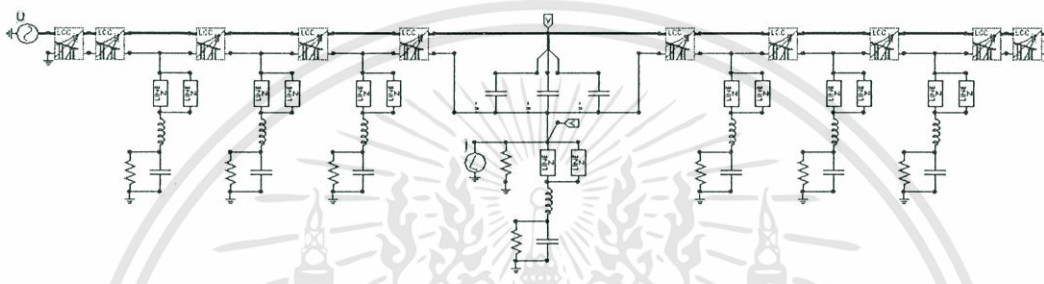
ตารางที่ 3.5 ค่าความต้านทานลําฟ้าผ่า

ขนาดกระแสไฟฟ้า (กิโลแอมแปร์)	10	20	30	40	50
ความต้านทานลําฟ้าผ่า (โอห์ม)	2000	1725	1450	1175	900

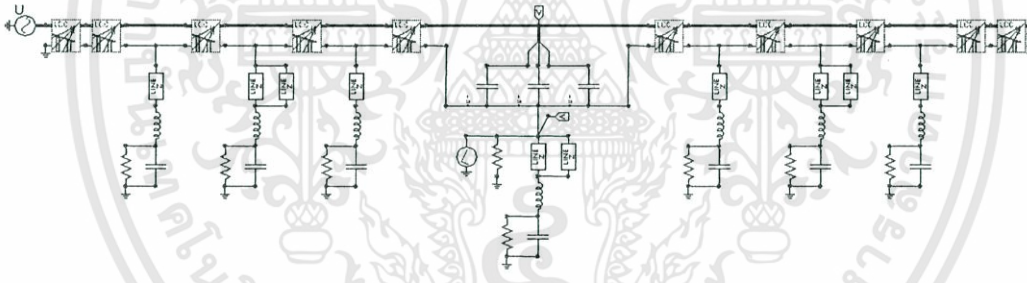
เมื่อได้ข้อมูลแบบจำลองอุปกรณ์ทั้งหมดข้างต้นจึงนำมาประกอบกันเป็นแบบจำลองของระบบ 69 กิโลโวลต์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์มีการจำลองการทำงานสำหรับ 4 กรณี ตามรูปแบบดังรูป 4.2 โดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ดังรูปที่ 3.19



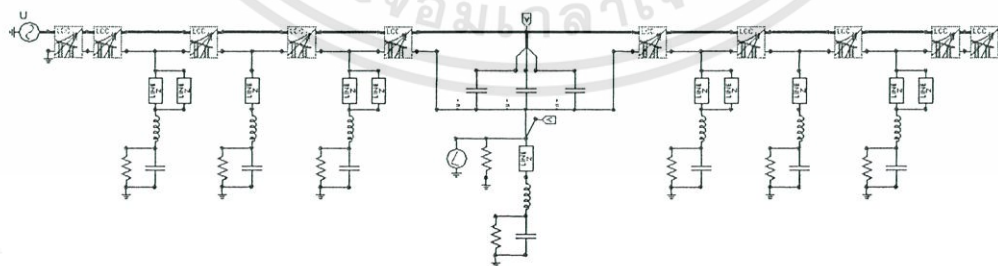
ก) ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา



ข) ติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้น



ค) ติดตั้งสายดินนอกเสาด้านเว้นต้น (ต้นที่ถูกฟ้าผ่าติดตั้งสายดินนอกเสา)



ง) ติดตั้งสายดินนอกเสาด้านเว้นต้น (ต้นที่ถูกฟ้าผ่าไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา)

รูปที่ 3.19 แบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ใช้ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

กระบวนการ และผลการวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะแบ่งกระบวนการวิเคราะห์ออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. วิเคราะห์ผลของกระแสฟ้าผ่าวิกฤต, ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับของการต่อเพิ่มสายดินนอกเสาตามรูปแบบ ก-ง ดังรูปที่ 4.2 ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม และเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 0.25-4 ไมโครวินาที เพื่อเลือกโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดตามหลักความคุ้มทุน ดังตารางที่ 4.1-4.17 และรูปที่ 4.1-4.6

ขั้นตอนที่ 2. นำผลจากขั้นตอนที่ 1. ที่ได้โครงสร้างที่เหมาะสมตามหลักความคุ้มทุน และนำโครงสร้างนั้นมาศึกษาผลของความต้านทานดินอิมพัลส์ ระยะห่างระหว่างเสา เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า และจำนวนฉนวนลูกถ้วย ที่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมพวงฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ดังตารางที่ 4.18-4.101 และรูปที่ 4.7-4.79

ขั้นตอนที่ 3. นำผลจากขั้นตอนที่ 2. มาศึกษาเปรียบเทียบผลของอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 0.25, 1, 2 และ 4 ไมโครวินาที ดังตารางที่ 4.102-4.110 และรูปที่ 4.80-4.88

ขั้นตอนที่ 4. นำผลจากขั้นตอนที่ 2. มาศึกษาเปรียบเทียบผลของอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80 และ 120 เมตร ดังตารางที่ 4.111-4.122 และรูปที่ 4.89-4.100

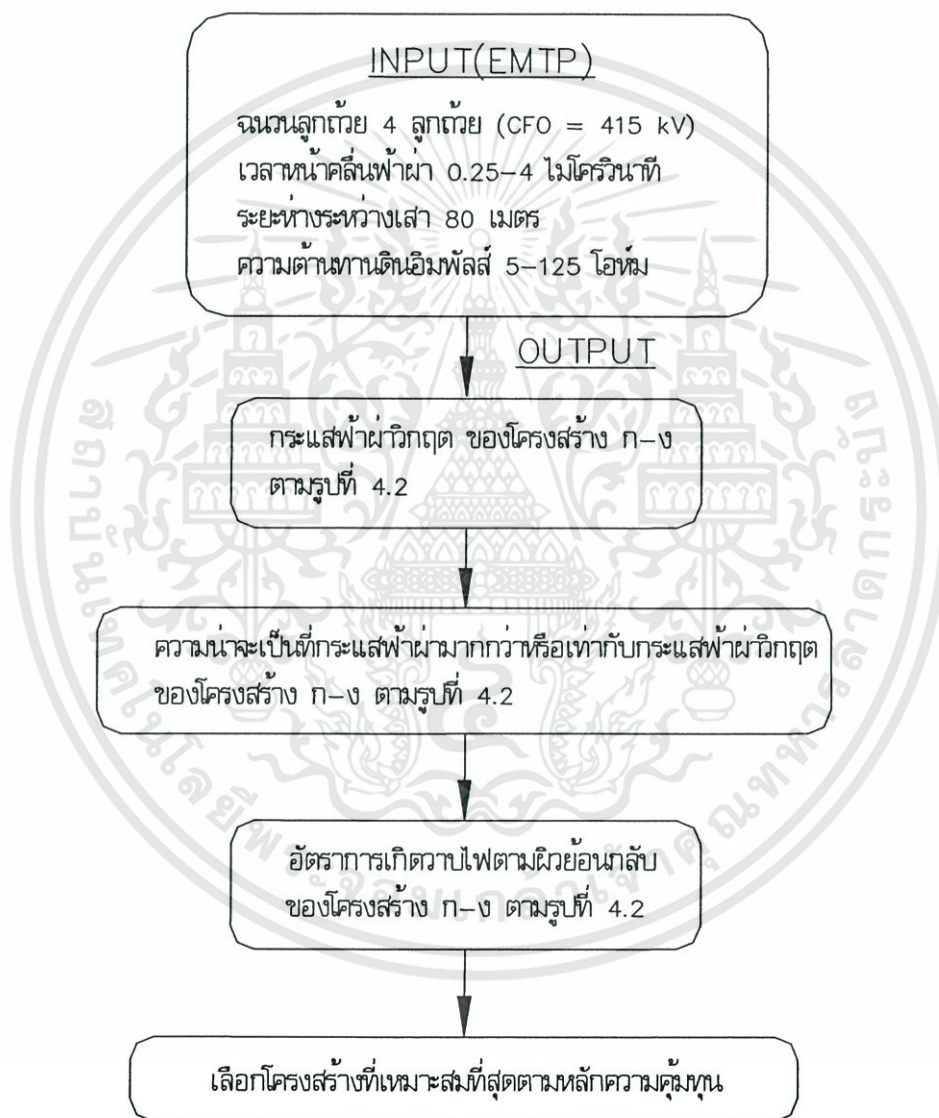
ขั้นตอนที่ 5. นำผลจากขั้นตอนที่ 2. มาศึกษาหาค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่จะทำให้ฉนวนลูกถ้วยไม่เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ดังตารางที่ 4.123-4.134

ในการทดลองขั้นตอนที่ 1-5 ได้จำลองโดยใช้กระแสฟ้าผ่าชั่วคราว ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา [6] พบว่าผลกระทบของกระแสฟ้าผ่าชั่วคราวมีมากกว่ากระแสฟ้าผ่าชั่วลบ แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการแสดงให้เห็นพฤติกรรมดังกล่าวจึงได้ออกแบบการจำลองในขั้นตอนที่ 6

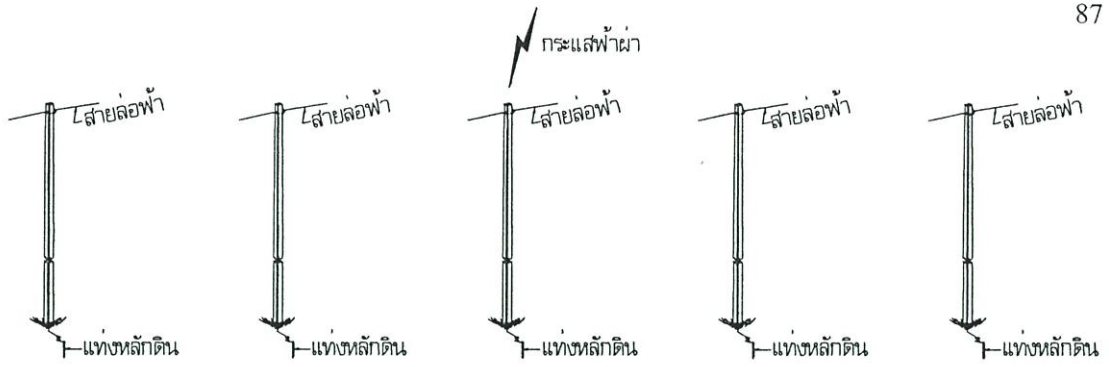
ขั้นตอนที่ 6. ศึกษาเปรียบเทียบผลของกระแสฟ้าผ่าชั่วคราว และกระแสฟ้าผ่าชั่วลบ ที่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ดังตารางที่ 4.135-4.136 และรูปที่ 4.101-4.102

4.1 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 1

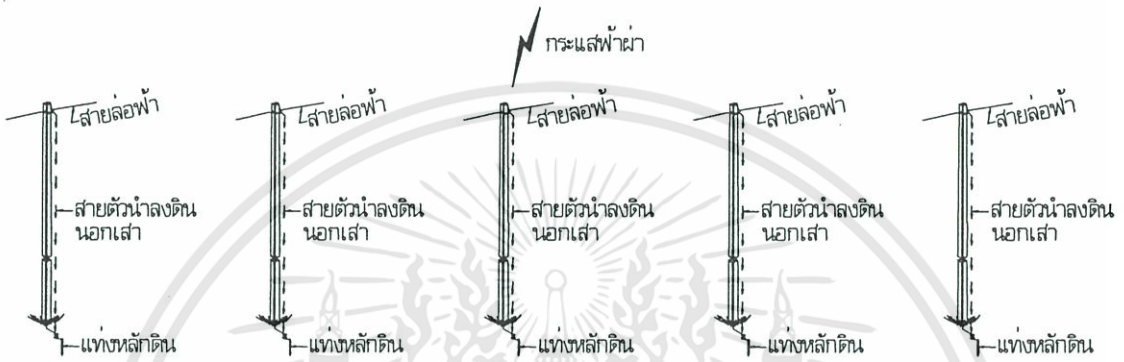
กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1 ดังรูปที่ 4.1 วิเคราะห์ผลของกระแสฟ้าผ่าวิกฤต, ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่า หรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับของรูปแบบการติดตั้งสายดินนอกเสาดังรูปที่ 4.2 ก-ง (ดูรายละเอียดโครงสร้างเพิ่มเติมได้ที่รูป 3.1) เพื่อเลือกโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดตามหลักความคุ้มค่า โดยจำลองป้อนข้อมูล (INPUT) ด้วยโปรแกรม EMTP เพื่อนำโครงสร้างที่เหมาะสมนั้นนำมาวิเคราะห์ผลเพิ่มเติมต่อไปในขั้นตอนที่ 2



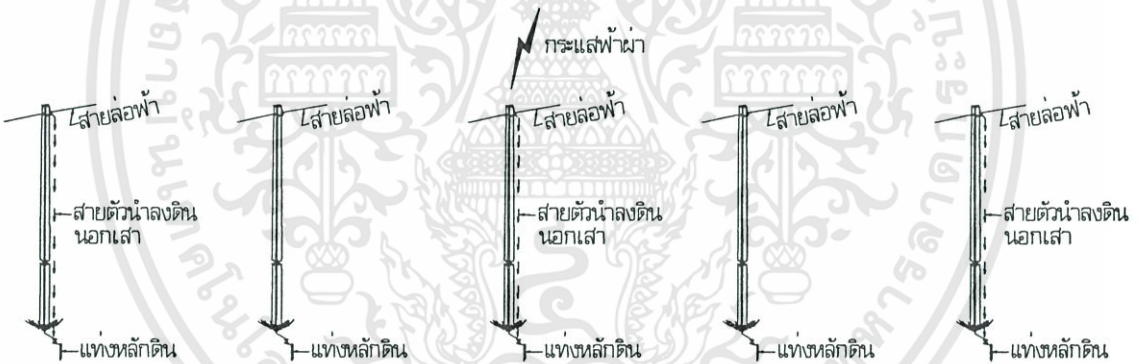
รูปที่ 4.1 กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1



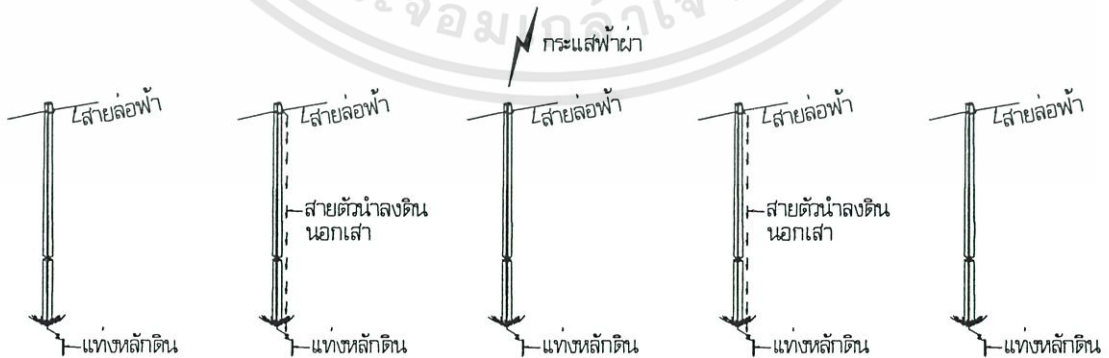
ก) ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา



ข) ติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้น



ค) ติดตั้งสายดินนอกเสาด้านเว้นด้าน (ต้นที่ถูกฟ้าผ่าติดตั้งสายดินนอกเสา)



ง) ติดตั้งสายดินนอกเสาด้านเว้นด้าน (ต้นที่ถูกฟ้าผ่าไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา)

รูปที่ 4.2 แสดงการติดตั้งสายดินนอกเสารูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ทั้งการเขียนเนื้อหาทั้งภาพและแผนภูมิ โดยผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่ 1

ตารางที่ 4.1 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่าวิกฤต (กิโลแอมแปร์)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	4.50	7.33	7.33	4.50
25	4.43	6.86	6.86	4.43
50	4.43	6.62	6.62	4.43
75	4.34	6.29	6.29	4.34
100	4.34	6.08	6.08	4.34
125	4.34	5.75	5.75	4.34

ตารางที่ 4.2 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต
ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่า หรือเท่ากับกระแสวิกฤต (%)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	99.88	99.47	99.47	99.88
25	99.89	99.57	99.57	99.89
50	99.89	99.62	99.62	99.89
75	99.90	99.67	99.67	99.90
100	99.90	99.71	99.71	99.90
125	99.90	99.75	99.75	99.90

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	4.90	4.88	4.88	4.90
25	4.90	4.89	4.89	4.90
50	4.90	4.89	4.89	4.90
75	4.90	4.89	4.89	4.90
100	4.90	4.90	4.90	4.90
125	4.90	4.90	4.90	4.90



โครงสร้าง ก. —□—
 โครงสร้าง ข. —△—
 โครงสร้าง ค. - - □ - -
 โครงสร้าง ง. - - △ - -

รูปที่ 4.3 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที

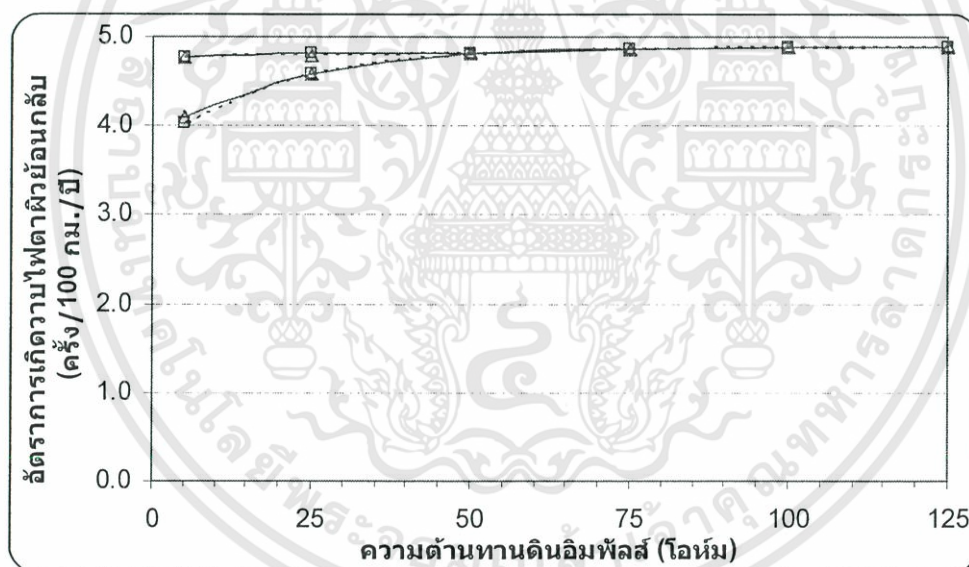
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่าวิกฤต (กิโลแอมแปร์)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	12.75	24.56	23.80	13.00
25	11.66	17.11	17.00	12.20
50	11.04	12.24	11.50	11.30
75	8.92	9.58	9.00	8.98
100	7.80	8.28	8.00	7.90
125	7.05	7.41	7.30	7.20

ตารางที่ 4.5 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่า หรือเท่ากับกระแสวิกฤต (%)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	97.16	81.87	83.26	96.99
25	97.83	93.24	93.36	97.51
50	98.16	97.49	97.92	98.03
75	99.04	98.80	99.01	99.02
100	99.36	99.24	99.31	99.34
125	99.53	99.46	99.48	99.50

ตารางที่ 4.6 ค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ ที่เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	4.77	4.02	4.09	4.76
25	4.80	4.58	4.58	4.79
50	4.82	4.79	4.81	4.81
75	4.86	4.85	4.86	4.86
100	4.88	4.87	4.88	4.88
125	4.89	4.88	4.88	4.89



โครงสร้าง ก. —□—
 โครงสร้าง ข. —△—
 โครงสร้าง ค. - -□- -
 โครงสร้าง ง. - -△- -

รูปที่ 4.4 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที

ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสไฟฟ้า ที่เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที

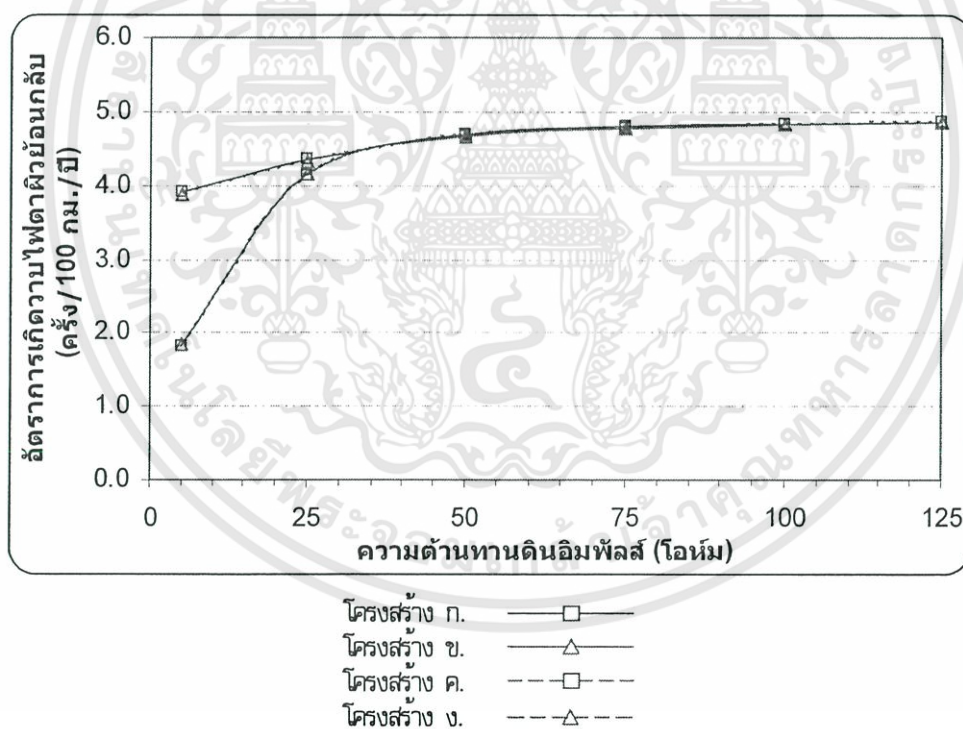
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าวิกฤต (กิโลแอมแปร์)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	25.70	47.50	47.00	26.00
25	20.40	23.30	23.00	21.00
50	15.00	15.80	15.70	15.20
75	12.20	12.60	12.50	12.40
100	10.50	10.80	10.70	10.65
125	9.45	9.65	9.50	9.50

ตารางที่ 4.8 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสไฟฟ้ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสไฟฟ้ามากกว่า หรือเท่ากับกระแสวิกฤต (%)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	79.69	37.03	37.79	79.10
25	88.90	84.16	84.68	87.99
50	95.39	94.64	94.73	95.21
75	97.51	97.26	97.33	97.39
100	98.42	98.28	98.33	98.35
125	98.86	98.78	98.84	98.84

ตารางที่ 4.9 ค่าอัตราการเกิดวายุไฟตามผิวย้อนกลับ ที่เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวายุไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	3.91	1.82	1.86	3.88
25	4.37	4.13	4.16	4.32
50	4.68	4.65	4.65	4.67
75	4.79	4.78	4.78	4.78
100	4.83	4.83	4.83	4.83
125	4.85	4.85	4.85	4.85



รูปที่ 4.5 แสดงค่าอัตราการเกิดวายุไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที

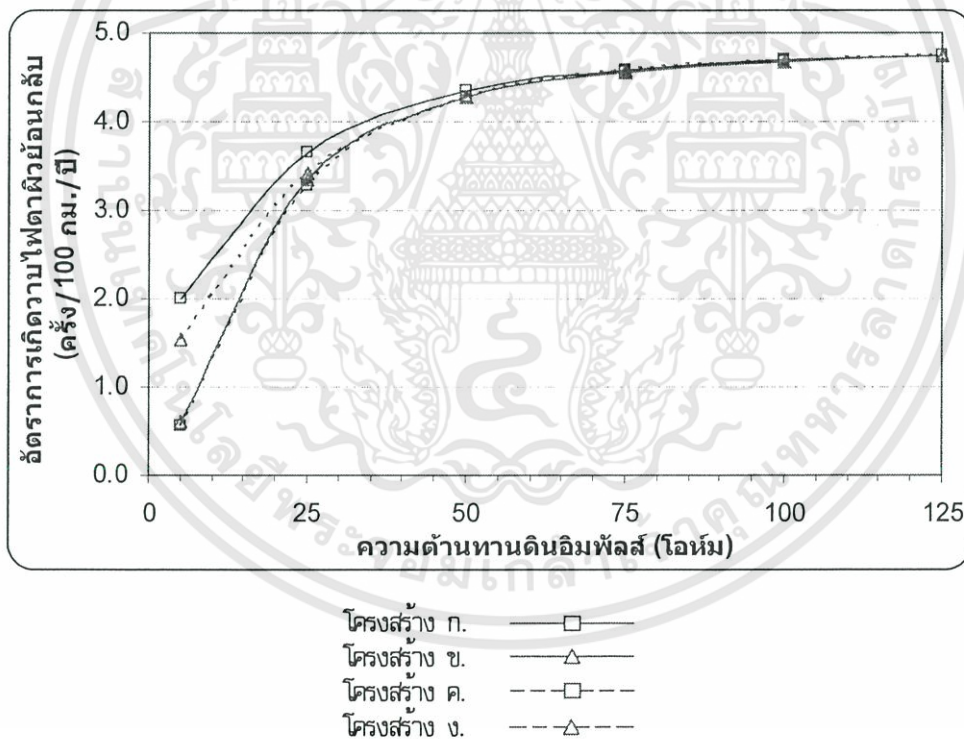
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าวิกฤต (กิโลแอมแปร์)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	45.20	78.00	75.50	51.50
25	28.30	31.80	31.30	30.50
50	20.70	21.50	21.50	21.50
75	17.00	17.50	17.30	17.10
100	14.80	15.00	15.00	15.00
125	13.30	13.40	13.40	13.40

ตารางที่ 4.11 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสไฟฟ้ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต ที่เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสไฟฟ้ามากกว่า หรือเท่ากับกระแสวิกฤต (%)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	40.67	11.27	12.32	31.41
25	74.44	67.02	68.09	69.80
50	88.45	87.20	87.20	87.20
75	93.36	92.79	93.02	93.25
100	95.57	95.39	95.39	95.39
125	96.78	96.71	96.71	96.71

ตารางที่ 4.12 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ ที่เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี)			
	4 ลูกถ้วย และระยะห่างเสา 80 เมตร			
	ก	ข	ค	ง
5	2.00	0.55	0.60	1.54
25	3.66	3.29	3.34	3.43
50	4.34	4.28	4.28	4.28
75	4.58	4.56	4.57	4.58
100	4.69	4.68	4.68	4.68
125	4.75	4.75	4.75	4.75



รูปที่ 4.6 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลเพื่อเลือกโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดตามหลักความคุ้มค่า

จากผลการวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่ 1 ตามตารางที่ 4.1-4.12 สรุปได้ว่าโครงสร้างที่ติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้น รูปที่ 4.2 (ข) ให้ผลของค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต, ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต และอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ ที่ใกล้เคียงกันกับโครงสร้างที่ติดตั้งสายดินนอกเสาด้านเว้นต้น (ต้นที่ถูกฟ้าผ่าติดตั้งสายดินนอกเสา) รูปที่ 4.2 (ค) และในทำนองเดียวกันโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสาตาม รูปที่ 4.2 (ก) ให้ผลที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างที่ติดตั้งสายดินนอกเสาด้านเว้นต้น (ต้นที่ถูกฟ้าผ่าไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา) รูปที่ 4.2 (ง) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากคลื่นสะท้อนฟ้าผ่าที่เดินทางมาหักล้างแรงดันค่ายอดเริ่มต้นที่หัวเสานั้น โดยมากเกิดคลื่นสะท้อนฟ้าผ่าที่ฐานเสาไฟฟ้า เนื่องจากมีระยะเดินทางไปกลับที่ใกล้กว่าเพียง 40 เมตร แต่สำหรับคลื่นสะท้อนฟ้าผ่าที่เสาข้างเคียงนั้นจะมีผลน้อยกว่าเนื่องจากต้องใช้เวลาเดินทางไปกลับของคลื่นที่ไกลกว่าคือ 160 เมตร จึงทำให้เดินทางมาหักล้างแรงดันค่ายอดได้ไม่ทัน จึงทำให้ได้ผลสรุปดังที่อธิบายข้างต้น

จากการวิเคราะห์ข้างต้นเมื่อพิจารณาที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 2 ไมโครวินาที โครงสร้าง ข. และ ค. สามารถลดอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวได้ประมาณ 50 % นั่นหมายถึงอาจสามารถลดอัตราการเกิดไฟฟ้าดับเนื่องจากฟ้าผ่าได้ประมาณ 50 % ด้วยเช่นกัน แต่สำหรับโครงสร้าง ค. นั้นต้องกำหนดให้ฟ้าผ่าลงเสาด้านที่ติดตั้งสายดินนอกเสาเท่านั้น จึงสามารถลดอัตราการเกิดไฟฟ้าดับได้ประมาณ 50 % ซึ่งในความเป็นจริงแล้วไม่สามารถที่จะกำหนดได้ว่าฟ้าผ่าจะผ่าลงที่เสาด้านใด ขึ้นกับโอกาสการเกิดฟ้าผ่าในแต่ละครั้ง ซึ่งอาจเป็นไปได้ที่จะผ่าลงเสาที่ไม่ต่อลงดินนอกเสาตาม โครงสร้าง ง. ซึ่งเปรียบเทียบไม่ได้มีการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา ตาม โครงสร้าง ก. ด้วย ดังนั้น อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับที่ลดลงของโครงสร้างที่ติดตั้งสายดินนอกเสาด้านเว้นต้น (โครงสร้าง ค. หรือ ง.) จะคิดเป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 โครงสร้าง ดังแสดงตารางที่ 4.17

สำหรับการพิจารณาเลือก โครงสร้างที่เหมาะสมตามหลักความคุ้มค่า นั้นจะพิจารณาราคาค่าติดตั้งสายดินนอกเสาของ โครงสร้าง ก-ง เปรียบเทียบกับผลกระทบเนื่องจากไฟฟ้าดับในแต่ละครั้งซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.14-4.17

ตารางที่ 4.13 อัตราความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเนื่องจากไฟฟ้าดับ

การไฟฟ้า	(Interrupted Energy Rate : IER) (บาท/kWh)	(Interruption Cost Per Event : ICPE) (บาท/ครั้ง)
การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.)	53.799	147,500
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.)	60.165	62,723
รวมทั้งประเทศ	60.348	64,991

หมายเหตุ สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ศึกษาผลกระทบเนื่องจากไฟฟ้าดับ เฉพาะปี 2541-2543 และไม่ได้ทำการศึกษาต่อในปีต่อมา ซึ่งปัจจุบันคาดว่ามีความสูงกว่านี้

ตารางที่ 4.14 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินความคุ้มค่าของการติดตั้งสายดินนอกเสา

พารามิเตอร์		
ความยาวสายส่ง 69 กิโลโวลต์ (ตาราง 2.2)	640,000	เมตร
ระยะห่างระหว่างเสา (ตามมาตรฐาน กฟน.)	80	เมตร
จำนวนเสาไฟฟ้าทั้งหมด (= 640,000 / 80)	8,000	ต้น
ราคาติดตั้งสายดินนอกเสา (ราคาสายรวมกับค่าแรง)		
- ลวดเหล็กเคลือบสังกะสีตีเกลียวขนาด 7.93 มิลลิเมตร ราคาขาย 30 บาท/เมตร ใช้ 20 เมตร = 30 x 20 = 600 บาท	1,000	บาทต่อต้น
- ค่าแรงประมาณ 400 บาทต่อต้น		
อัตราความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าจากไฟฟ้าดับ (ตาราง 4.13)	147,500	บาทต่อครั้ง
อัตราไฟฟ้าดับเนื่องจากฟ้าผ่า (ตาราง 2.2)	22	ครั้งต่อปี

ประมาณราคาค่าติดตั้งสายดินนอกเสา

- โครงสร้าง ก. (ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา) ราคาค่าติดตั้ง = 0 บาท
- โครงสร้าง ข. (ติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้น) ราคาค่าติดตั้ง = 1,000 x 8,000 = 8,000,000 บาท
- โครงสร้าง ค. และ ง. (ติดตั้งสายดินนอกเสาด้านเว้นต้น) ราคาค่าติดตั้ง = 1,000 x 4,000 = 4,000,000 บาท

ตารางที่ 4.15 สรุปประมาณราคาค่าติดตั้งสายดินนอกเสา

ราคาค่าติดตั้งสายดินนอกเสา (ล้านบาท)			
ก	ข	ค	ง
0	8	4	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณอัตราการความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ

โครงสร้าง ก. (ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา) และ โครงสร้าง ง. (ติดตั้งสายดินนอกเสาต้นเว้นต้น และต้นที่ถูกผ่าไม่ติดสายดินนอกเสา) สามารถคำนวณความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ ได้ดังนี้

ปีที่ 1	= 147,500 x 22 x 1 = 3,245,000 บาท
ปีที่ 2	= 147,500 x 22 x 2 = 6,490,000 บาท
ปีที่ 3	= 147,500 x 22 x 3 = 9,735,000 บาท
ปีที่ 4	= 147,500 x 22 x 4 = 12,980,000 บาท
ปีที่ 5	= 147,500 x 22 x 5 = 16,225,000 บาท
ปีที่ 6	= 147,500 x 22 x 6 = 19,470,000 บาท
ปีที่ 7	= 147,500 x 22 x 7 = 22,715,000 บาท
ปีที่ 8	= 147,500 x 22 x 8 = 25,960,000 บาท
ปีที่ 9	= 147,500 x 22 x 9 = 29,205,000 บาท
ปีที่ 10	= 147,500 x 22 x 10 = 32,450,000 บาท

-โครงสร้าง ข. (ติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้น) และ โครงสร้าง ค. (ติดตั้งสายดินนอกเสาต้นเว้นต้น และต้นที่ถูกผ่าติดสายดินนอกเสา) คำนวณความเสียหายจากไฟฟ้าดับ ได้ดังนี้

ปีที่ 1	= 147,500 x 22 x 1 x 0.5 = 1,622,500 บาท
ปีที่ 2	= 147,500 x 22 x 2 x 0.5 = 3,245,000 บาท
ปีที่ 3	= 147,500 x 22 x 3 x 0.5 = 4,867,500 บาท
ปีที่ 4	= 147,500 x 22 x 4 x 0.5 = 6,490,000 บาท
ปีที่ 5	= 147,500 x 22 x 5 x 0.5 = 8,112,500 บาท
ปีที่ 6	= 147,500 x 22 x 6 x 0.5 = 9,735,000 บาท
ปีที่ 7	= 147,500 x 22 x 7 x 0.5 = 11,357,500 บาท
ปีที่ 8	= 147,500 x 22 x 8 x 0.5 = 12,980,000 บาท
ปีที่ 9	= 147,500 x 22 x 9 x 0.5 = 14,602,500 บาท
ปีที่ 10	= 147,500 x 22 x 10 x 0.5 = 16,225,000 บาท

ตารางที่ 4.16 สรุปอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ

ปีที่	อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (ล้านบาท)			
	ก	ข	ค	ง
1	3.24	1.62	1.62	3.24
2	6.49	3.24	3.24	6.49
3	9.73	4.86	4.86	9.73
4	12.98	6.49	6.49	12.98
5	16.22	8.11	8.11	16.22
6	19.47	9.73	9.73	19.47
7	22.71	11.35	11.35	22.71
8	25.96	12.98	12.98	25.96
9	29.20	14.60	14.60	29.20
10	32.45	16.22	16.22	32.45

ตารางที่ 4.17 สรุปอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (คิดค่าเฉลี่ยของ โครงสร้าง ค. และ ง.)

ปีที่	อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (ล้านบาท)		
	ก	ข	ค่าเฉลี่ยของ ค. และ ง.
1	3.24	1.62	2.43
2	6.49	3.24	4.86
3	9.73	4.86	7.29
4	12.98	6.49	9.73
5	16.22	8.11	12.16
6	19.47	9.73	14.60
7	22.71	11.35	17.03
8	25.96	12.98	19.47
9	29.20	14.60	21.90
10	32.45	16.22	24.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสรุปได้ดังนี้

1) จากตารางที่ 4.17 ระยะเวลาคืนทุนของการต่อลงดินนอกเสาทุกต้น (โครงสร้าง ข.) ประมาณ 5 ปี เนื่องจากราคาค่าติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้นประมาณ 8 ล้านบาท (ตารางที่ 4.15) ใกล้เคียงอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับที่ลดลงประมาณ 8.11 ล้านบาท ($16.22 - 8.11 = 8.11$ ล้านบาท)

2) จากตารางที่ 4.17 ระยะเวลาคืนทุนของการต่อลงดินนอกเสาต้นเว้นต้น (โครงสร้าง ค. หรือ ง.) ประมาณ 5 ปี เนื่องจากราคาค่าติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้นประมาณ 4 ล้านบาท (ตารางที่ 4.15) ใกล้เคียงกับอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับที่ลดลงประมาณ 4.06 ล้านบาท ($16.22 - 12.16 = 4.06$ ล้านบาท)

3) จากข้อ 1 และ ข้อ 2 สรุปได้ว่าระยะเวลาคืนทุนของการต่อลงดินนอกเสาทุกต้น (โครงสร้าง ข.) และการต่อลงดินนอกเสาต้นเว้นต้น (โครงสร้าง ค. หรือ ง.) ประมาณ 5 ปี เท่ากัน อย่างไรก็ตามในปีที่ 6 เป็นต้นไปจะเห็นว่าการต่อลงดินนอกเสาทุกต้น (โครงสร้าง ข.) จะช่วยลดอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการต่อลงดินนอกเสาต้นเว้นต้น (โครงสร้าง ค. และ ง.) ดังตารางที่ 4.17

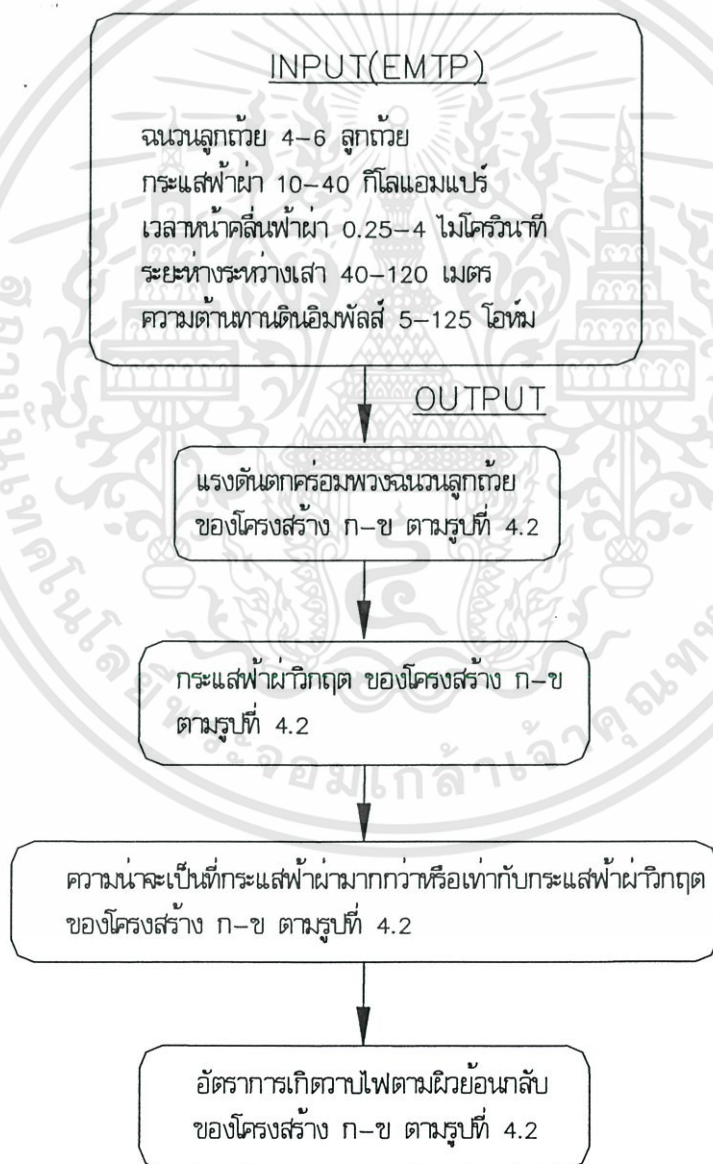
4) เนื่องจากผลกระทบเนื่องจากไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟฟ้าที่สถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังตารางที่ 4.13 ได้ศึกษาเฉพาะ ปี 2541-2543 และไม่ได้ทำการศึกษาต่อในปีต่อมา ซึ่งปัจจุบันคาดว่ามีความสูงเกินนี้มาก ซึ่งถ้าเป็นเช่นนั้นการต่อลงดินนอกเสาทุกต้น (โครงสร้าง ข.) จะช่วยลดอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้มากยิ่งขึ้นกว่าที่วิเคราะห์ตามข้อสรุปข้อที่ 3

5) จากผลสรุปข้างต้น และสมมติของการศึกษาที่ต้องการให้ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับความต่อเนื่องของการใช้ไฟฟ้ามายิ่งขึ้น จึงเลือกโครงสร้างที่ต่อเพิ่มสายดินนอกเสาทุกต้น (โครงสร้าง ข.) เป็นโครงสร้างเหมาะสมที่สุดตามหลักความคุ้มค่า และนำโครงสร้างนี้ไปวิเคราะห์ผลเพิ่มเติมต่อไปในขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

4.2 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 2

จากการวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่ 1 จะได้โครงสร้างติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้น รูปที่ 4.2 (ข) เป็นโครงสร้างที่เหมาะสมตามหลักความคุ้มทุน แต่เพื่อให้เห็นถึงผลดีของการต่อเพิ่มสายดินนอกเสาดังนั้นจะพิจารณาผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้น รูปที่ 4.2 (ข) กับ โครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสาดังตาม รูปที่ 4.2 (ก)

โดยทำการศึกษาผลของความต้านทานดินอิมพัลส์ ระยะห่างระหว่างเสา เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า และจำนวนจนวนลูกถ้วย ที่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมพวงจนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต และอัตราการเกิดควาปไฟตามผิวย้อนกลับ มีขั้นตอนการศึกษาตามรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่ 2

จากตารางที่ 4.18 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข

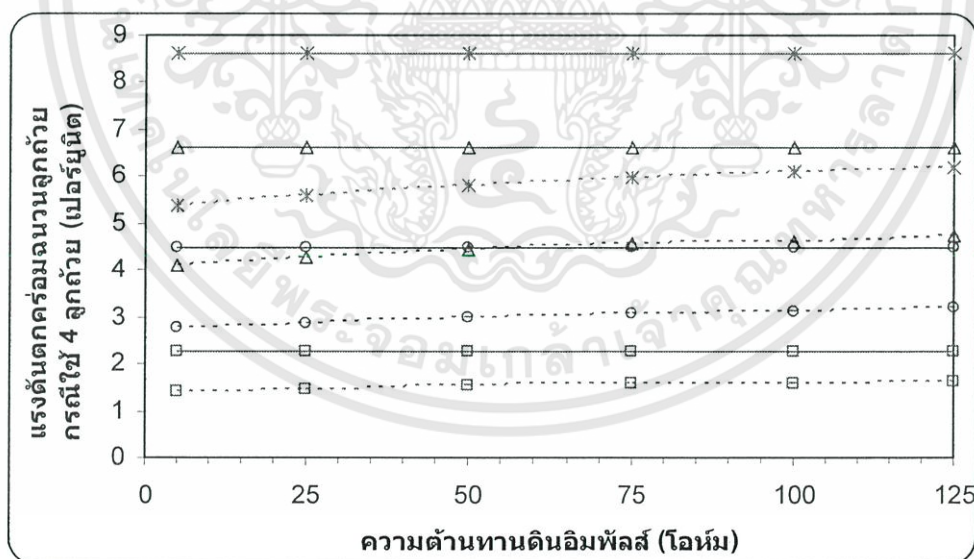
ตารางที่ 4.18 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	940	590	1850	1150	2740	1703	3581	2239
25	940	610	1850	1190	2740	1771	3581	2327
50	940	630	1850	1240	2740	1836	3581	2412
75	940	650	1850	1270	2740	1886	3581	2477
100	940	660	1850	1300	2740	1920	3581	2528
125	940	670	1850	1320	2740	1958	3581	2570

จากตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.8 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.18) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.19 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	2.27	1.42	4.46	2.77	6.60	4.10	8.63	5.40
25	2.27	1.47	4.46	2.87	6.60	4.27	8.63	5.61
50	2.27	1.52	4.46	2.99	6.60	4.42	8.63	5.81
75	2.27	1.57	4.46	3.06	6.60	4.54	8.63	5.97
100	2.27	1.59	4.46	3.13	6.60	4.63	8.63	6.09
125	2.27	1.61	4.46	3.18	6.60	4.72	8.63	6.19



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - □ - -

20 —○— - - ○ - -

30 —△— - - △ - -

40 —*— - - * - -

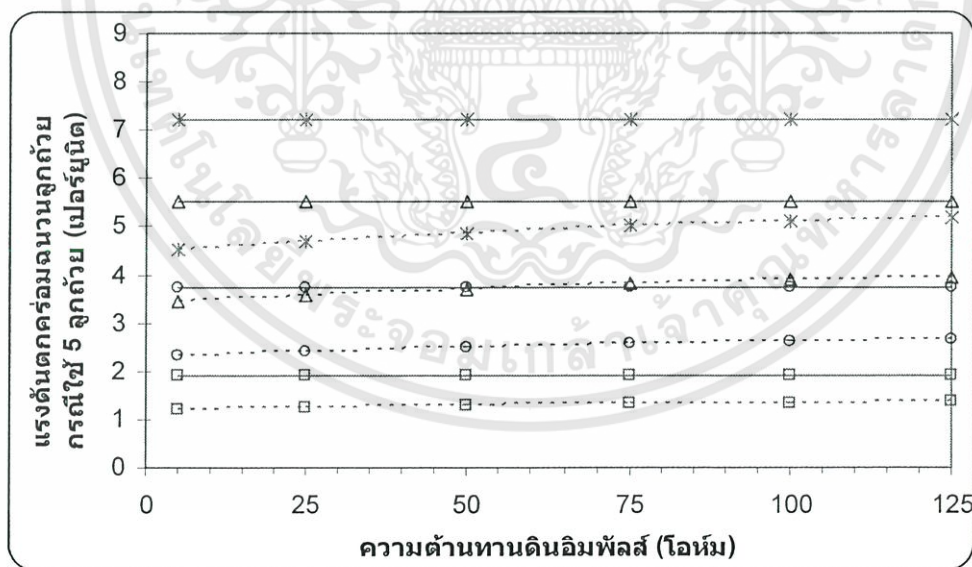
รูปที่ 4.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.9 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.18) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	1.90	1.19	3.74	2.32	5.54	3.44	7.23	4.52
25	1.90	1.23	3.74	2.40	5.54	3.58	7.23	4.70
50	1.90	1.27	3.74	2.51	5.54	3.71	7.23	4.87
75	1.90	1.31	3.74	2.57	5.54	3.81	7.23	5.00
100	1.90	1.33	3.74	2.63	5.54	3.88	7.23	5.11
125	1.90	1.35	3.74	2.67	5.54	3.96	7.23	5.19



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - □ - -

20 —○— - - ○ - -

30 —△— - - △ - -

40 —*— - - * - -

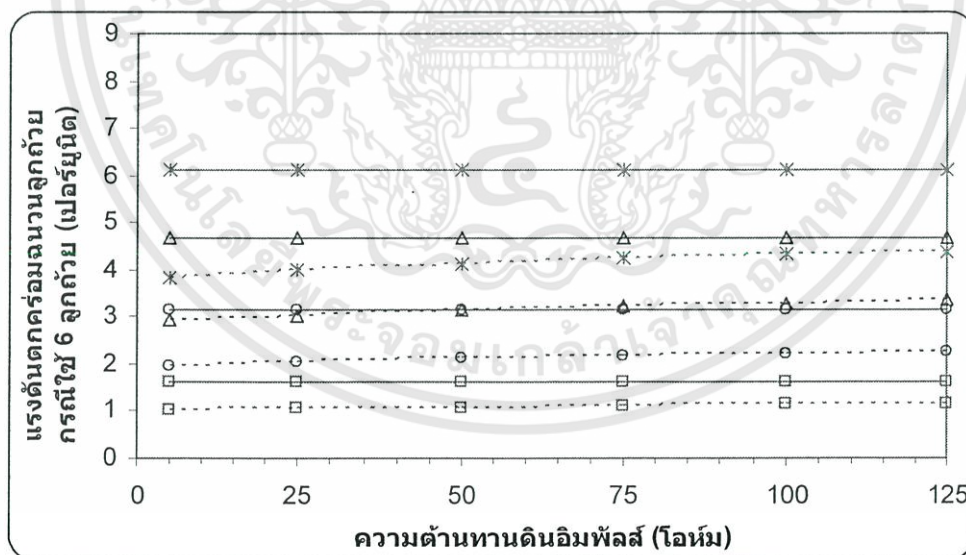
รูปที่ 4.9 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.10 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.18) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.21 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	1.61	1.01	3.16	1.97	4.68	2.91	6.12	3.83
25	1.61	1.04	3.16	2.03	4.68	3.03	6.12	3.98
50	1.61	1.08	3.16	2.12	4.68	3.14	6.12	4.12
75	1.61	1.11	3.16	2.17	4.68	3.22	6.12	4.23
100	1.61	1.13	3.16	2.22	4.68	3.28	6.12	4.32
125	1.61	1.15	3.16	2.26	4.68	3.35	6.12	4.39



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— ---□---

20 —○— ---○---

30 —△— ---△---

40 —*— ---*---

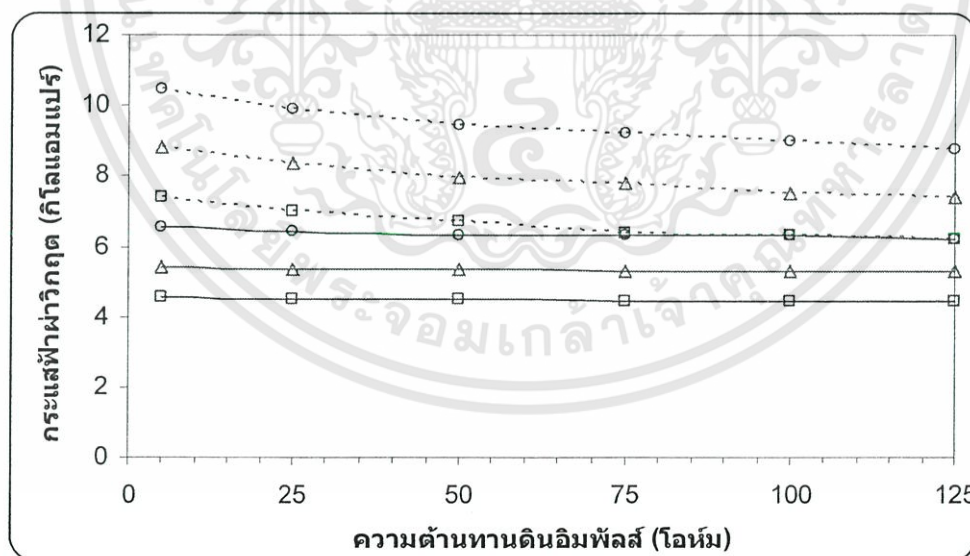
รูปที่ 4.10 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.11 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ่าวิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.22 ค่ากระแสไฟฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าผ่าวิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.54	7.41	5.42	8.84	6.53	10.54
25	4.49	6.97	5.35	8.39	6.41	9.91
50	4.49	6.69	5.35	7.98	6.32	9.44
75	4.41	6.38	5.27	7.80	6.32	9.21
100	4.41	6.29	5.27	7.50	6.32	9.00
125	4.41	6.19	5.27	7.39	6.22	8.73



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 4 —□— □ —
 5 —△— △ —
 6 —○— ○ —

รูปที่ 4.11 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.12 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับ กระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของ ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตรและเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก.และ ข.

ตารางที่ 4.23 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	99.88	99.46	99.79	99.07	99.63	98.44
25	99.88	99.55	99.80	99.21	99.65	98.68
50	99.88	99.60	99.80	99.32	99.67	98.86
75	99.89	99.66	99.81	99.37	99.67	98.94
100	99.89	99.67	99.81	99.44	99.67	99.01
125	99.89	99.69	99.81	99.46	99.68	99.10



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 4 —□— —□—
 5 —△— —△—
 6 —○— —○—

รูปที่ 4.12 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.13 แสดงค่าอัตราการเกิดวามไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.24 ค่าอัตราการเกิดวามไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวามไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.90	4.88	4.90	4.86	4.89	4.83
25	4.90	4.89	4.90	4.87	4.89	4.85
50	4.90	4.89	4.90	4.88	4.89	4.85
75	4.90	4.89	4.90	4.88	4.89	4.86
100	4.90	4.89	4.90	4.88	4.89	4.86
125	4.90	4.89	4.90	4.88	4.89	4.87



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— □ —□—
 5 —△— △ —△—
 6 —○— ○ —○—

รูปที่ 4.13 แสดงค่าอัตราการเกิดวามไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.25 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข

ตารางที่ 4.25 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที

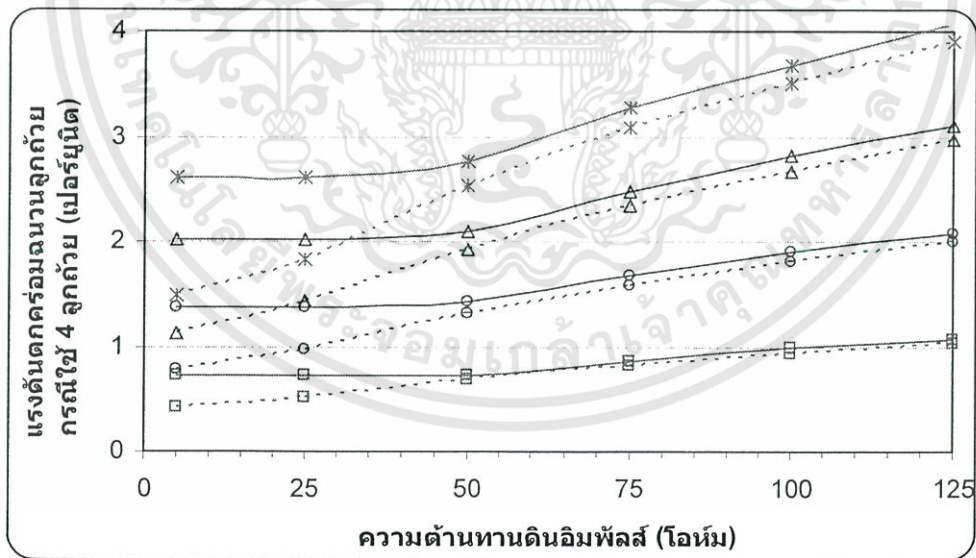
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	299	174	570	323	834	469	1086	613
25	299	213	570	402	834	591	1086	762
50	304	281	591	543	872	800	1150	1054
75	357	339	697	656	1030	969	1359	1277
100	408	389	789	751	1167	1110	1524	1455
125	444	428	862	829	1286	1230	1695	1620

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.14 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.25) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.26 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.72	0.42	1.37	0.78	2.01	1.13	2.62	1.48
25	0.72	0.51	1.37	0.97	2.01	1.42	2.62	1.84
50	0.73	0.68	1.42	1.31	2.10	1.93	2.77	2.54
75	0.86	0.82	1.68	1.58	2.48	2.33	3.27	3.08
100	0.98	0.94	1.90	1.81	2.81	2.67	3.67	3.51
125	1.07	1.03	2.08	2.00	3.10	2.96	4.08	3.90



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
10	—□—	---□---
20	—○—	---○---
30	—△—	---△---
40	—*—	---*---

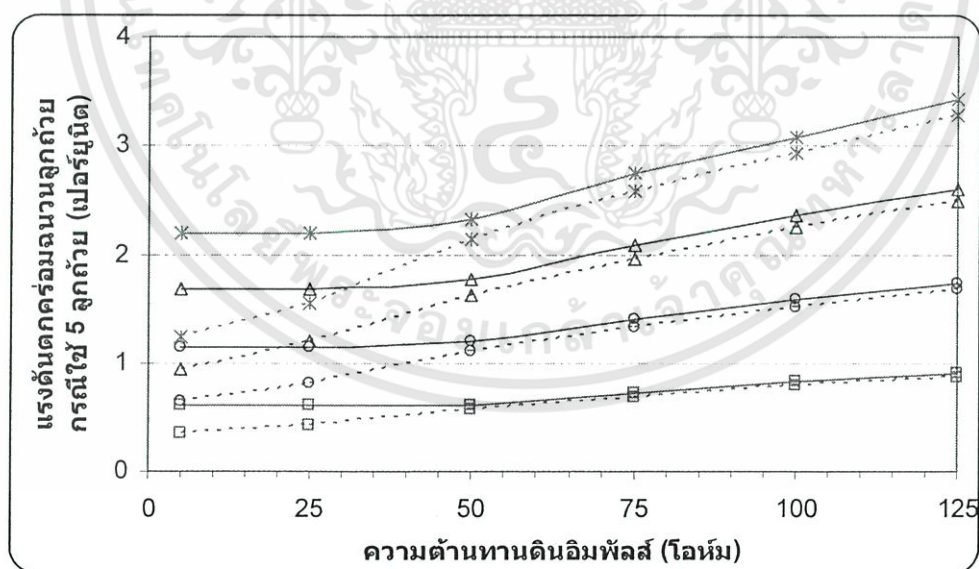
รูปที่ 4.14 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.27 และรูปที่ 4.15 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.25) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.27 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.60	0.35	1.15	0.65	1.68	0.95	2.19	1.24
25	0.60	0.43	1.15	0.81	1.68	1.19	2.19	1.54
50	0.61	0.57	1.19	1.10	1.76	1.62	2.32	2.13
75	0.72	0.68	1.41	1.33	2.08	1.96	2.75	2.58
100	0.82	0.79	1.59	1.52	2.36	2.24	3.08	2.94
125	0.90	0.86	1.74	1.67	2.60	2.48	3.42	3.27



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

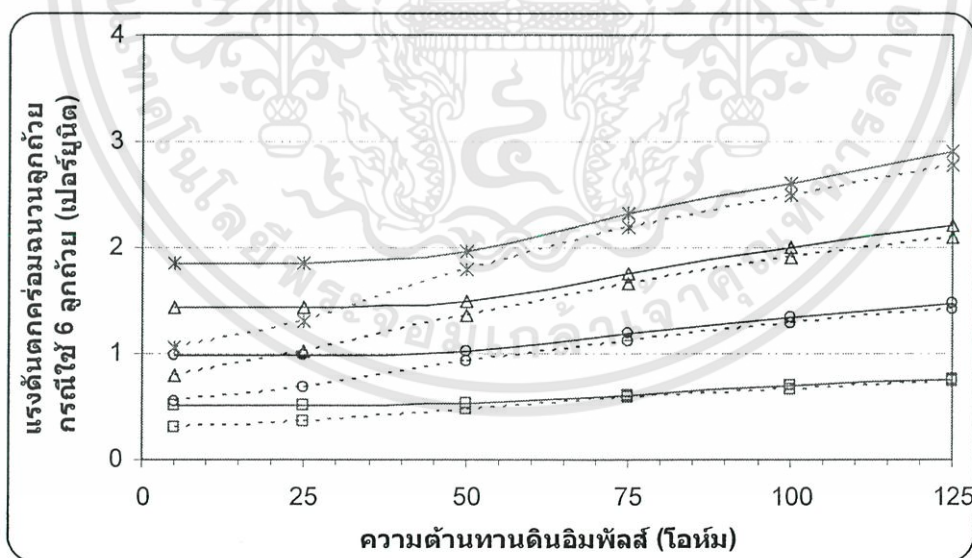
10 —□— □ —□—
 20 —○— ○ —○—
 30 —△— △ —△—
 40 —*— * —*—

รูปที่ 4.15 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.28 และรูปที่ 4.16 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.25) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.28 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.51	0.30	0.97	0.55	1.43	0.80	1.86	1.05
25	0.51	0.36	0.97	0.69	1.43	1.01	1.86	1.30
50	0.52	0.48	1.01	0.93	1.49	1.37	1.97	1.80
75	0.61	0.58	1.19	1.12	1.76	1.66	2.32	2.18
100	0.70	0.66	1.35	1.28	1.99	1.90	2.61	2.49
125	0.76	0.73	1.47	1.42	2.20	2.10	2.90	2.77



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
10	—□—	---□---
20	—○—	---○---
30	—△—	---△---
40	—*—	---*---

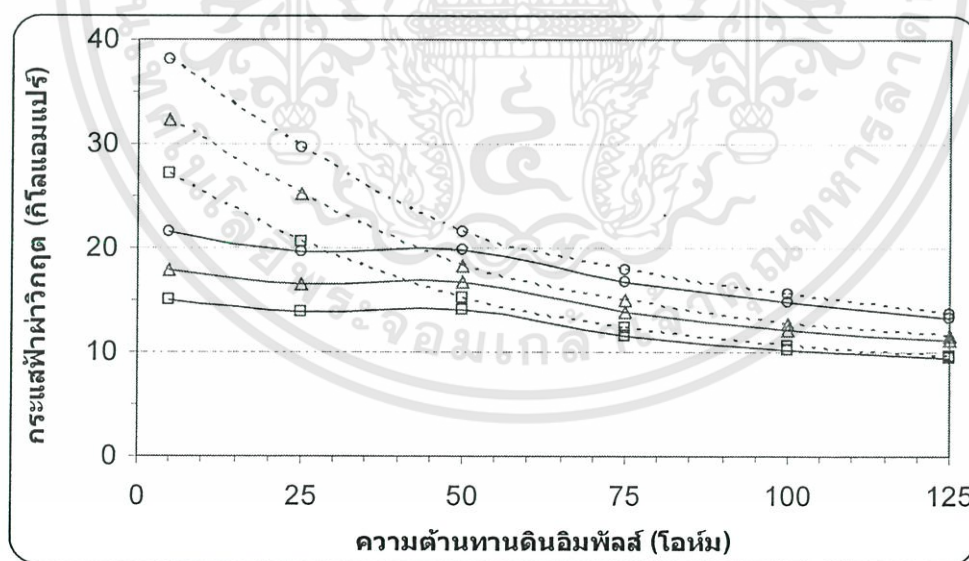
รูปที่ 4.16 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.29 และรูปที่ 4.17 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.29 ค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าวิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	14.93	27.08	17.81	32.30	21.55	38.17
25	13.88	20.65	16.56	25.13	19.57	29.70
50	14.04	15.29	16.75	18.23	19.80	21.55
75	11.62	12.24	13.87	15.09	16.79	17.84
100	10.17	10.67	12.13	12.72	14.83	15.58
125	9.35	9.70	11.15	11.57	13.18	13.67



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— - - □ - -

5 —△— - - △ - -

6 —○— - - ○ - -

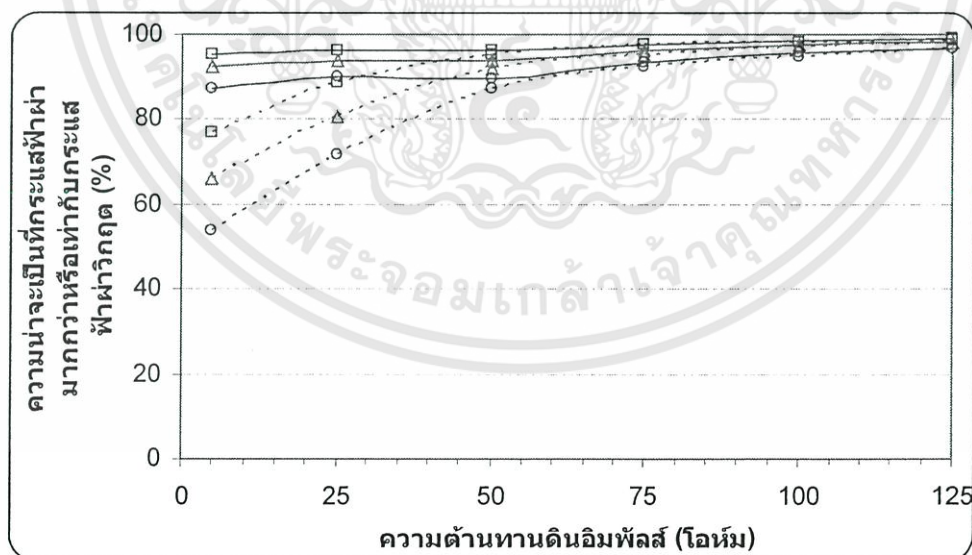
รูปที่ 4.17 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.30 และรูปที่ 4.18 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับ กระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของ ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.30 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	95.46	76.95	92.42	65.94	87.12	53.61
25	96.34	88.53	93.85	80.79	90.11	71.51
50	96.21	95.13	93.64	91.89	89.78	87.12
75	97.85	97.49	96.35	95.31	93.60	92.38
100	98.57	98.34	97.56	97.18	95.55	94.85
125	98.89	98.76	98.11	97.88	96.87	96.50



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 4 —□— - - □ - -
 5 —△— - - △ - -
 6 —○— - - ○ - -

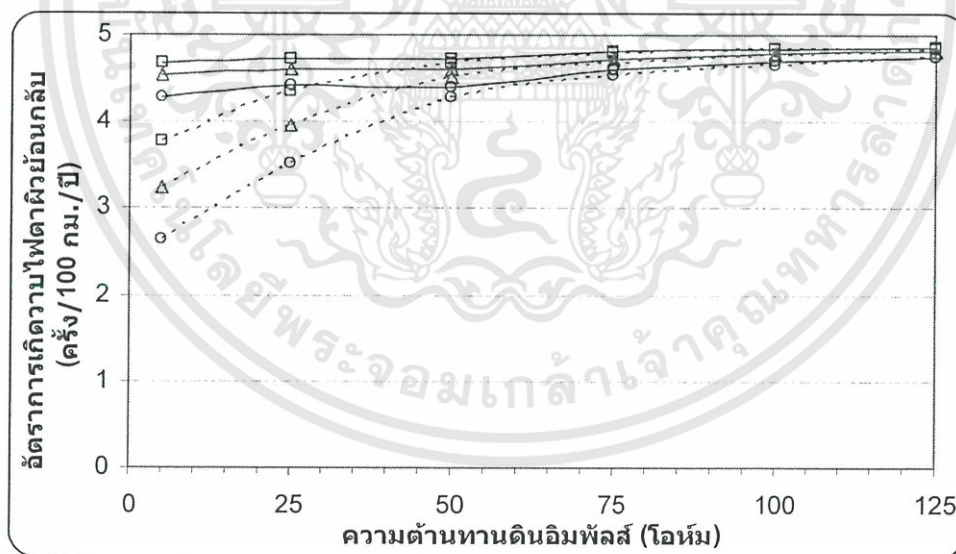
รูปที่ 4.18 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.31 และรูปที่ 4.19 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.31 ค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.69	3.78	4.54	3.24	4.28	2.63
25	4.73	4.35	4.61	3.97	4.42	3.51
50	4.72	4.67	4.60	4.51	4.41	4.28
75	4.80	4.79	4.73	4.68	4.60	4.54
100	4.84	4.83	4.79	4.77	4.69	4.66
125	4.86	4.85	4.82	4.81	4.76	4.74



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— - - □ - -

5 —△— - - △ - -

6 —○— - - ○ - -

รูปที่ 4.19 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.32 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข

ตารางที่ 4.32 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที

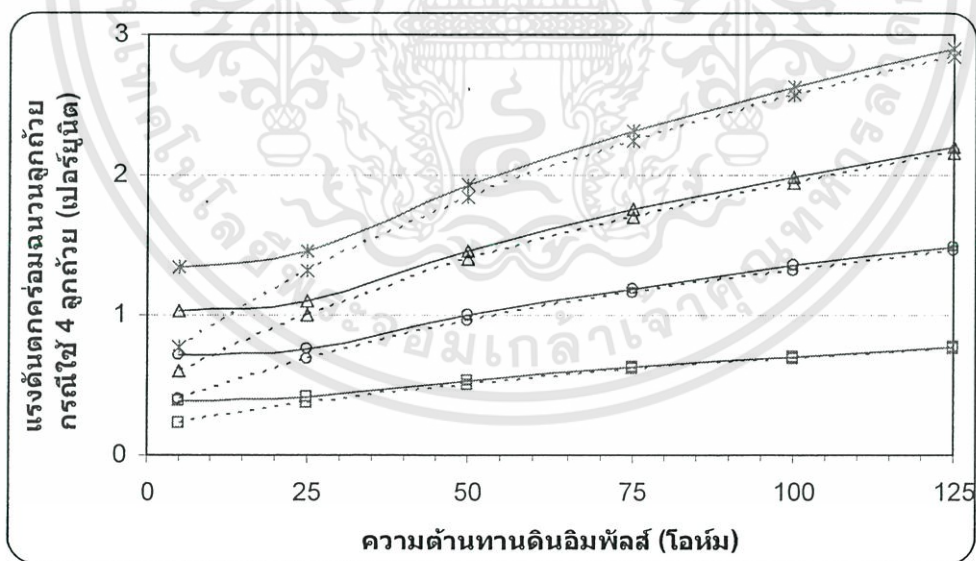
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	160	95	295	166	426	247	555	318
25	169	155	314	285	459	415	602	545
50	219	210	414	396	607	581	799	764
75	259	252	494	480	727	706	958	930
100	292	287	561	548	827	808	1090	1065
125	322	316	618	607	913	896	1203	1181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.33 และรูปที่ 4.20 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.32) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.33 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.39	0.23	0.71	0.40	1.03	0.60	1.34	0.77
25	0.41	0.37	0.76	0.69	1.11	1.00	1.45	1.31
50	0.53	0.51	1.00	0.95	1.46	1.40	1.93	1.84
75	0.62	0.61	1.19	1.16	1.75	1.70	2.31	2.24
100	0.70	0.69	1.35	1.32	1.99	1.95	2.63	2.57
125	0.78	0.76	1.49	1.46	2.20	2.16	2.90	2.85



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
10	—□—	---□---
20	—○—	---○---
30	—△—	---△---
40	—*—	---*---

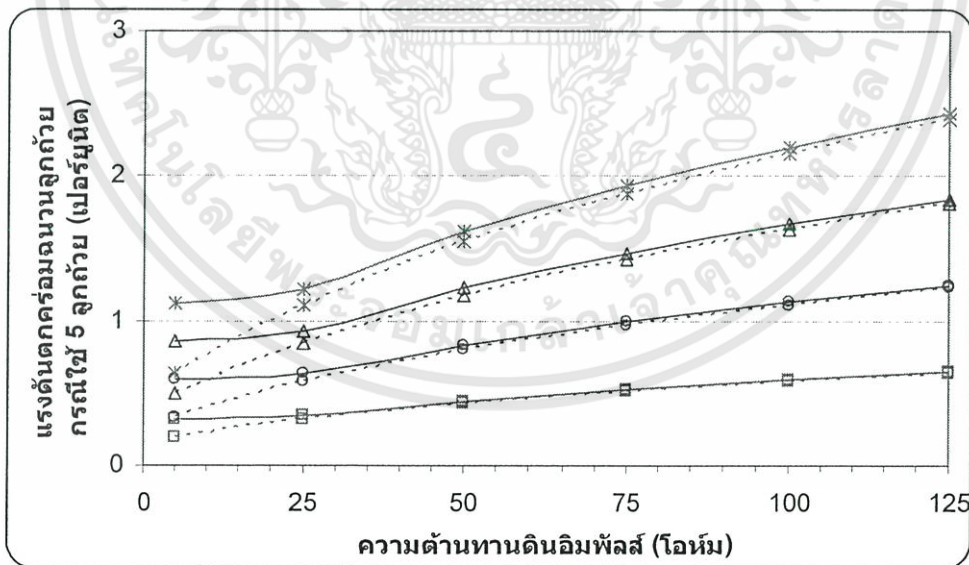
รูปที่ 4.20 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.34 และรูปที่ 4.21 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.32) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.34 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.32	0.19	0.60	0.34	0.86	0.50	1.12	0.64
25	0.34	0.31	0.63	0.58	0.93	0.84	1.22	1.10
50	0.44	0.42	0.84	0.80	1.23	1.17	1.61	1.54
75	0.52	0.51	1.00	0.97	1.47	1.43	1.94	1.88
100	0.59	0.58	1.13	1.11	1.67	1.63	2.20	2.15
125	0.65	0.64	1.25	1.23	1.84	1.81	2.43	2.39



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
10	—□—	---□---
20	—○—	---○---
30	—△—	---△---
40	—*—	---*---

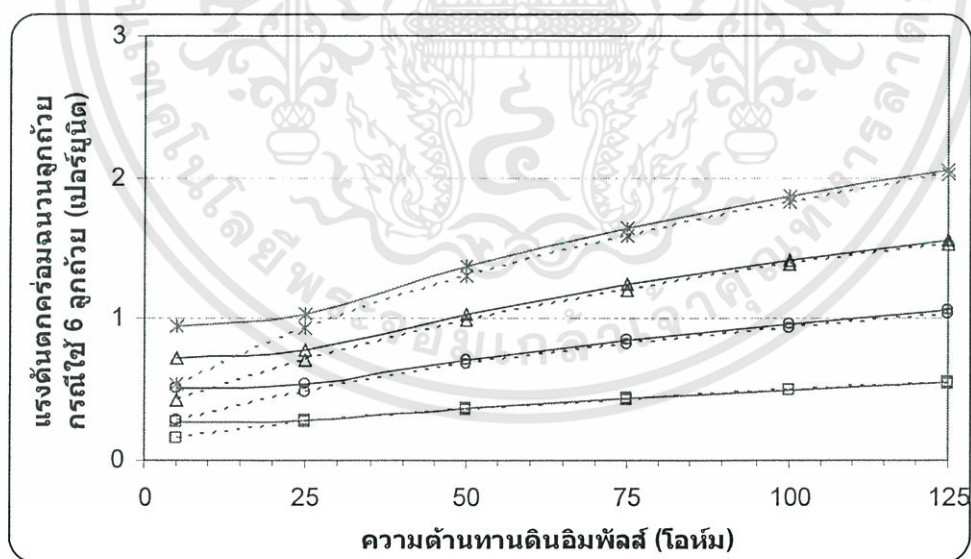
รูปที่ 4.21 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.35 และรูปที่ 4.22 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.32) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.35 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.27	0.16	0.50	0.28	0.73	0.42	0.95	0.54
25	0.29	0.26	0.54	0.49	0.78	0.71	1.03	0.93
50	0.37	0.36	0.71	0.68	1.04	0.99	1.37	1.31
75	0.44	0.43	0.84	0.82	1.24	1.21	1.64	1.59
100	0.50	0.49	0.96	0.94	1.41	1.38	1.86	1.82
125	0.55	0.54	1.06	1.04	1.56	1.53	2.06	2.02



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— □ —□—
 20 —○— ○ —○—
 30 —△— △ —△—
 40 —*— * —*—

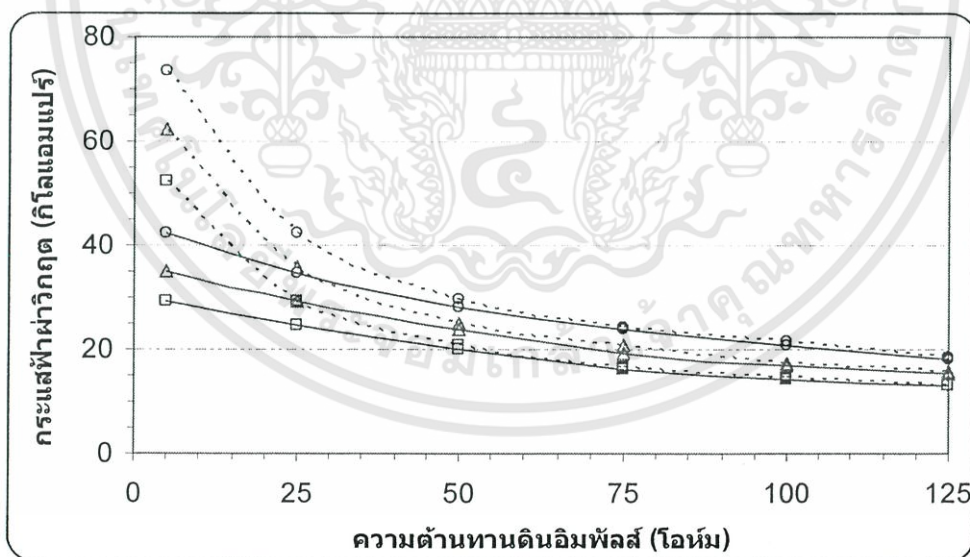
รูปที่ 4.22 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.36 และรูปที่ 4.23 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ้วิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้าผ้ว ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.36 ค่ากระแสไฟฟ้าผ้วิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าผ้วิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	29.23	52.20	34.86	62.26	42.16	73.58
25	24.56	29.12	29.29	35.78	34.62	42.29
50	20.05	20.96	23.91	25.00	28.26	29.55
75	16.02	16.47	19.11	20.63	23.68	24.38
100	14.21	14.46	16.95	17.25	20.86	21.35
125	12.89	13.13	15.37	15.66	18.17	18.51



จำนวนลูกถ้วย	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
4	—□—	---□---
5	—△—	---△---
6	—○—	---○---

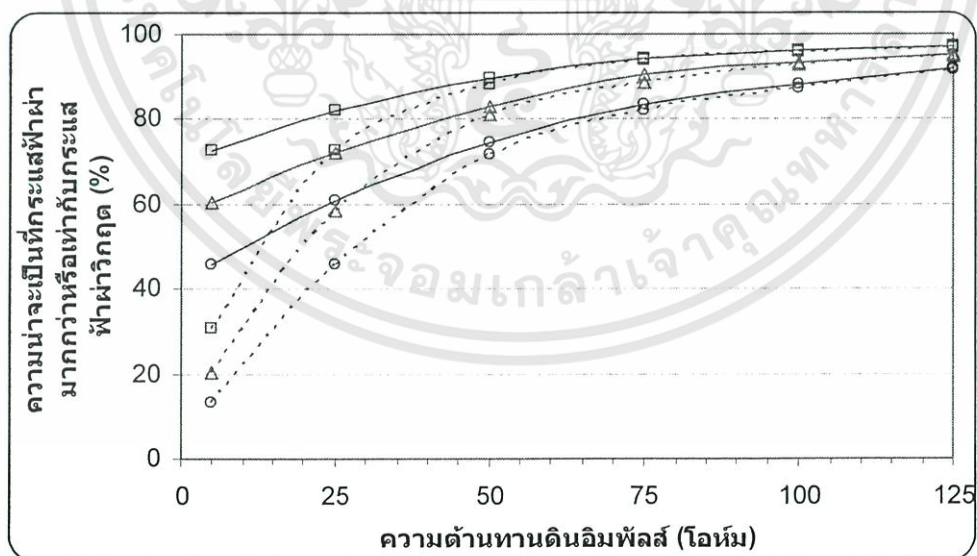
รูปที่ 4.23 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ้วิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.37 และรูปที่ 4.24 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.37 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	72.51	30.52	60.47	20.30	45.94	13.20
25	81.87	72.72	72.37	58.52	60.99	45.71
50	89.42	88.05	83.06	81.04	74.53	71.83
75	94.41	93.95	90.74	88.56	83.47	82.21
100	96.07	95.87	93.42	93.08	88.21	87.43
125	97.07	96.90	95.05	94.77	91.97	91.53



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 4 —□— —□—
 5 —△— —△—
 6 —○— —○—

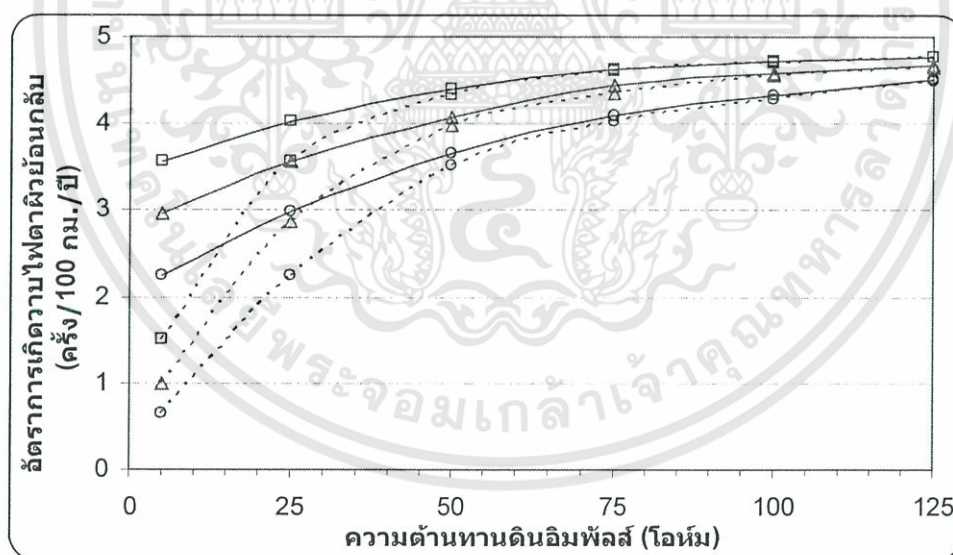
รูปที่ 4.24 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.38 และรูปที่ 4.25 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.38 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	3.56	1.50	2.97	1.00	2.26	0.65
25	4.02	3.57	3.55	2.87	2.99	2.24
50	4.39	4.32	4.08	3.98	3.66	3.53
75	4.64	4.61	4.46	4.35	4.10	4.04
100	4.72	4.71	4.59	4.57	4.33	4.29
125	4.77	4.76	4.67	4.65	4.52	4.49



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— □ —□—

5 —△— △ —△—

6 —○— ○ —○—

รูปที่ 4.25 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.39 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข

ตารางที่ 4.39 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที

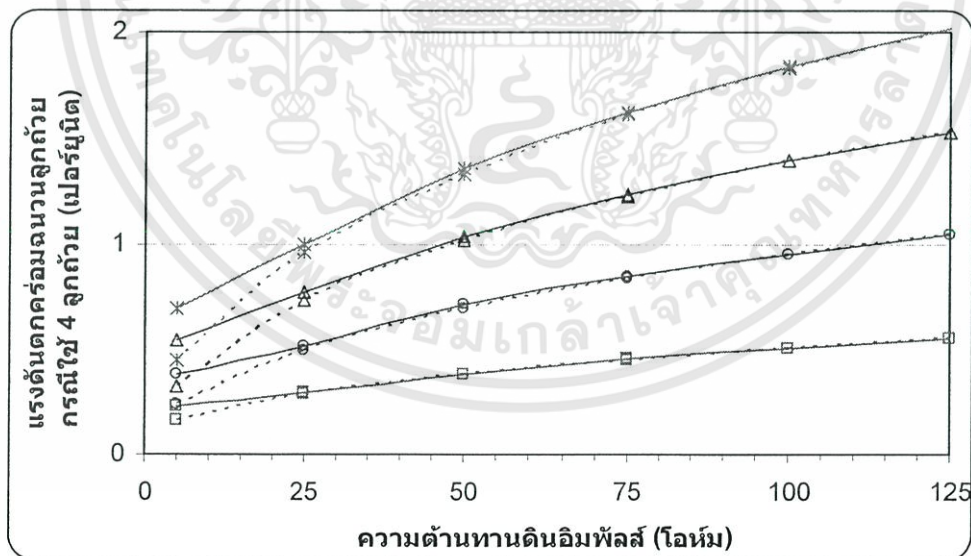
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	93	65	159	99	226	135	289	185
25	122	117	212	205	318	304	415	396
50	159	157	295	289	429	421	563	552
75	187	186	350	347	513	507	674	667
100	210	209	395	393	580	577	763	759
125	228	228	432	432	635	634	836	835

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.40 และรูปที่ 4.26 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.39) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.40 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.22	0.16	0.38	0.24	0.54	0.33	0.70	0.45
25	0.29	0.28	0.51	0.49	0.77	0.73	1.00	0.95
50	0.38	0.38	0.71	0.70	1.03	1.01	1.36	1.33
75	0.45	0.45	0.84	0.84	1.24	1.22	1.62	1.61
100	0.51	0.50	0.95	0.95	1.40	1.39	1.84	1.83
125	0.55	0.55	1.04	1.04	1.53	1.53	2.01	2.01



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - □ - -

20 —○— - - ○ - -

30 —△— - - △ - -

40 —*— - - * - -

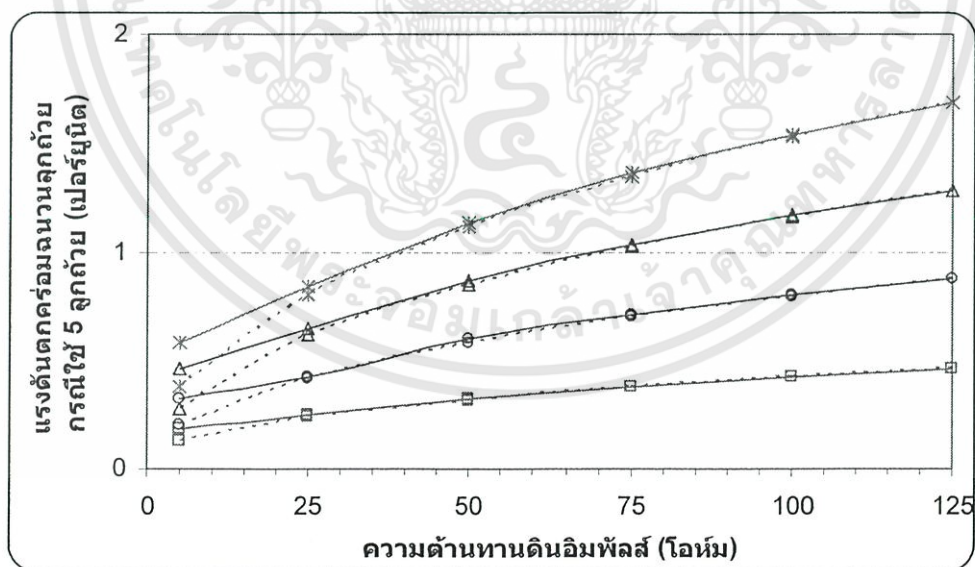
รูปที่ 4.26 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.41 และรูปที่ 4.27 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.39) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.41 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.19	0.13	0.32	0.20	0.46	0.27	0.58	0.37
25	0.25	0.24	0.43	0.41	0.64	0.61	0.84	0.80
50	0.32	0.32	0.60	0.58	0.87	0.85	1.14	1.12
75	0.38	0.38	0.71	0.70	1.04	1.02	1.36	1.35
100	0.42	0.42	0.80	0.79	1.17	1.17	1.54	1.53
125	0.46	0.46	0.87	0.87	1.28	1.28	1.69	1.69



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
10	—□—	---□---
20	—○—	---○---
30	—△—	---△---
40	—*—	---*---

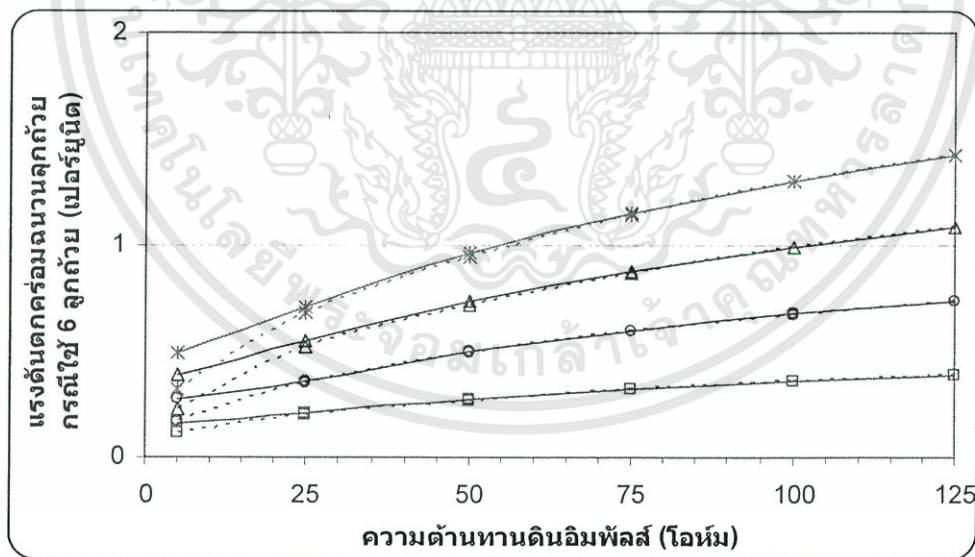
รูปที่ 4.27 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้มาเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.42 และรูปที่ 4.28 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.39) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.42 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.16	0.11	0.27	0.17	0.39	0.23	0.49	0.32
25	0.21	0.20	0.36	0.35	0.54	0.52	0.71	0.68
50	0.27	0.27	0.50	0.49	0.73	0.72	0.96	0.94
75	0.32	0.32	0.60	0.59	0.88	0.87	1.15	1.14
100	0.36	0.36	0.68	0.67	0.99	0.99	1.30	1.30
125	0.39	0.39	0.74	0.74	1.09	1.08	1.43	1.43



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
10	—□—	---□---
20	—○—	---○---
30	—△—	---△---
40	—*—	---*---

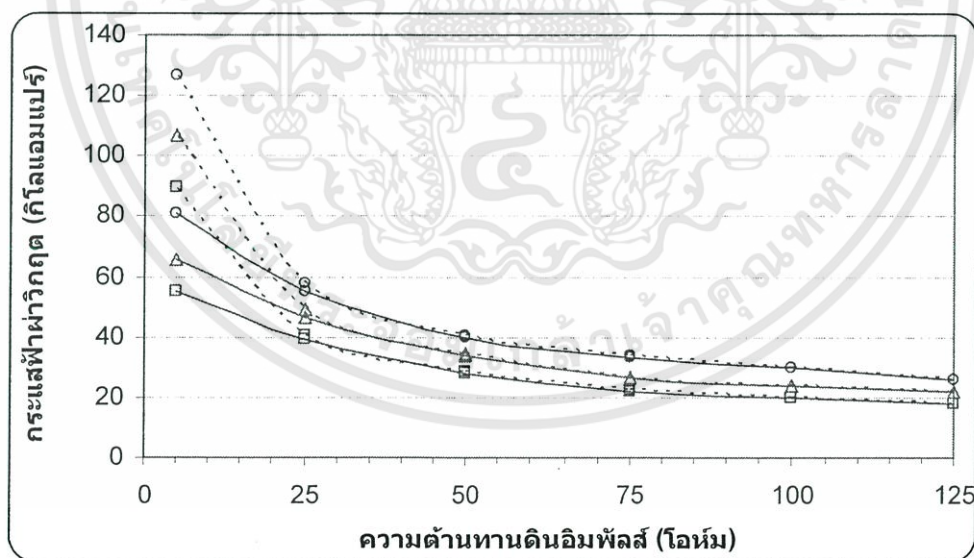
รูปที่ 4.28 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.43 และรูปที่ 4.29 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.43 ค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าวิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	55.09	89.73	65.71	107	80.97	126.5
25	39.15	40.49	46.70	48.85	55.19	57.73
50	28.14	28.72	33.56	34.26	39.66	40.48
75	22.19	22.31	26.47	26.61	33.43	33.72
100	19.76	19.86	23.57	23.68	29.62	29.77
125	18.20	18.20	21.71	21.71	25.66	25.66



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 — □ — - - □ - -

5 — △ — - - △ - -

6 — ○ — - - ○ - -

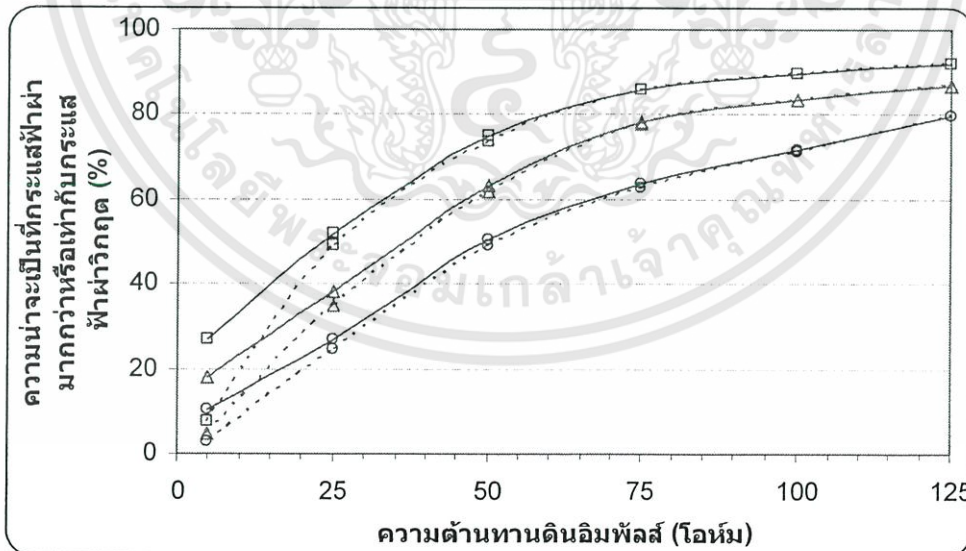
รูปที่ 4.29 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.44 และรูปที่ 4.30 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับ กระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของ ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.44 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	27.11	7.61	17.75	4.56	10.17	2.77
25	51.66	49.06	38.26	35.03	27.00	24.35
50	74.79	73.57	63.24	61.75	50.66	49.07
75	86.06	85.86	78.17	77.89	63.52	62.90
100	89.83	89.70	83.67	83.47	71.67	71.35
125	91.93	91.93	86.86	86.86	79.77	79.77



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 4 —□— - - □ - -
 5 —△— - - △ - -
 6 —○— - - ○ - -

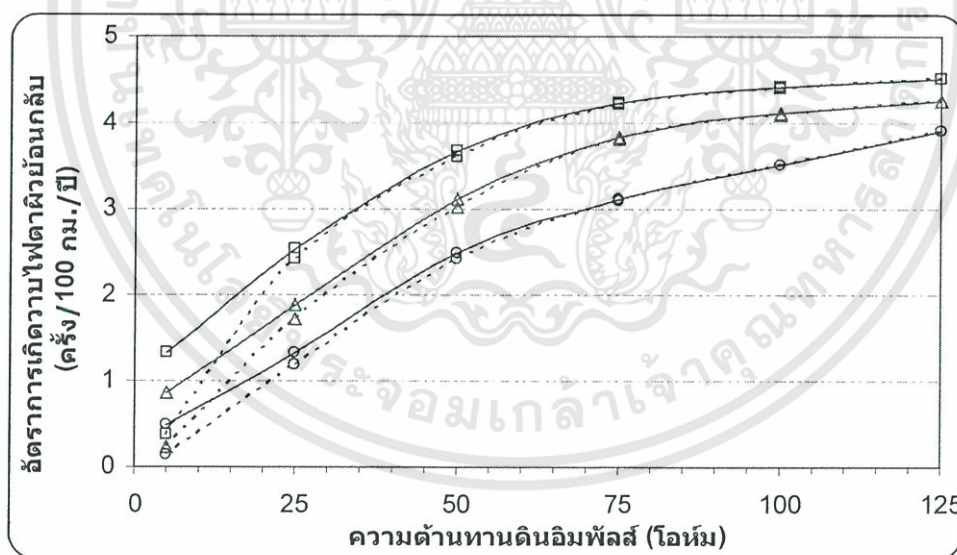
รูปที่ 4.30 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.45 และรูปที่ 4.31 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.45 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	1.33	0.37	0.87	0.22	0.50	0.14
25	2.54	2.41	1.88	1.72	1.33	1.20
50	3.67	3.61	3.11	3.03	2.49	2.41
75	4.23	4.22	3.84	3.82	3.12	3.09
100	4.41	4.40	4.11	4.10	3.52	3.50
125	4.51	4.51	4.26	4.26	3.92	3.92



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 — □ — - - □ - -

5 — △ — - - △ - -

6 — ○ — - - ○ - -

รูปที่ 4.31 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.46 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข

ตารางที่ 4.46 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที

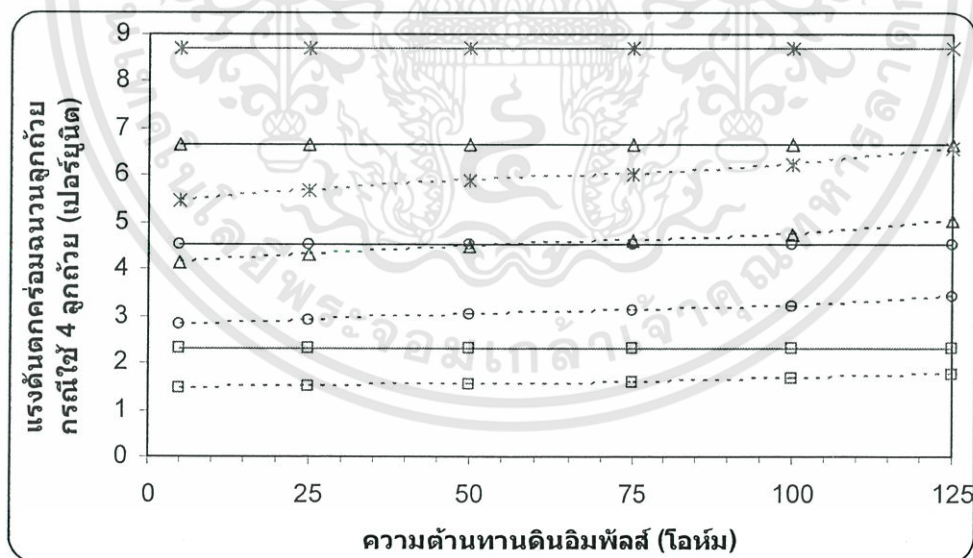
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	957	597	1874	1164	2764	1722	3612	2264
25	957	620	1874	1210	2764	1790	3612	2352
50	957	643	1874	1254	2764	1855	3612	2436
75	957	660	1874	1288	2764	1905	3612	2501
100	957	683	1874	1334	2764	1972	3612	2588
125	957	722	1874	1410	2764	2084	3612	2733

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.47 และรูปที่ 4.32 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.46) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.47 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	2.31	1.44	4.52	2.80	6.66	4.15	8.70	5.46
25	2.31	1.49	4.52	2.92	6.66	4.31	8.70	5.67
50	2.31	1.55	4.52	3.02	6.66	4.47	8.70	5.87
75	2.31	1.59	4.52	3.10	6.66	4.59	8.70	6.03
100	2.31	1.65	4.52	3.21	6.66	4.75	8.70	6.24
125	2.31	1.74	4.52	3.40	6.66	5.02	8.70	6.59



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - -□- - -

20 —○— - -○- - -

30 —△— - -△- - -

40 —*— - -*- - -

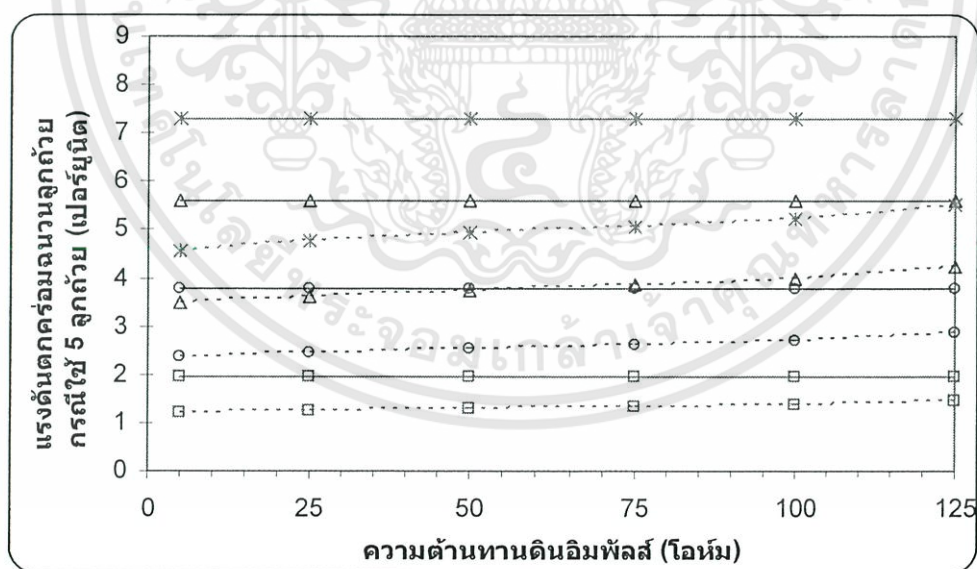
รูปที่ 4.32 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.48 และรูปที่ 4.33 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.46) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.48 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	1.93	1.21	3.79	2.35	5.58	3.48	7.30	4.57
25	1.93	1.25	3.79	2.44	5.58	3.62	7.30	4.75
50	1.93	1.30	3.79	2.53	5.58	3.75	7.30	4.92
75	1.93	1.33	3.79	2.60	5.58	3.85	7.30	5.05
100	1.93	1.38	3.79	2.69	5.58	3.98	7.30	5.23
125	1.93	1.46	3.79	2.85	5.58	4.21	7.30	5.52



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— —□—
 20 —○— —○—
 30 —△— —△—
 40 —*— —*—

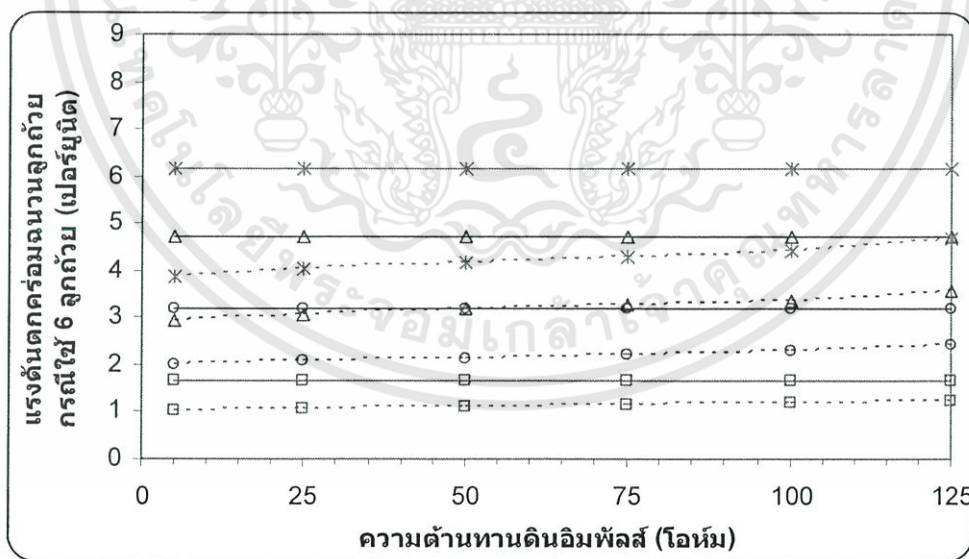
รูปที่ 4.33 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.49 และรูปที่ 4.34 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.46) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.49 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	1.64	1.02	3.20	1.99	4.72	2.94	6.17	3.87
25	1.64	1.06	3.20	2.07	4.72	3.06	6.17	4.02
50	1.64	1.10	3.20	2.14	4.72	3.17	6.17	4.16
75	1.64	1.13	3.20	2.20	4.72	3.26	6.17	4.28
100	1.64	1.17	3.20	2.28	4.72	3.37	6.17	4.42
125	1.64	1.23	3.20	2.41	4.72	3.56	6.17	4.67



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— □ —□—
 20 —○— ○ —○—
 30 —△— △ —△—
 40 —*— * —*—

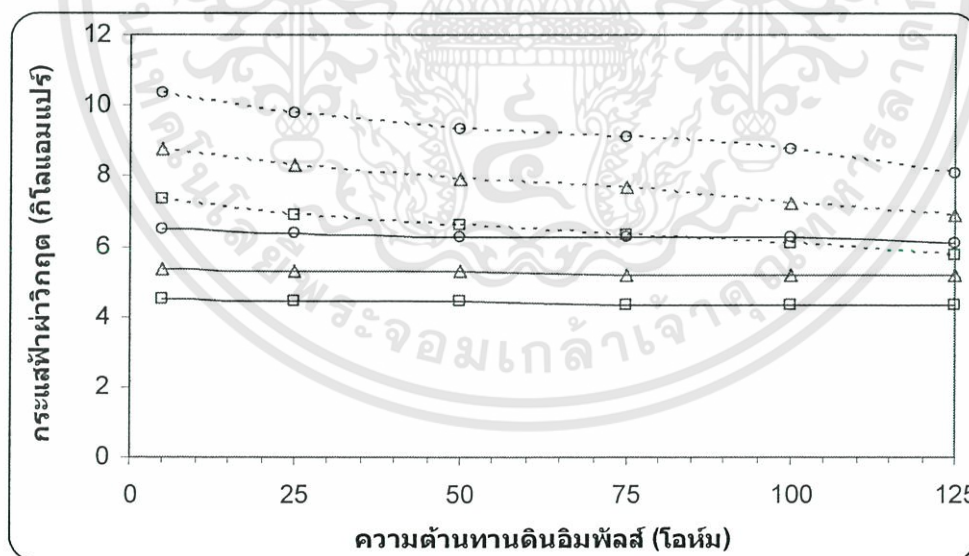
รูปที่ 4.34 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.50 และรูปที่ 4.35 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ่วิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้าผ่วิกฤตของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน่วงคลื่น 0.25 ไมโครวินาทีของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.50 ค่ากระแสไฟฟ้าผ่วิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าผ่วิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.50	7.33	5.37	8.75	6.48	10.34
25	4.43	6.86	5.28	8.30	6.35	9.80
50	4.43	6.62	5.28	7.89	6.24	9.33
75	4.34	6.29	5.17	7.69	6.24	9.08
100	4.34	6.08	5.17	7.25	6.24	8.77
125	4.34	5.75	5.17	6.86	6.11	8.10



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 4 —□— - - □ - -
 5 —△— - - △ - -
 6 —○— - - ○ - -

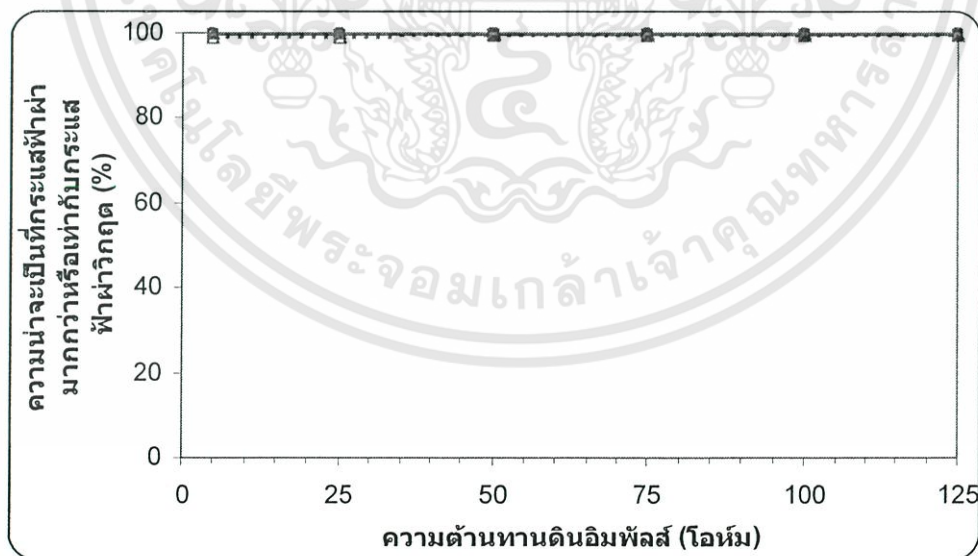
รูปที่ 4.35 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ่วิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.51 และรูปที่ 4.36 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตรและเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และข.

ตารางที่ 4.51 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	99.88	99.47	99.80	99.10	99.64	98.50
25	99.89	99.57	99.81	99.23	99.66	98.72
50	99.89	99.62	99.81	99.34	99.68	98.90
75	99.90	99.67	99.82	99.39	99.68	98.99
100	99.90	99.71	99.82	99.49	99.68	99.09
125	99.90	99.75	99.82	99.57	99.70	99.29



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— ---□---

5 —△— ---△---

6 —○— ---○---

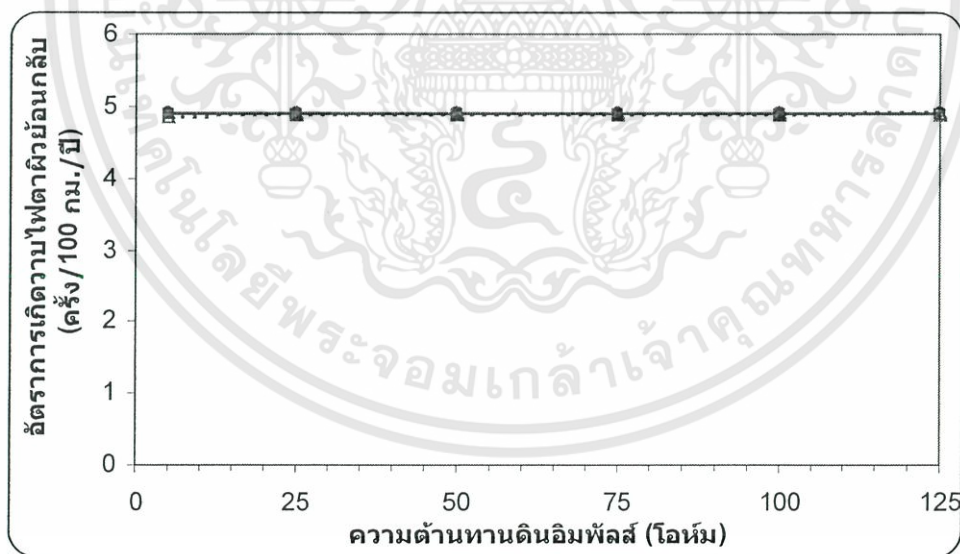
รูปที่ 4.36 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.52 และรูปที่ 4.37 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิพัสส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.52 ค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิพัสส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.90	4.88	4.90	4.87	4.89	4.84
25	4.90	4.89	4.90	4.87	4.89	4.85
50	4.90	4.89	4.90	4.88	4.89	4.86
75	4.90	4.89	4.90	4.88	4.89	4.86
100	4.90	4.90	4.90	4.89	4.89	4.87
125	4.90	4.90	4.90	4.89	4.90	4.87



จำนวนลูกถ้วย	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
4	—□—	---□---
5	—△—	---△---
6	—○—	---○---

รูปที่ 4.37 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.53 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข

ตารางที่ 4.53 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที

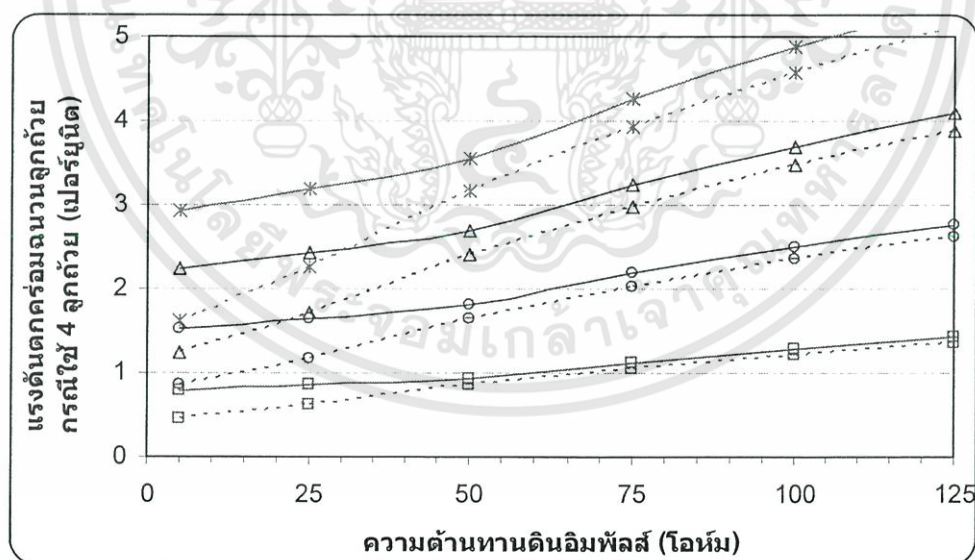
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	327	190	628	355	924	518	1214	676
25	356	255	685	485	1009	712	1325	936
50	390	352	752	678	1112	1001	1472	1313
75	465	433	905	839	1341	1240	1772	1633
100	532	501	1037	975	1536	1441	2025	1896
125	589	560	1150	1091	1702	1614	2236	2123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.54 และรูปที่ 4.38 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.53) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.54 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.79	0.46	1.51	0.86	2.23	1.25	2.93	1.63
25	0.86	0.61	1.65	1.17	2.43	1.72	3.19	2.26
50	0.94	0.85	1.81	1.63	2.68	2.41	3.55	3.16
75	1.12	1.04	2.18	2.02	3.23	2.99	4.27	3.93
100	1.28	1.21	2.50	2.35	3.70	3.47	4.88	4.57
125	1.42	1.35	2.8	2.6	4	3.9	5.39	5.12



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - □ - -

20 —○— - - ○ - -

30 —△— - - △ - -

40 —*— - - * - -

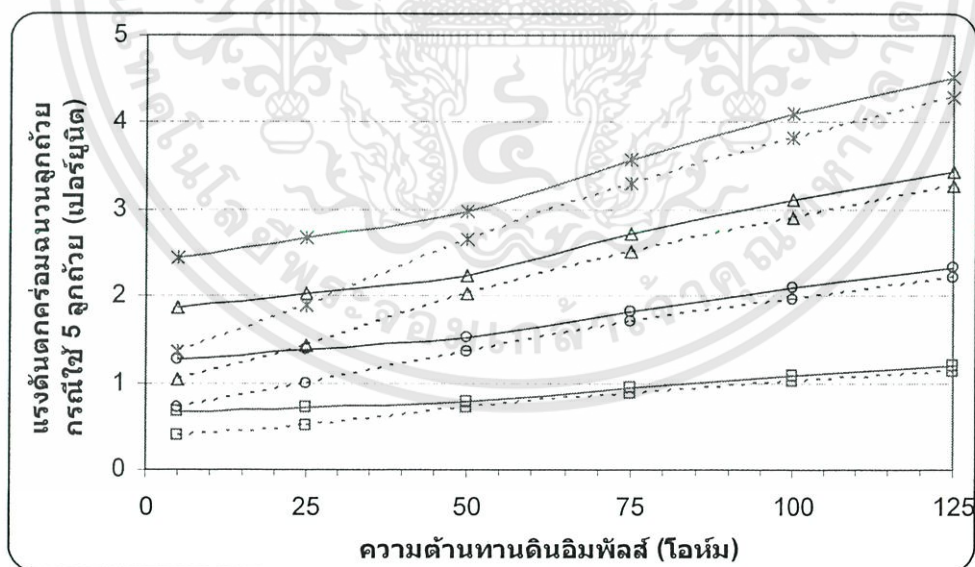
รูปที่ 4.38 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.55 และรูปที่ 4.39 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.53) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.55 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.66	0.38	1.27	0.72	1.87	1.05	2.45	1.37
25	0.72	0.52	1.38	0.98	2.04	1.44	2.68	1.89
50	0.79	0.71	1.52	1.37	2.25	2.02	2.97	2.65
75	0.94	0.87	1.83	1.69	2.71	2.51	3.58	3.30
100	1.07	1.01	2.09	1.97	3.10	2.91	4.09	3.83
125	1.19	1.13	2.32	2.20	3.44	3.26	4.52	4.29



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - - □ - - -

20 —○— - - - ○ - - -

30 —△— - - - △ - - -

40 —*— - - - * - - -

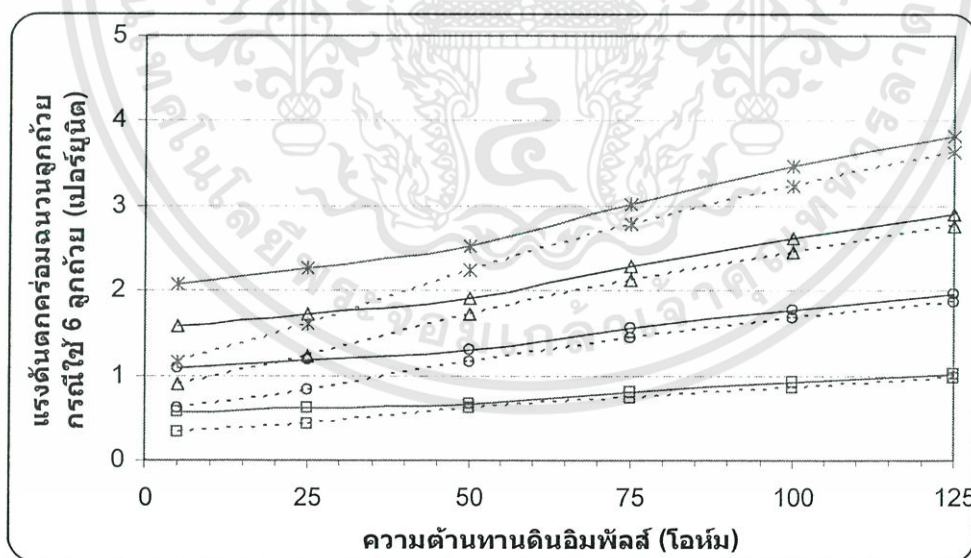
รูปที่ 4.39 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.56 และรูปที่ 4.40 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.53) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.56 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.56	0.32	1.07	0.61	1.58	0.89	2.08	1.16
25	0.61	0.44	1.17	0.83	1.72	1.22	2.26	1.60
50	0.67	0.60	1.29	1.16	1.90	1.71	2.52	2.24
75	0.79	0.74	1.55	1.43	2.29	2.12	3.03	2.79
100	0.91	0.86	1.77	1.67	2.63	2.46	3.46	3.24
125	1.01	0.96	1.97	1.86	2.91	2.76	3.82	3.63



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - □ - -

20 —○— - - ○ - -

30 —△— - - △ - -

40 —*— - - * - -

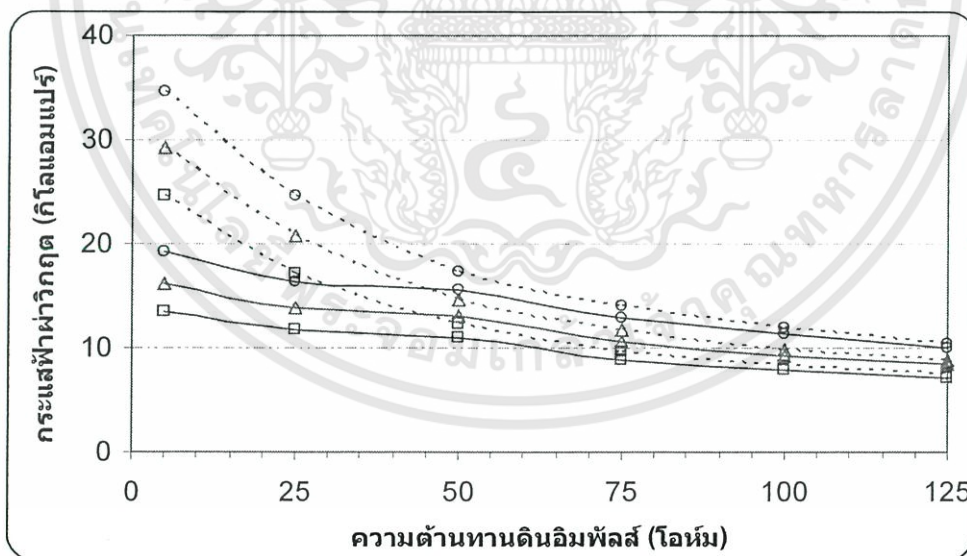
รูปที่ 4.40 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.57 และรูปที่ 4.41 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.57 ค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าวิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	13.47	24.56	16.07	29.29	19.28	34.62
25	11.66	17.11	13.90	20.86	16.43	24.65
50	11.04	12.24	13.16	14.60	15.56	17.26
75	8.92	9.58	10.65	11.80	12.93	13.95
100	7.80	8.28	9.30	9.88	11.28	12.00
125	7.05	7.41	8.40	8.84	9.93	10.45



จำนวนลูกถ้วย	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
4	—□—	---□---
5	—△—	---△---
6	—○—	---○---

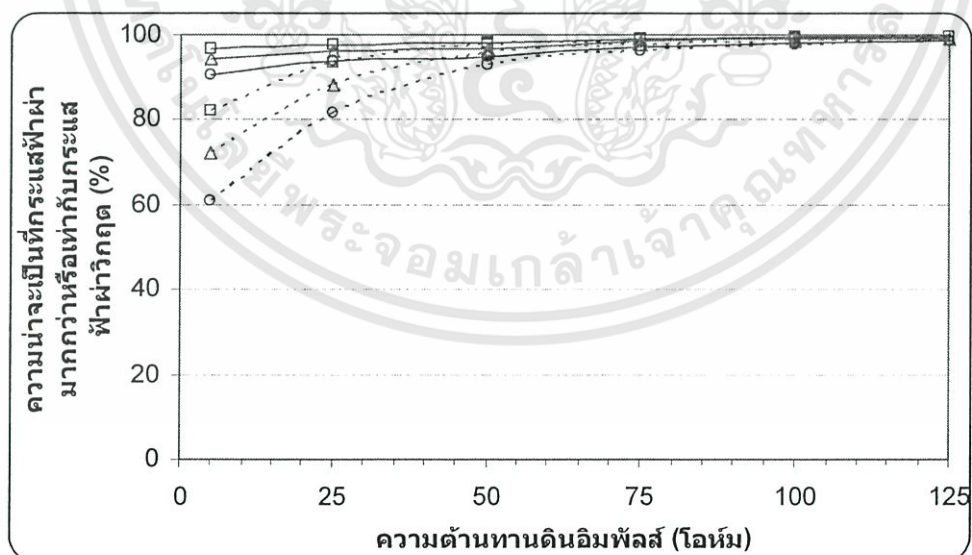
รูปที่ 4.41 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.58 และรูปที่ 4.42 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับ กระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของ ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.58 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	96.65	81.87	94.36	72.37	90.52	60.99
25	97.83	93.24	96.32	88.21	93.99	81.70
50	98.16	97.49	96.88	95.75	94.87	93.07
75	99.04	98.80	98.35	97.75	97.04	96.29
100	99.36	99.24	98.91	98.69	98.04	97.63
125	99.53	99.46	99.20	99.07	98.67	98.45



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— □ —□—

5 —△— △ —△—

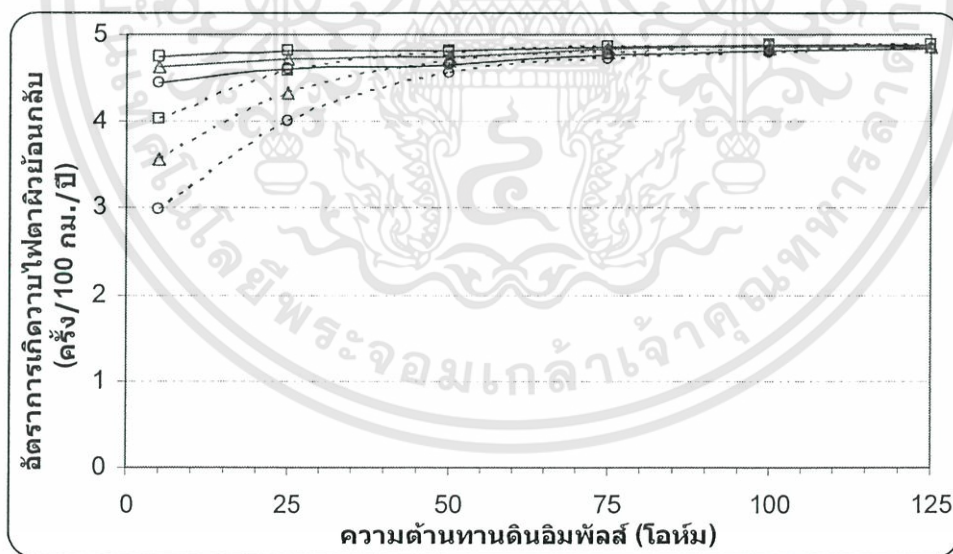
6 —○— ○ —○—

รูปที่ 4.42 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.59 และรูปที่ 4.43 แสดงค่าอัตราการเกิดววนไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.59 ค่าอัตราการเกิดววนไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดววนไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.75	4.02	4.63	3.55	4.44	2.99
25	4.80	4.58	4.73	4.33	4.61	4.01
50	4.82	4.79	4.76	4.70	4.66	4.57
75	4.86	4.85	4.83	4.80	4.76	4.73
100	4.88	4.87	4.86	4.85	4.81	4.79
125	4.89	4.88	4.87	4.86	4.84	4.83



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 — □ — - - □ - -

5 — △ — - - △ - -

6 — ○ — - - ○ - -

รูปที่ 4.43 แสดงค่าอัตราการเกิดววนไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.60 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข

ตารางที่ 4.60 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที

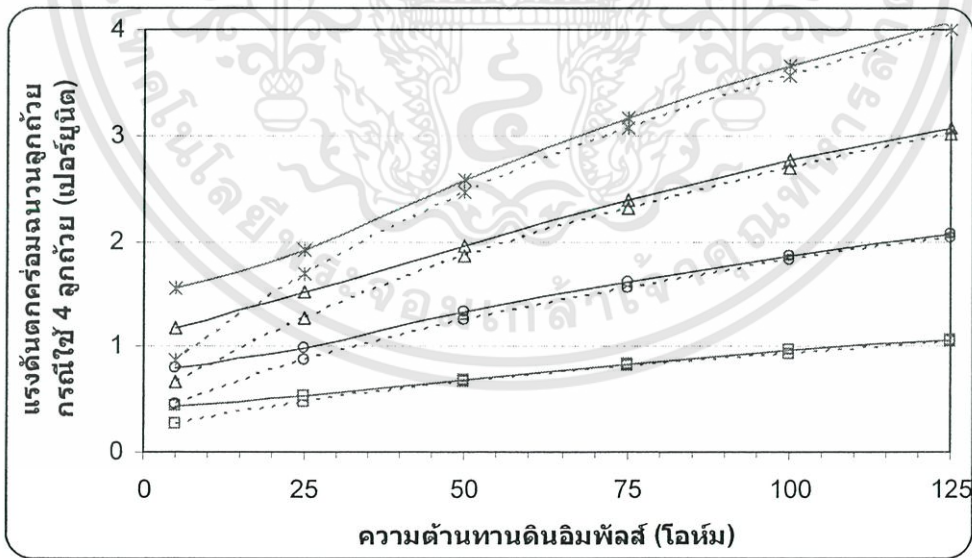
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	178	108	333	192	488	276	642	360
25	217	193	409	361	630	530	795	698
50	286	273	548	523	810	772	1072	1022
75	347	336	670	649	993	961	1316	1273
100	398	388	771	752	1145	1116	1519	1480
125	441	432	859	840	1277	1249	1694	1657

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.61 และรูปที่ 4.44 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.60) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.61 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.43	0.26	0.80	0.46	1.18	0.67	1.55	0.87
25	0.52	0.47	0.99	0.87	1.52	1.28	1.92	1.68
50	0.69	0.66	1.32	1.26	1.95	1.86	2.58	2.46
75	0.84	0.81	1.61	1.56	2.39	2.32	3.17	3.07
100	0.96	0.93	1.86	1.81	2.76	2.69	3.66	3.57
125	1.06	1.04	2.07	2.02	3.08	3.01	4.08	3.99



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 — □ — - - □ - -

20 — ○ — - - ○ - -

30 — △ — - - △ - -

40 — * — - - * - -

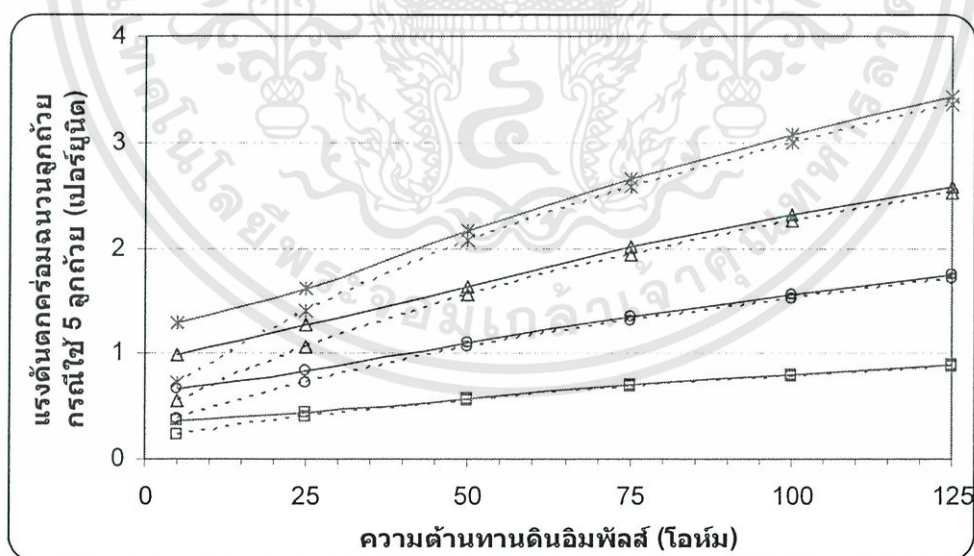
รูปที่ 4.44 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.62 และรูปที่ 4.45 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.60) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.62 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.36	0.22	0.67	0.39	0.99	0.56	1.30	0.73
25	0.44	0.39	0.83	0.73	1.27	1.07	1.61	1.41
50	0.58	0.55	1.11	1.06	1.64	1.56	2.17	2.06
75	0.70	0.68	1.35	1.31	2.01	1.94	2.66	2.57
100	0.80	0.78	1.56	1.52	2.31	2.25	3.07	2.99
125	0.89	0.87	1.74	1.70	2.58	2.52	3.42	3.35



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - □ - -

20 —○— - - ○ - -

30 —△— - - △ - -

40 —*— - - * - -

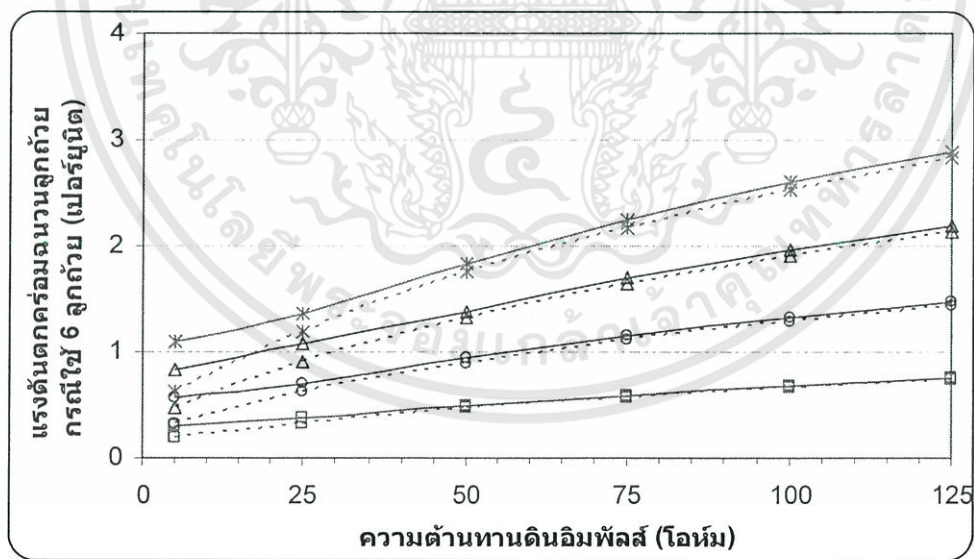
รูปที่ 4.45 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.63 และรูปที่ 4.46 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.60) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.63 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.30	0.18	0.57	0.33	0.83	0.47	1.10	0.62
25	0.37	0.33	0.70	0.62	1.08	0.91	1.36	1.19
50	0.49	0.47	0.94	0.89	1.38	1.32	1.83	1.75
75	0.59	0.57	1.15	1.11	1.70	1.64	2.25	2.18
100	0.68	0.66	1.32	1.29	1.96	1.91	2.60	2.53
125	0.75	0.74	1.47	1.44	2.18	2.14	2.90	2.83



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— □ —□—

20 —○— ○ —○—

30 —△— △ —△—

40 —*— * —*—

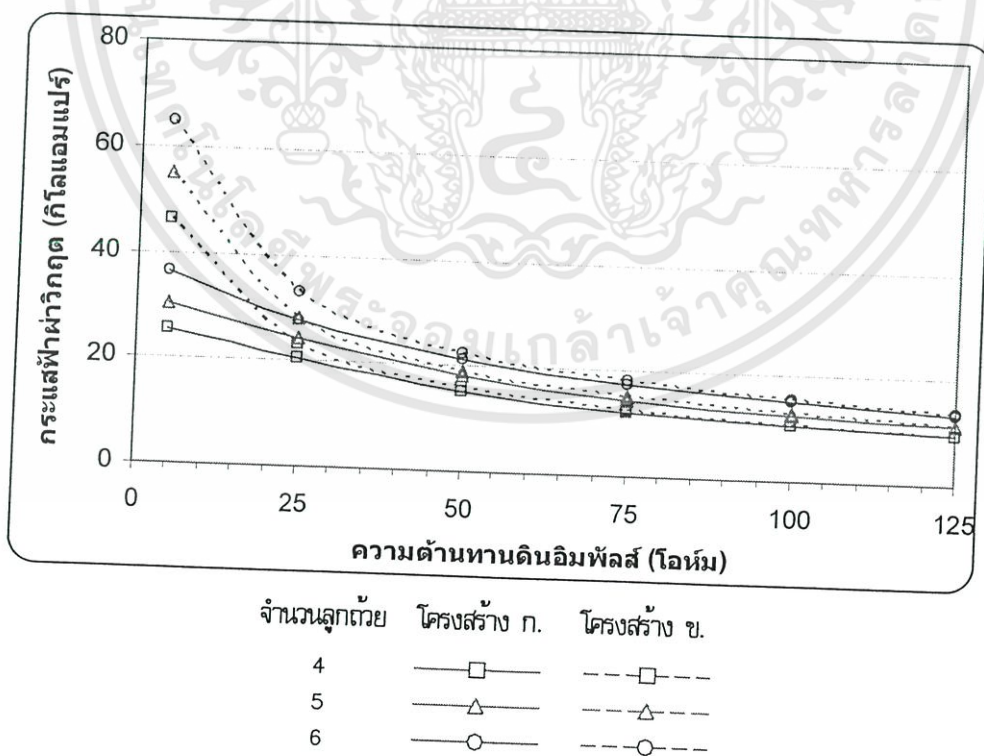
รูปที่ 4.46 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.64 และรูปที่ 4.47 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ่าวิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.64 ค่ากระแสไฟฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าผ่าวิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	25.51	46.11	30.43	55.00	36.45	65.00
25	20.29	22.99	24.21	28.02	27.86	33.11
50	15.15	15.87	18.07	18.93	21.35	22.37
75	11.96	12.35	14.27	15.25	17.46	18.03
100	10.43	10.70	12.44	12.76	15.18	15.56
125	9.41	9.61	11.22	11.46	13.27	13.54



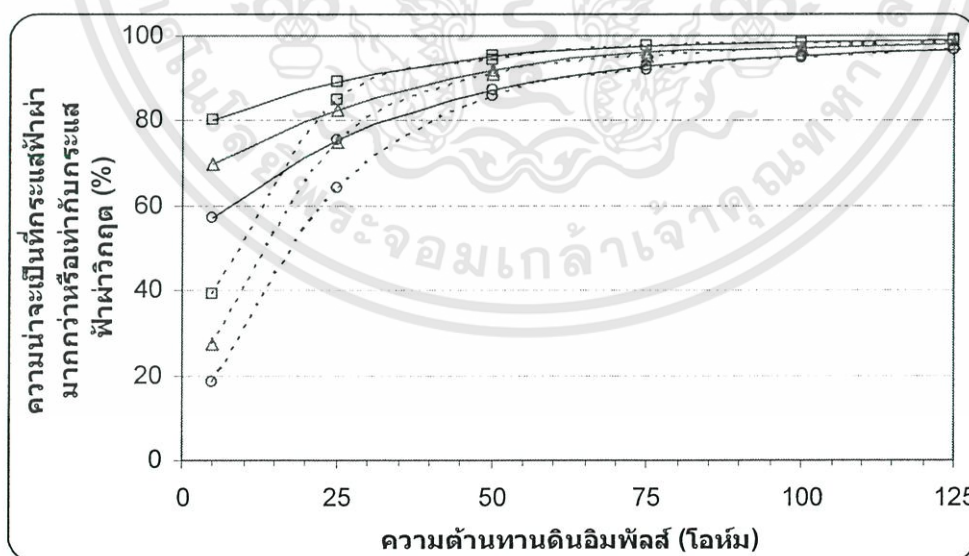
รูปที่ 4.47 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ่าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.65 และรูปที่ 4.48 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับ กระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของ ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.65 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	80.05	39.19	69.95	27.21	57.13	18.24
25	89.06	84.70	82.52	75.03	75.36	64.20
50	95.26	94.57	92.10	90.99	87.43	85.76
75	97.66	97.42	96.03	95.16	92.83	92.15
100	98.45	98.33	97.37	97.16	95.23	94.87
125	98.87	98.80	98.07	97.94	96.80	96.60



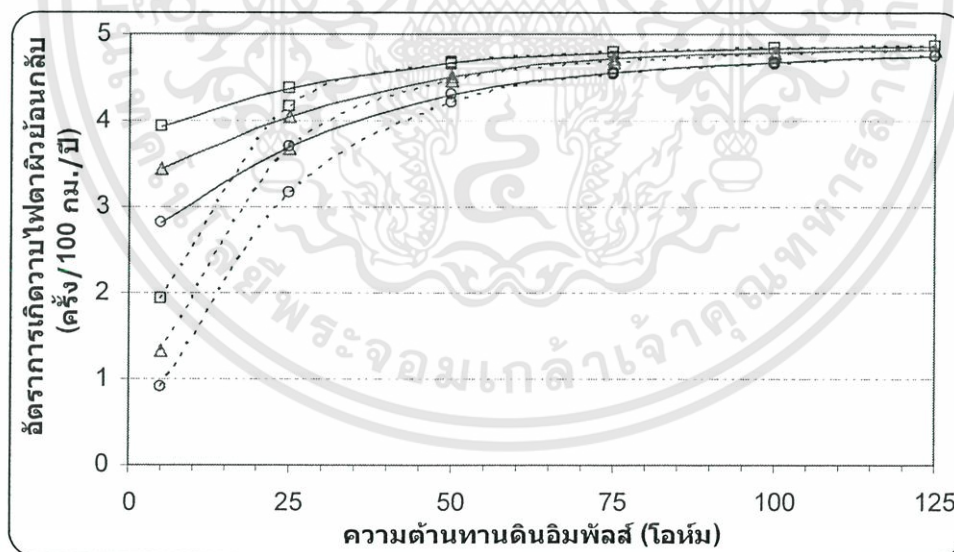
จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 4 —□— —□—
 5 —△— —△—
 6 —○— —○—

รูปที่ 4.48 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.66 และรูปที่ 4.49 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.66 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	3.93	1.92	3.43	1.34	2.81	0.90
25	4.37	4.16	4.05	3.68	3.70	3.15
50	4.68	4.64	4.52	4.47	4.29	4.21
75	4.80	4.78	4.72	4.67	4.56	4.52
100	4.83	4.83	4.78	4.77	4.68	4.66
125	4.85	4.85	4.82	4.81	4.75	4.74



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— □ —□—
 5 —△— △ —△—
 6 —○— ○ —○—

รูปที่ 4.49 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.67 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข

ตารางที่ 4.67 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที

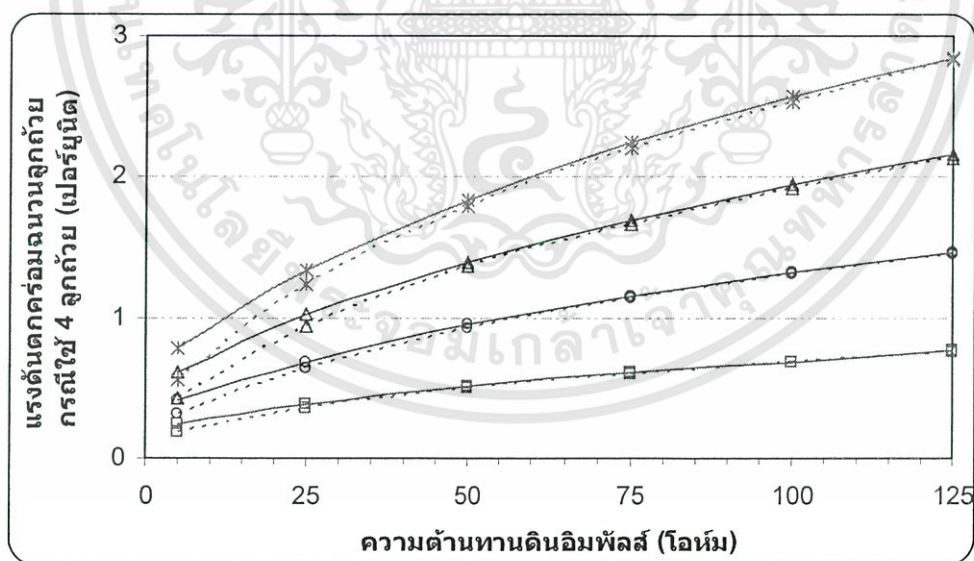
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	101	76	172	128	252	178	326	231
25	157	146	285	264	422	391	554	512
50	210	205	396	386	581	565	764	744
75	252	248	479	471	705	693	930	915
100	286	283	548	541	807	798	1066	1053
125	316	313	607	602	896	887	1183	1172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.68 และรูปที่ 4.50 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.67) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.68 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.24	0.18	0.41	0.31	0.61	0.43	0.79	0.56
25	0.38	0.35	0.69	0.64	1.02	0.94	1.33	1.23
50	0.51	0.49	0.95	0.93	1.40	1.36	1.84	1.79
75	0.61	0.60	1.15	1.13	1.70	1.67	2.24	2.20
100	0.69	0.68	1.32	1.30	1.94	1.92	2.57	2.54
125	0.76	0.75	1.46	1.45	2.16	2.14	2.85	2.82



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - - □ - - -

20 —○— - - - ○ - - -

30 —△— - - - △ - - -

40 —*— - - - * - - -

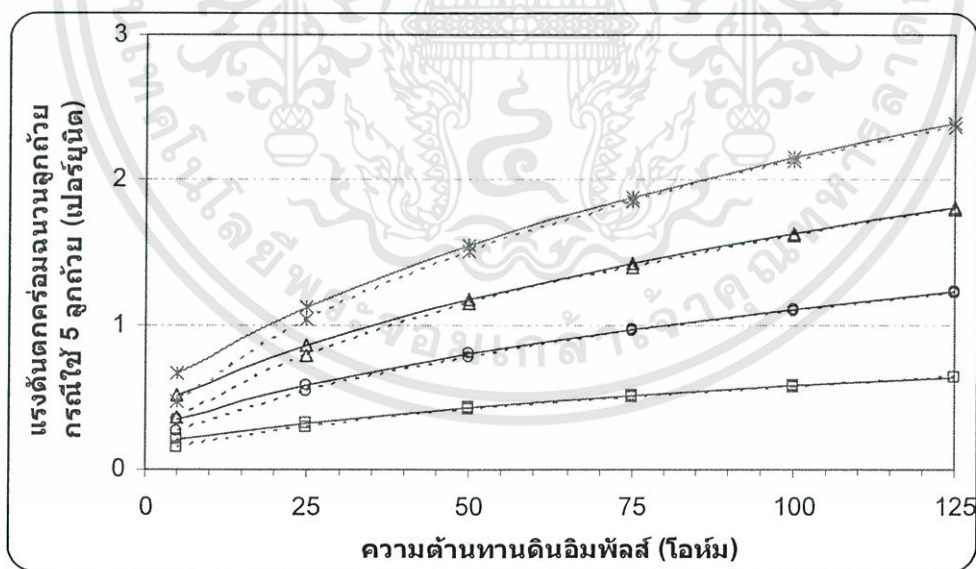
รูปที่ 4.50 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.69 และรูปที่ 4.51 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.67) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.69 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.20	0.15	0.35	0.26	0.51	0.36	0.66	0.47
25	0.32	0.29	0.58	0.53	0.85	0.79	1.12	1.03
50	0.42	0.41	0.80	0.78	1.17	1.14	1.54	1.50
75	0.51	0.50	0.97	0.95	1.42	1.40	1.88	1.85
100	0.58	0.57	1.11	1.09	1.63	1.61	2.15	2.13
125	0.64	0.63	1.23	1.22	1.81	1.79	2.39	2.37



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— ---□---

20 —○— ---○---

30 —△— ---△---

40 —*— ---*---

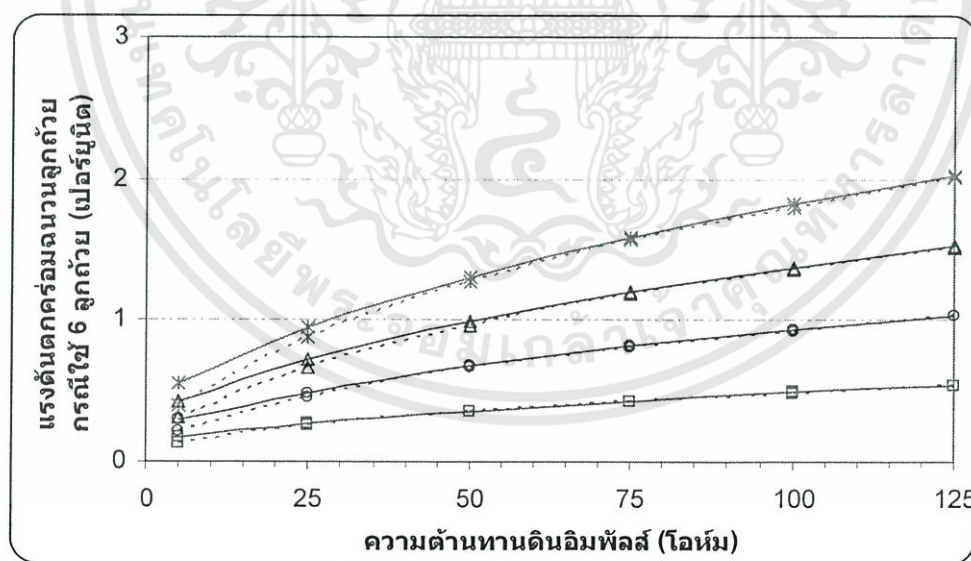
รูปที่ 4.51 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.70 และรูปที่ 4.52 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.67) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.70 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.17	0.13	0.29	0.22	0.43	0.30	0.56	0.39
25	0.27	0.25	0.49	0.45	0.72	0.67	0.95	0.88
50	0.36	0.35	0.68	0.66	0.99	0.97	1.31	1.27
75	0.43	0.42	0.82	0.81	1.21	1.18	1.59	1.56
100	0.49	0.48	0.94	0.92	1.38	1.36	1.82	1.80
125	0.54	0.54	1.04	1.03	1.53	1.52	2.02	2.00



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— □ —□—

20 —○— ○ —○—

30 —△— △ —△—

40 —*— * —*—

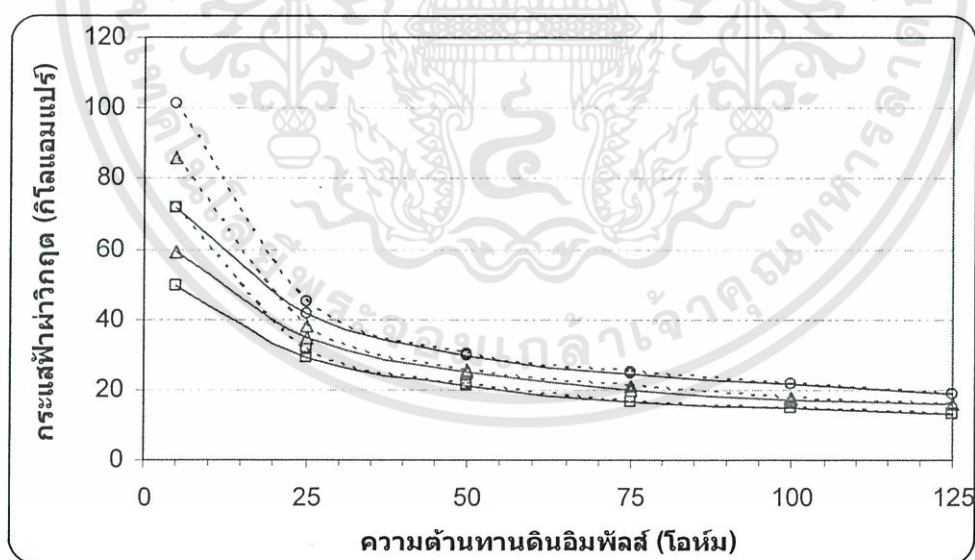
รูปที่ 4.52 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.71 และรูปที่ 4.53 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผิววิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้าผิว ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.71 ค่ากระแสไฟฟ้าผิววิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าผิววิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	49.40	71.86	58.93	85.71	71.78	101.30
25	29.12	31.44	34.74	37.98	41.59	44.88
50	20.96	21.50	25.00	25.65	29.55	30.31
75	16.47	16.73	19.64	21.02	24.43	24.84
100	14.51	14.66	17.31	17.49	21.35	21.63
125	13.13	13.26	15.66	15.81	18.51	18.69



จำนวนลูกถ้วย	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
4	—□—	---□---
5	—△—	---△---
6	—○—	---○---

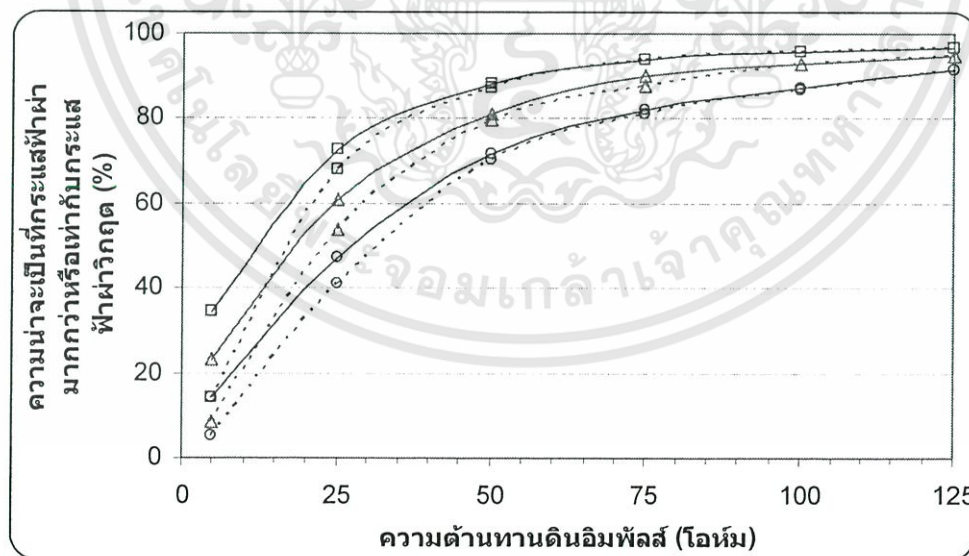
รูปที่ 4.53 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผิววิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.72 และรูปที่ 4.54 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.72 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	34.24	14.06	23.20	8.67	14.10	5.36
25	72.72	67.79	60.73	54.00	47.00	41.19
50	88.05	87.19	81.04	79.79	71.83	70.21
75	93.95	93.66	90.00	87.96	82.11	81.34
100	95.82	95.69	93.01	92.80	87.43	86.99
125	96.90	96.81	94.77	94.62	91.53	91.30



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 4 —□— —□—
 5 —△— —△—
 6 —○— —○—

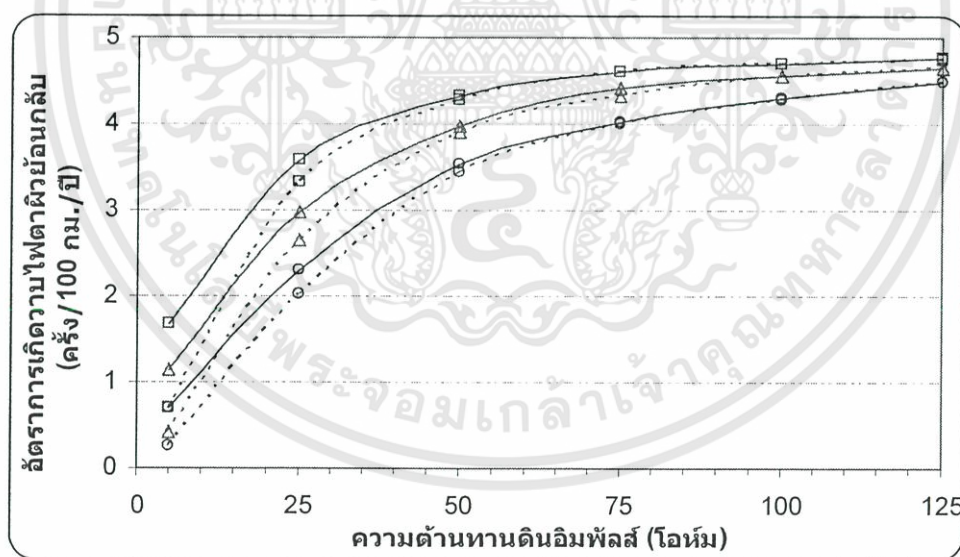
รูปที่ 4.54 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.73 และรูปที่ 4.55 แสดงค่าอัตราการเกิดวายุไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.73 ค่าอัตราการเกิดวายุไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวายุไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	1.68	0.69	1.14	0.43	0.69	0.26
25	3.57	3.33	2.98	2.65	2.31	2.02
50	4.32	4.28	3.98	3.92	3.53	3.45
75	4.61	4.60	4.42	4.32	4.03	3.99
100	4.70	4.70	4.57	4.56	4.29	4.27
125	4.76	4.75	4.65	4.65	4.49	4.48



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 — □ — — □ — —

5 — △ — — △ — —

6 — ○ — — ○ — —

รูปที่ 4.55 แสดงค่าอัตราการเกิดวายุไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.74 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

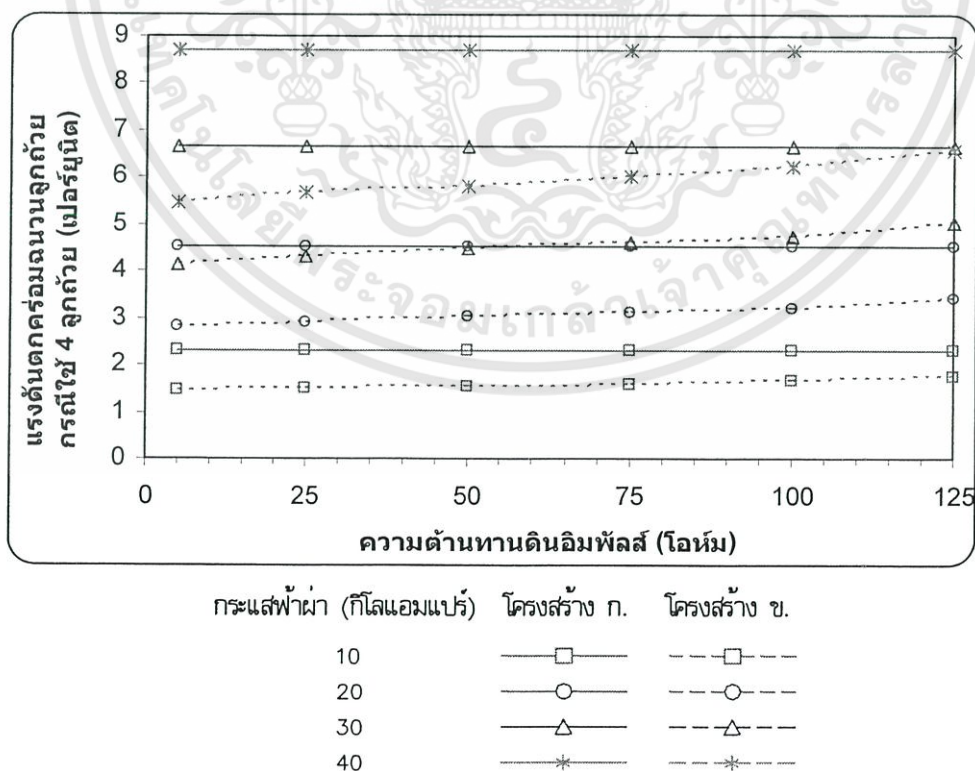
ตารางที่ 4.74 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย(กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	957	597	1874	1164	2764	1722	3613	2264
25	957	620	1874	1210	2764	1790	3613	2352
50	957	643	1874	1254	2764	1855	3613	2410
75	957	659	1874	1288	2764	1905	3613	2501
100	957	683	1874	1324	2764	1972	3613	2588
125	957	722	1874	1410	2764	2084	3613	2733

จากตารางที่ 4.75 และรูปที่ 4.56 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.74) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.75 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	2.31	1.44	4.52	2.80	6.66	4.15	8.71	5.46
25	2.31	1.49	4.52	2.92	6.66	4.31	8.71	5.67
50	2.31	1.55	4.52	3.02	6.66	4.47	8.71	5.81
75	2.31	1.59	4.52	3.10	6.66	4.59	8.71	6.03
100	2.31	1.65	4.52	3.19	6.66	4.75	8.71	6.24
125	2.31	1.74	4.52	3.40	6.66	5.02	8.71	6.59



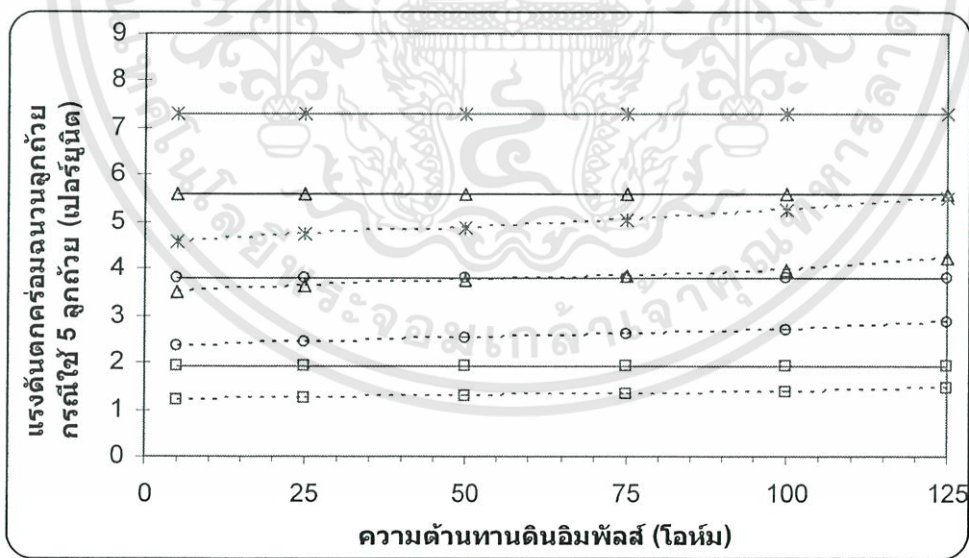
รูปที่ 4.56 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.76 และรูปที่ 4.57 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.74) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.76 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	1.93	1.21	3.79	2.35	5.58	3.48	7.30	4.57
25	1.93	1.25	3.79	2.44	5.58	3.62	7.30	4.75
50	1.93	1.30	3.79	2.53	5.58	3.75	7.30	4.87
75	1.93	1.33	3.79	2.60	5.58	3.85	7.30	5.05
100	1.93	1.38	3.79	2.67	5.58	3.98	7.30	5.23
125	1.93	1.46	3.79	2.85	5.58	4.21	7.30	5.52



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - - □ - - -

20 —○— - - - ○ - - -

30 —△— - - - △ - - -

40 —*— - - - * - - -

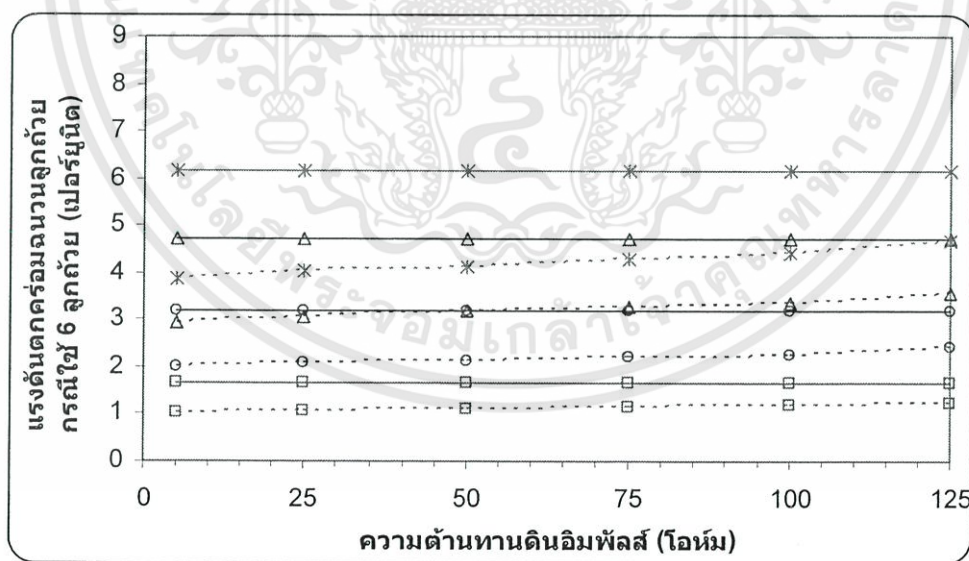
รูปที่ 4.57 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.77 และรูปที่ 4.58 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.74) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.77 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	1.64	1.02	3.20	1.99	4.72	2.94	6.18	3.87
25	1.64	1.06	3.20	2.07	4.72	3.06	6.18	4.02
50	1.64	1.10	3.20	2.14	4.72	3.17	6.18	4.12
75	1.64	1.13	3.20	2.20	4.72	3.26	6.18	4.28
100	1.64	1.17	3.20	2.26	4.72	3.37	6.18	4.42
125	1.64	1.23	3.20	2.41	4.72	3.56	6.18	4.67



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
10	—□—	---□---
20	—○—	---○---
30	—△—	---△---
40	—*—	---*---

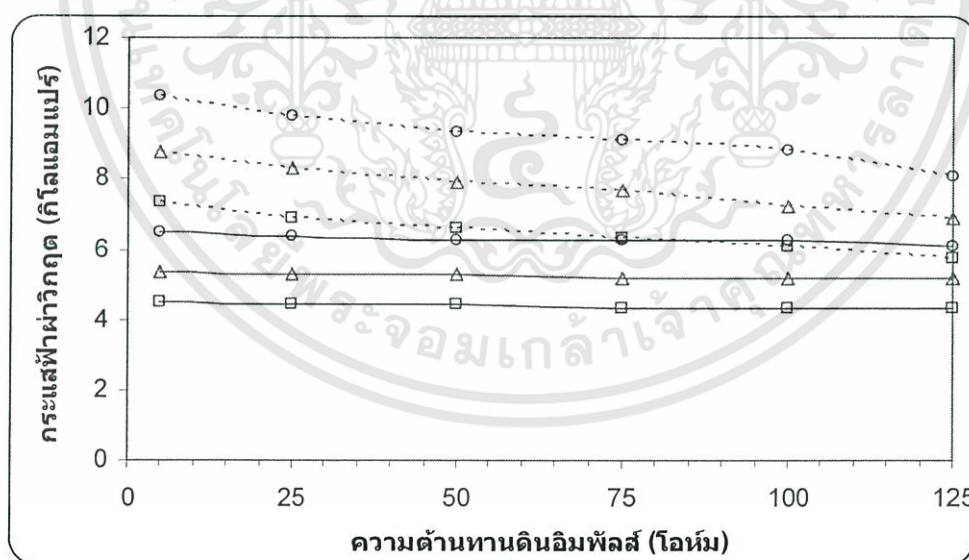
รูปที่ 4.58 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.78 และรูปที่ 4.59 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้าของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.78 ค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าวิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.50	7.33	5.37	8.75	6.48	10.34
25	4.43	6.86	5.28	8.30	6.35	9.80
50	4.43	6.62	5.28	7.89	6.24	9.33
75	4.34	6.30	5.17	7.69	6.24	9.08
100	4.34	6.08	5.17	7.25	6.24	8.84
125	4.34	5.75	5.17	6.86	6.11	8.10



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— □ —□—
 5 —△— △ —△—
 6 —○— ○ —○—

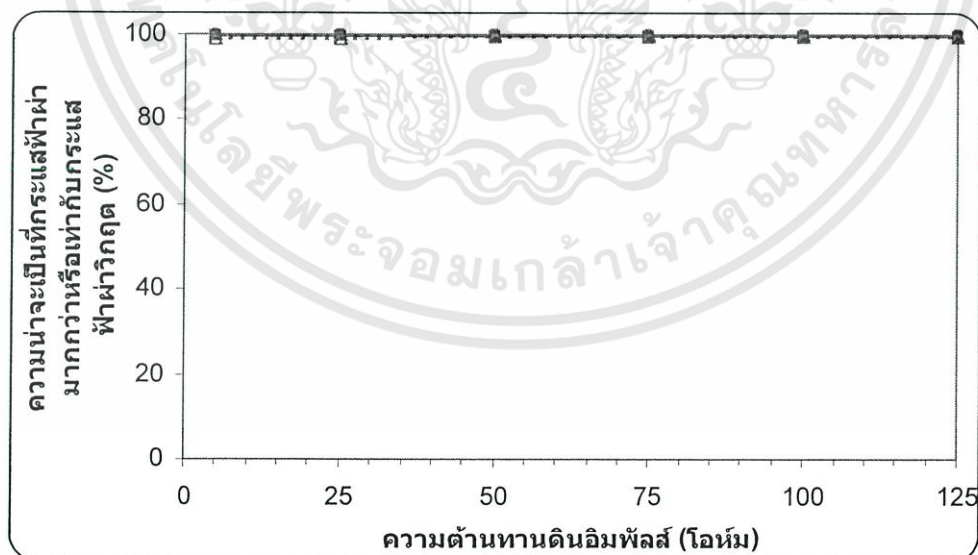
รูปที่ 4.59 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.79 และรูปที่ 4.60 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับ กระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของ ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตรและเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก.และ ข.

ตารางที่ 4.79 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	99.88	99.47	99.80	99.10	99.64	98.50
25	99.89	99.57	99.81	99.23	99.66	98.72
50	99.89	99.62	99.81	99.34	99.68	98.90
75	99.90	99.67	99.82	99.39	99.68	98.99
100	99.90	99.71	99.82	99.49	99.68	99.07
125	99.90	99.75	99.82	99.57	99.70	99.29



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 4 —□— —□—
 5 —△— —△—
 6 —○— —○—

รูปที่ 4.60 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.80 และรูปที่ 4.61 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.80 ค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.90	4.88	4.90	4.87	4.89	4.84
25	4.90	4.89	4.90	4.87	4.89	4.85
50	4.90	4.89	4.90	4.88	4.89	4.86
75	4.90	4.89	4.90	4.88	4.89	4.86
100	4.90	4.90	4.90	4.89	4.89	4.86
125	4.90	4.90	4.90	4.89	4.90	4.87



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— ---□---

5 —△— ---△---

6 —○— ---○---

รูปที่ 4.61 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.81 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข

ตารางที่ 4.81 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที

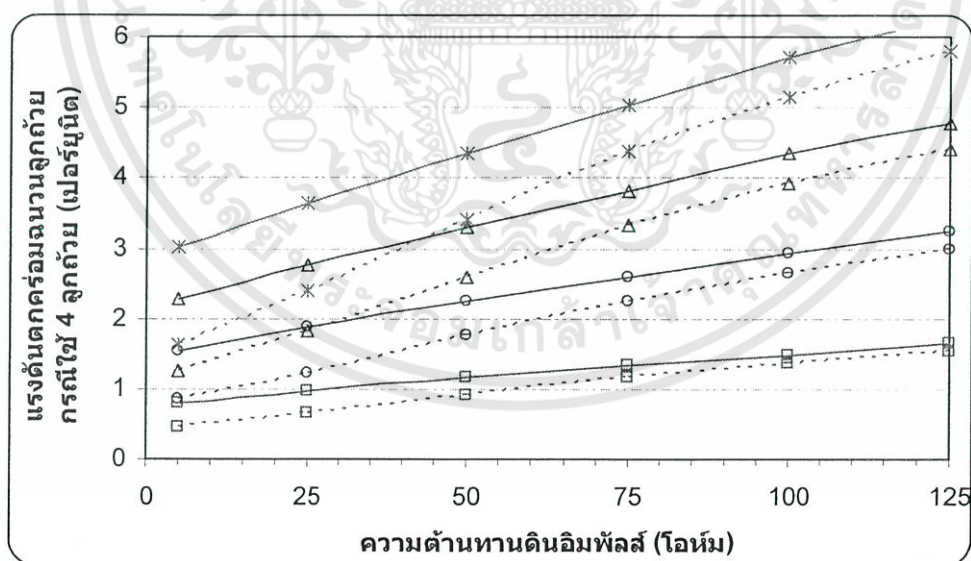
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	331	190	638	355	945	518	1250	670
25	401	268	777	510	1149	750	1516	987
50	478	377	927	728	1371	1077	1804	1420
75	549	479	1070	931	1585	1376	2089	1812
100	618	564	1217	1099	1801	1625	2369	2136
125	683	638	1343	1241	1986	1834	2608	2409

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.82 และรูปที่ 4.62 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.81) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.82 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.80	0.46	1.54	0.86	2.28	1.25	3.01	1.61
25	0.97	0.65	1.87	1.23	2.77	1.81	3.65	2.38
50	1.15	0.91	2.23	1.75	3.30	2.60	4.35	3.42
75	1.32	1.15	2.58	2.24	3.82	3.32	5.03	4.37
100	1.49	1.36	2.93	2.65	4.34	3.92	5.71	5.15
125	1.65	1.54	3.24	2.99	4.79	4.42	6.28	5.80



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— □ —□—
 20 —○— ○ —○—
 30 —△— △ —△—
 40 —*— * —*—

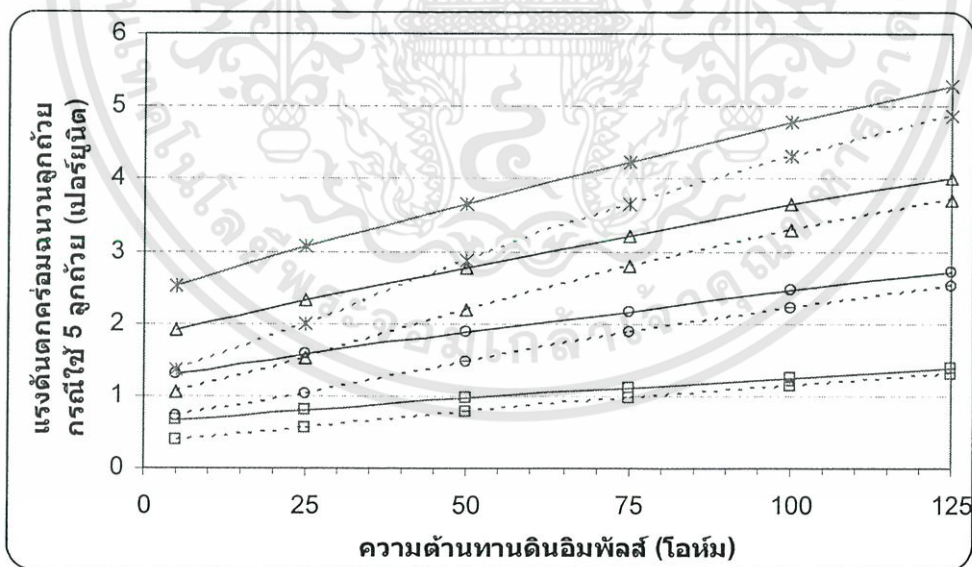
รูปที่ 4.62 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.83 และรูปที่ 4.63 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.81) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.83 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.67	0.38	1.29	0.72	1.91	1.05	2.53	1.35
25	0.81	0.54	1.57	1.03	2.32	1.52	3.06	1.99
50	0.97	0.76	1.87	1.47	2.77	2.18	3.64	2.87
75	1.11	0.97	2.16	1.88	3.20	2.78	4.22	3.66
100	1.25	1.14	2.46	2.22	3.64	3.28	4.79	4.32
125	1.38	1.29	2.71	2.51	4.01	3.71	5.27	4.87



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 10 —□— —□—
 20 —○— —○—
 30 —△— —△—
 40 —*— —*—

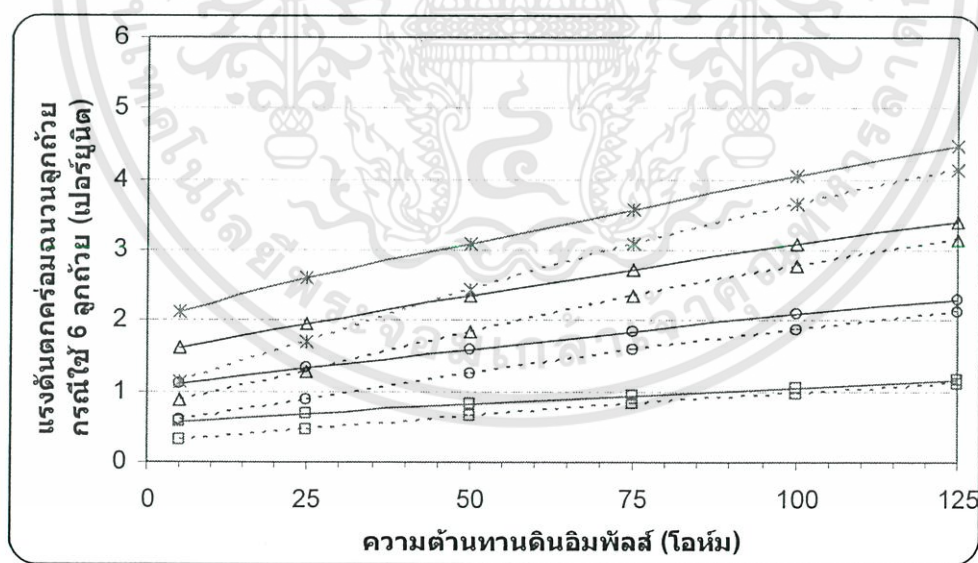
รูปที่ 4.63 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.84 และรูปที่ 4.64 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.81) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.84 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.57	0.32	1.09	0.61	1.62	0.89	2.14	1.15
25	0.69	0.46	1.33	0.87	1.96	1.28	2.59	1.69
50	0.82	0.64	1.58	1.24	2.34	1.84	3.08	2.43
75	0.94	0.82	1.83	1.59	2.71	2.35	3.57	3.10
100	1.06	0.96	2.08	1.88	3.08	2.78	4.05	3.65
125	1.17	1.09	2.30	2.12	3.39	3.14	4.46	4.12



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— □ —□—
 20 —○— ○ —○—
 30 —△— △ —△—
 40 —*— * —*—

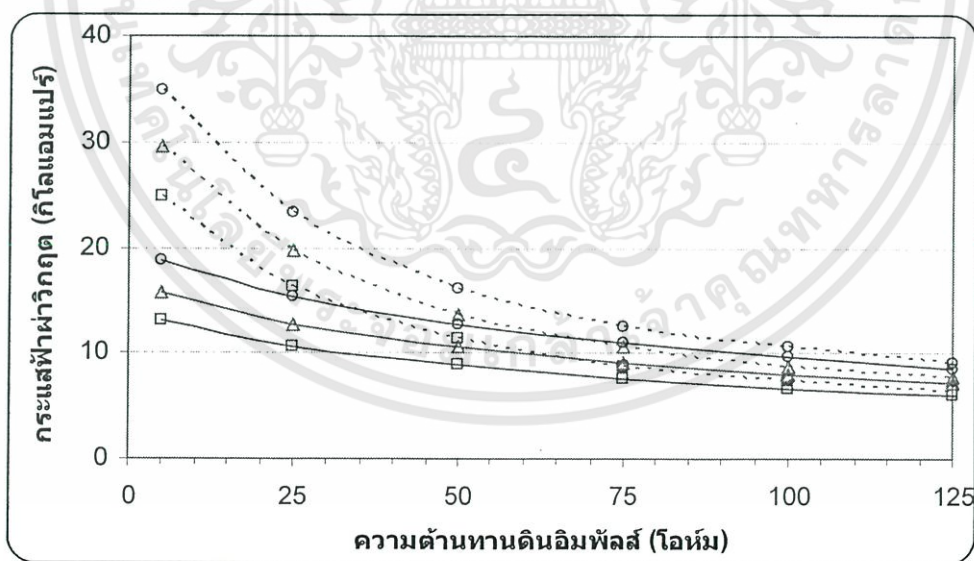
รูปที่ 4.64 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.85 และรูปที่ 4.65 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ่วิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้าผ่วิกฤตของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.85 ค่ากระแสไฟฟ้าผ่วิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าผ่วิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	13.17	24.78	15.71	29.55	18.72	34.93
25	10.68	16.27	12.74	19.80	15.27	23.40
50	8.95	11.40	10.68	13.60	12.62	16.07
75	7.56	8.66	9.02	10.63	10.93	12.57
100	6.72	7.36	8.01	8.78	9.61	10.65
125	6.08	6.50	7.25	7.76	8.57	9.17



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— - - □ - -

5 —△— - - △ - -

6 —○— - - ○ - -

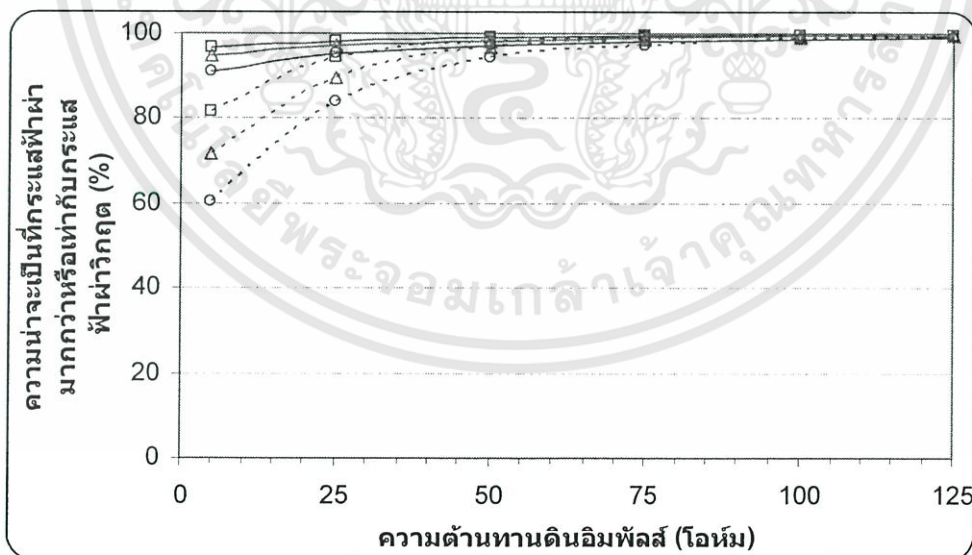
รูปที่ 4.65 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ่วิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.86 และรูปที่ 4.66 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับ กระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของ ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.86 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	96.87	81.46	94.72	71.82	91.26	60.33
25	98.34	94.15	97.17	89.78	95.14	83.98
50	99.03	97.97	98.34	96.56	97.25	94.36
75	99.42	99.12	99.01	98.36	98.21	97.28
100	99.60	99.47	99.31	99.09	98.79	98.35
125	99.71	99.64	99.49	99.37	99.15	98.96



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— □ —□—

5 —△— △ —△—

6 —○— ○ —○—

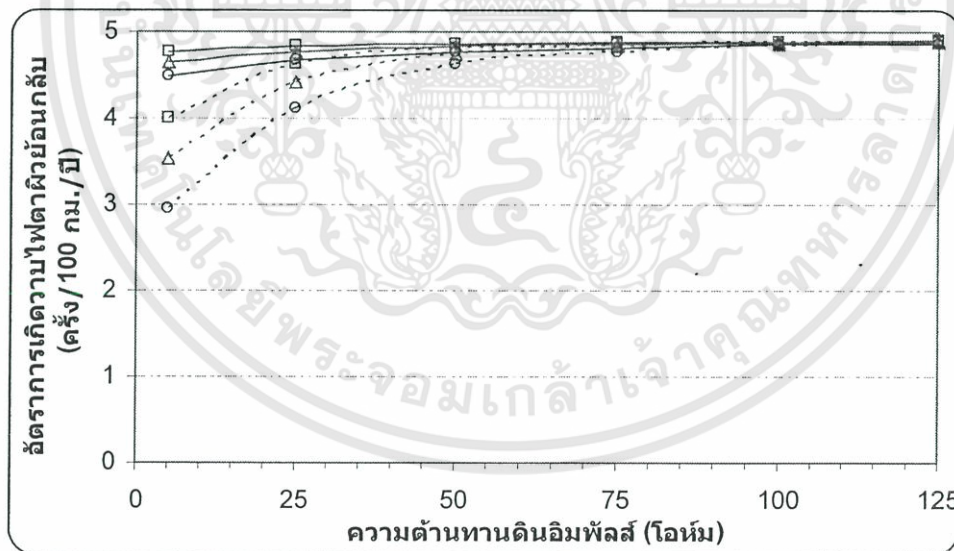
รูปที่ 4.66 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.87 และรูปที่ 4.67 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.87 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.76	4.00	4.65	3.53	4.48	2.96
25	4.83	4.62	4.77	4.41	4.67	4.12
50	4.86	4.81	4.83	4.74	4.77	4.63
75	4.88	4.87	4.86	4.83	4.82	4.78
100	4.89	4.88	4.88	4.87	4.85	4.83
125	4.90	4.89	4.89	4.88	4.87	4.86



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— ---□---

5 —△— ---△---

6 —○— ---○---

รูปที่ 4.67 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.88 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข

ตารางที่ 4.88 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที

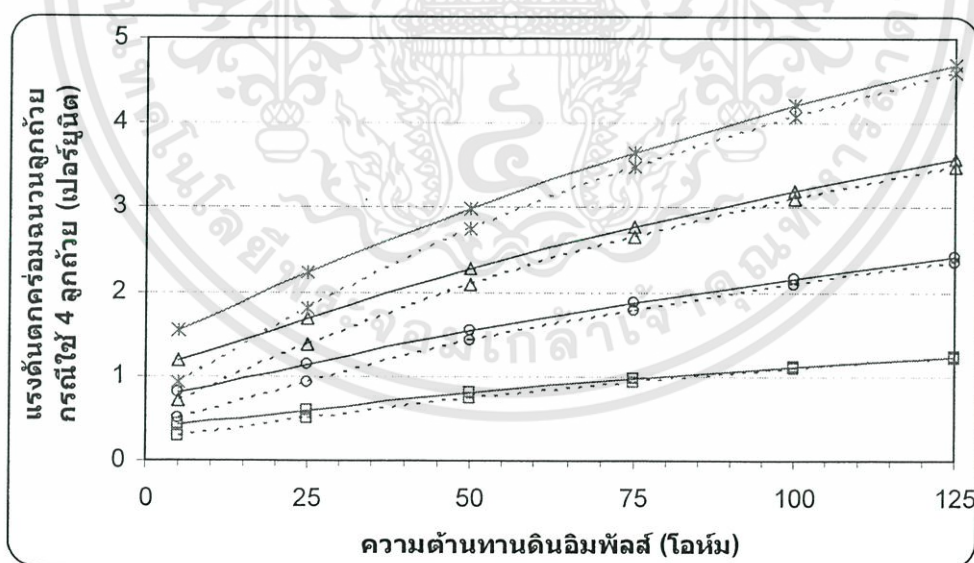
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	181	114	336	204	488	294	635	383
25	250	206	475	388	699	570	920	749
50	333	306	640	587	944	866	1244	1140
75	402	384	778	742	1150	1097	1515	1445
100	462	448	897	870	1326	1286	1747	1693
125	515	503	1001	978	1481	1446	1950	1903

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.89 และรูปที่ 4.68 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.88) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.89 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.44	0.27	0.81	0.49	1.18	0.71	1.53	0.92
25	0.60	0.50	1.14	0.93	1.68	1.37	2.22	1.80
50	0.80	0.74	1.54	1.41	2.27	2.09	3.00	2.75
75	0.97	0.93	1.87	1.79	2.77	2.64	3.65	3.48
100	1.11	1.08	2.16	2.10	3.20	3.10	4.21	4.08
125	1.24	1.21	2.41	2.36	3.57	3.48	4.70	4.59



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
10	—□—	---□---
20	—○—	---○---
30	—△—	---△---
40	—*—	---*---

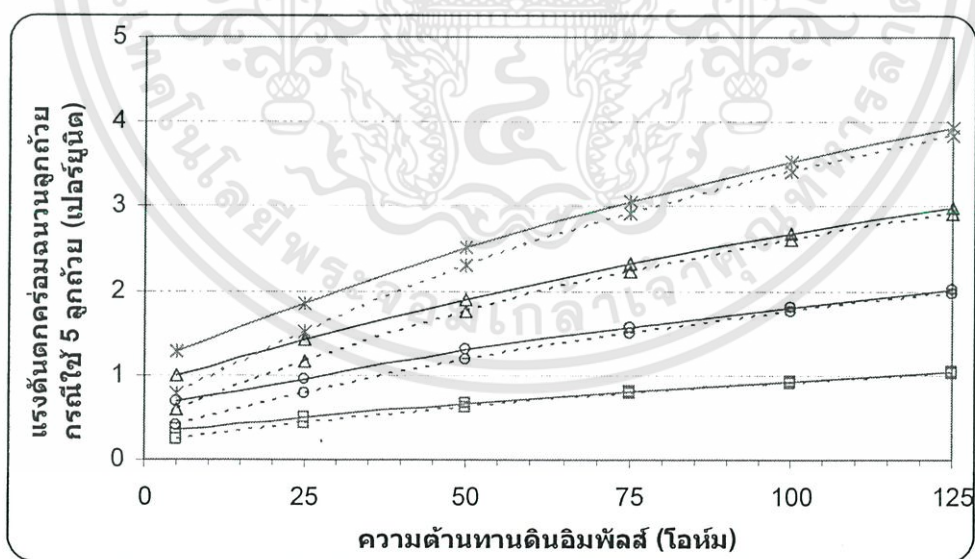
รูปที่ 4.68 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.90 และรูปที่ 4.69 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.88) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.90 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.37	0.23	0.68	0.41	0.99	0.59	1.28	0.77
25	0.51	0.42	0.96	0.78	1.41	1.15	1.86	1.51
50	0.67	0.62	1.29	1.19	1.91	1.75	2.51	2.30
75	0.81	0.78	1.57	1.50	2.32	2.22	3.06	2.92
100	0.93	0.91	1.81	1.76	2.68	2.60	3.53	3.42
125	1.04	1.02	2.02	1.98	2.99	2.92	3.94	3.84



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— —□—
 20 —○— —○—
 30 —△— —△—
 40 —*— —*—

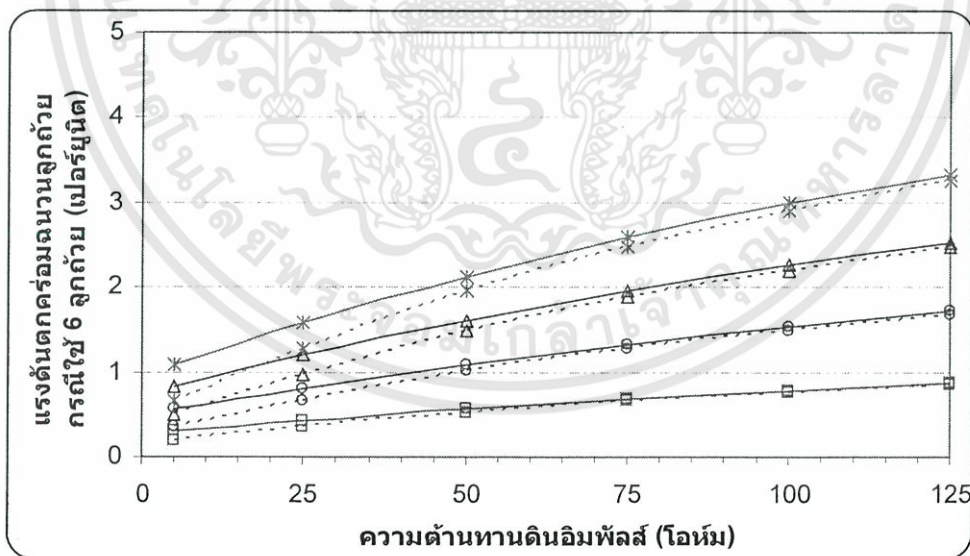
รูปที่ 4.69 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.91 และรูปที่ 4.70 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.88) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.91 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.31	0.19	0.57	0.35	0.83	0.50	1.09	0.65
25	0.43	0.35	0.81	0.66	1.19	0.97	1.57	1.28
50	0.57	0.52	1.09	1.00	1.61	1.48	2.13	1.95
75	0.69	0.66	1.33	1.27	1.97	1.88	2.59	2.47
100	0.79	0.77	1.53	1.49	2.27	2.20	2.99	2.89
125	0.88	0.86	1.71	1.67	2.53	2.47	3.33	3.25



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
10	—□—	---□---
20	—○—	---○---
30	—△—	---△---
40	—*—	---*---

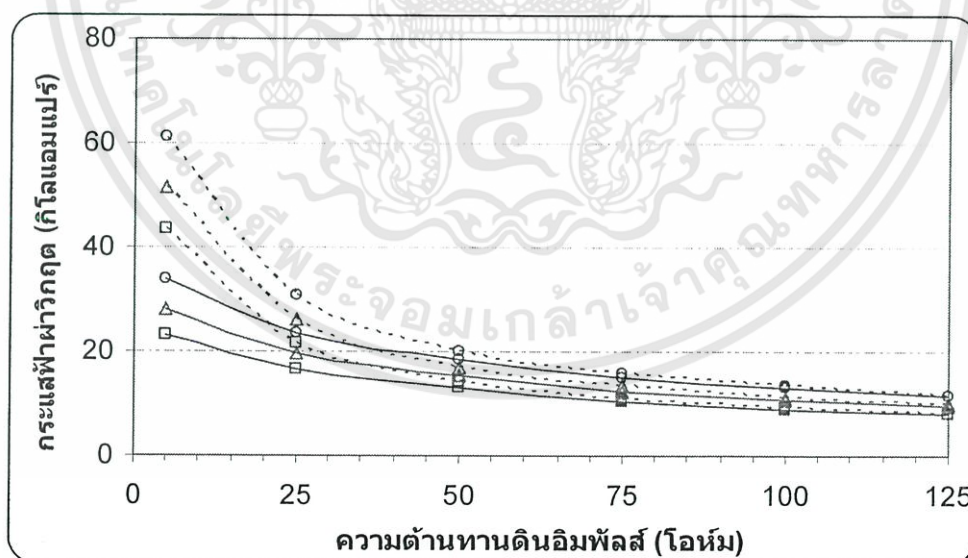
รูปที่ 4.70 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.92 และรูปที่ 4.71 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาน้ำคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.92 ค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าวิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	23.00	43.34	28.00	51.70	34.00	61.10
25	16.60	21.39	19.80	26.05	23.40	30.79
50	12.97	14.14	15.47	16.87	18.28	19.93
75	10.32	10.81	12.31	13.34	15.04	15.77
100	8.98	9.26	10.71	11.05	13.04	13.45
125	8.06	8.25	9.61	9.84	11.36	11.63



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 — □ — - - □ - -

5 — △ — - - △ - -

6 — ○ — - - ○ - -

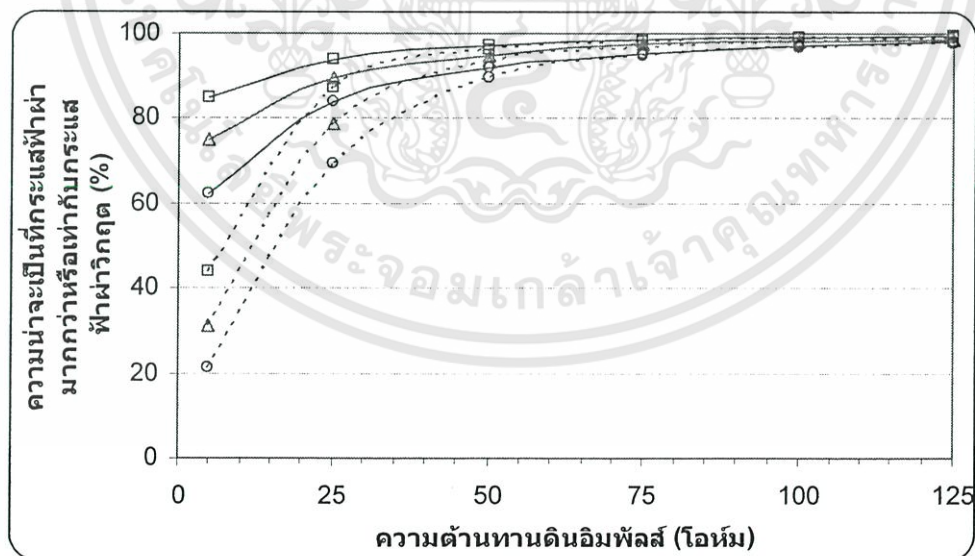
รูปที่ 4.71 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.93 และรูปที่ 4.72 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับ กระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของ ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.93 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	84.68	43.83	75.07	31.16	62.30	21.27
25	93.81	87.37	89.78	79.00	83.98	69.18
50	97.01	96.13	94.96	93.51	91.83	89.59
75	98.50	98.28	97.44	96.75	95.36	94.67
100	99.02	98.92	98.32	98.16	96.96	96.67
125	99.30	99.24	98.79	98.70	98.00	97.85



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 4 —□— —□—
 5 —△— —△—
 6 —○— —○—

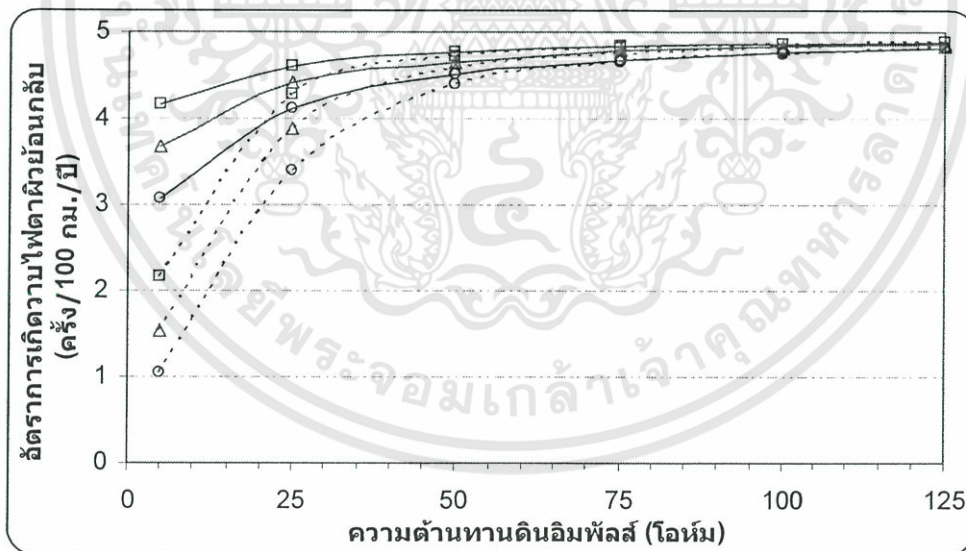
รูปที่ 4.72 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.94 และรูปที่ 4.73 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิพัสต์ ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.94 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิพัสต์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.16	2.15	3.69	1.53	3.06	1.04
25	4.61	4.29	4.41	3.88	4.12	3.40
50	4.76	4.72	4.66	4.59	4.51	4.40
75	4.84	4.83	4.78	4.75	4.68	4.65
100	4.86	4.86	4.83	4.82	4.76	4.75
125	4.88	4.87	4.85	4.85	4.81	4.80



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— ---□---

5 —△— ---△---

6 —○— ---○---

รูปที่ 4.73 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.95 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข

ตารางที่ 4.95 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที

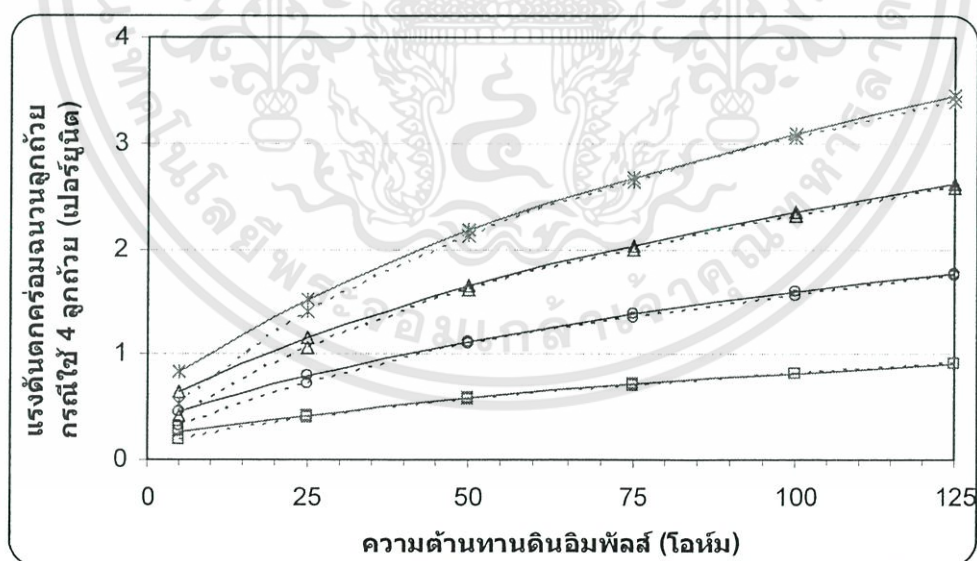
ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	107	80	190	135	271	171	350	219
25	176	163	327	302	478	440	628	580
50	245	239	465	453	684	666	902	878
75	298	293	571	561	842	827	1112	1092
100	342	337	658	649	973	960	1283	1265
125	379	375	732	724	1084	1072	1429	1412

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.96 และรูปที่ 4.74 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.95) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.96 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.26	0.19	0.46	0.33	0.65	0.41	0.84	0.53
25	0.42	0.39	0.79	0.73	1.15	1.06	1.51	1.40
50	0.59	0.58	1.12	1.09	1.65	1.60	2.17	2.12
75	0.72	0.71	1.38	1.35	2.03	1.99	2.68	2.63
100	0.82	0.81	1.59	1.56	2.34	2.31	3.09	3.05
125	0.91	0.90	1.76	1.74	2.61	2.58	3.44	3.40



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - □ - -

20 —○— - - ○ - -

30 —△— - - △ - -

40 —*— - - * - -

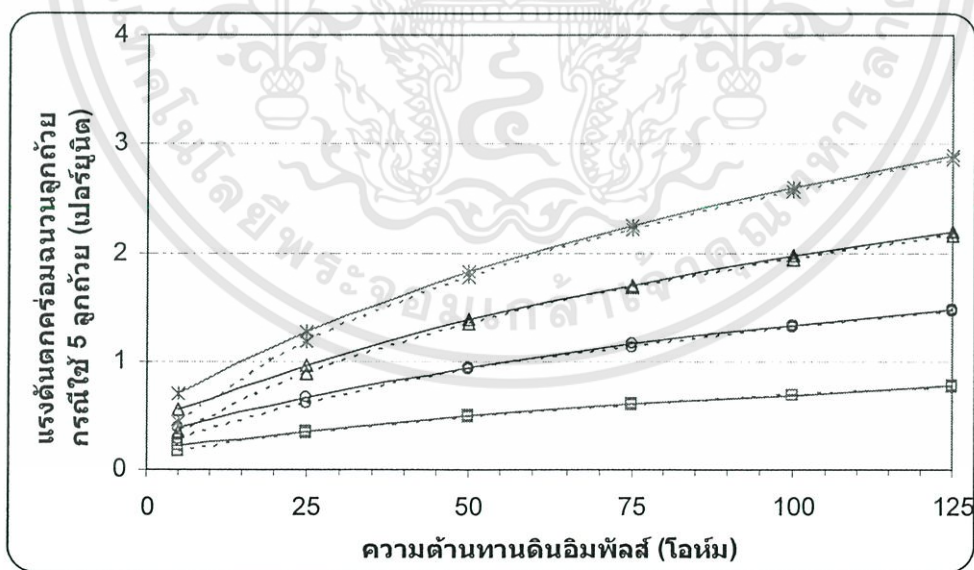
รูปที่ 4.74 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.97 และรูปที่ 4.75 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.95) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.97 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.22	0.16	0.38	0.27	0.55	0.35	0.71	0.44
25	0.36	0.33	0.66	0.61	0.97	0.89	1.27	1.17
50	0.49	0.48	0.94	0.92	1.38	1.35	1.82	1.77
75	0.60	0.59	1.15	1.13	1.70	1.67	2.25	2.21
100	0.69	0.68	1.33	1.31	1.97	1.94	2.59	2.56
125	0.77	0.76	1.48	1.46	2.19	2.17	2.89	2.85



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - □ - -

20 —○— - - ○ - -

30 —△— - - △ - -

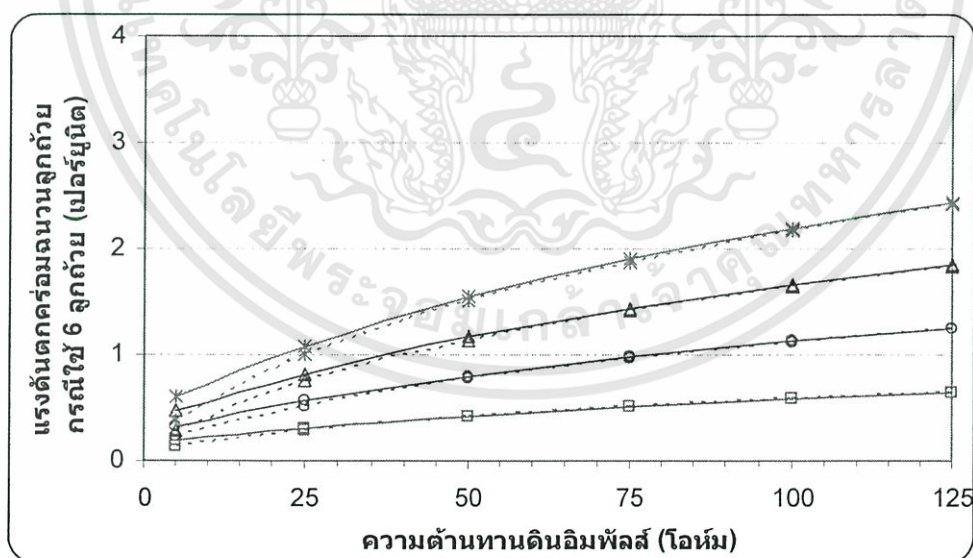
40 —*— - - * - -

รูปที่ 4.75 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมจำนวนลูกถ้วยกรณีใช้ 5 ลูกถ้วย
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.98 และรูปที่ 4.76 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 4.95) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.98 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)							
	10		20		30		40	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.18	0.14	0.32	0.23	0.46	0.29	0.60	0.37
25	0.30	0.28	0.56	0.52	0.82	0.75	1.07	0.99
50	0.42	0.41	0.79	0.77	1.17	1.14	1.54	1.50
75	0.51	0.50	0.98	0.96	1.44	1.41	1.90	1.87
100	0.58	0.58	1.12	1.11	1.66	1.64	2.19	2.16
125	0.65	0.64	1.25	1.24	1.85	1.83	2.44	2.41



กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์) โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

10 —□— - - - □ - - -

20 —○— - - - ○ - - -

30 —△— - - - △ - - -

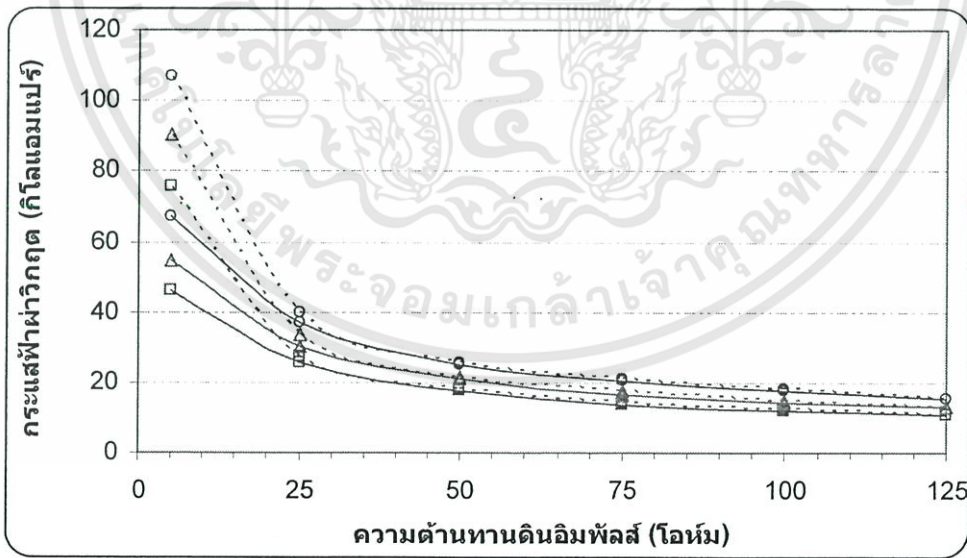
40 —*— - - - * - - -

รูปที่ 4.76 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยกรณีใช้ 6 ลูกถ้วย
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.99 และรูปที่ 4.77 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ่านวิกฤตที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในกรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ กับค่ากระแสไฟฟ้าผ่าน ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.99 ค่ากระแสไฟฟ้าผ่านวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้าผ่านวิกฤต (กิโลแอมแปร์)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	45.94	75.80	54.80	90.41	66.86	106.85
25	25.38	27.48	30.28	33.75	36.72	39.89
50	17.85	18.32	21.29	21.85	25.16	25.83
75	13.93	14.16	16.61	17.65	20.49	20.86
100	12.13	12.31	14.47	14.69	17.78	18.03
125	10.95	11.07	13.06	13.20	15.44	15.60



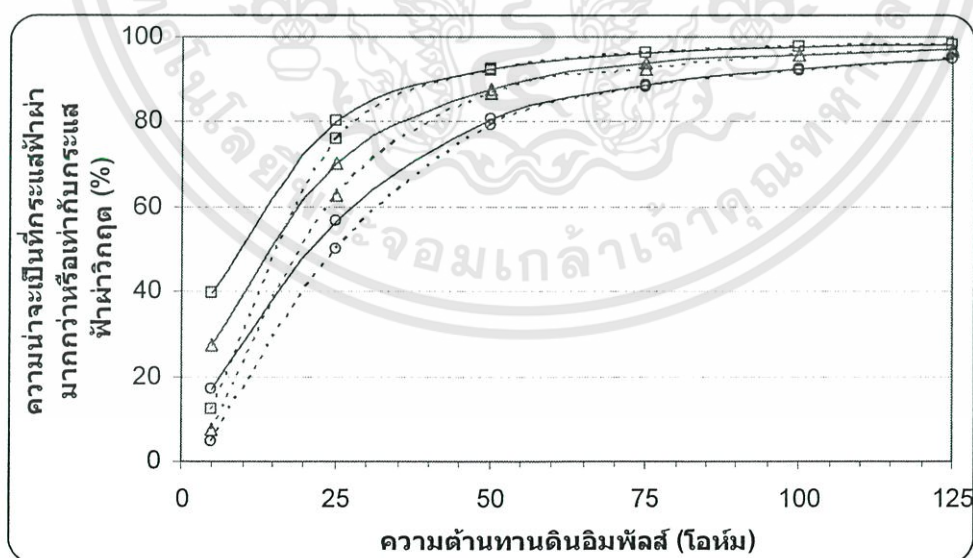
จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 4 — □ — — □ — —
 5 — △ — — △ — —
 6 — ○ — — ○ — —

รูปที่ 4.77 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าผ่านวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.100 และรูปที่ 4.78 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับ กระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของ ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.100 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแส ฟ้าผ่าวิกฤต (%)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	39.46	12.18	27.44	7.45	16.98	4.58
25	80.30	76.13	70.28	62.83	56.58	50.22
50	92.37	91.78	87.53	86.62	80.73	79.44
75	96.30	96.11	93.79	92.61	88.77	88.21
100	97.55	97.44	95.86	95.67	92.45	92.15
125	98.21	98.15	96.95	96.85	94.99	94.83



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— □ —□—

5 —△— △ —△—

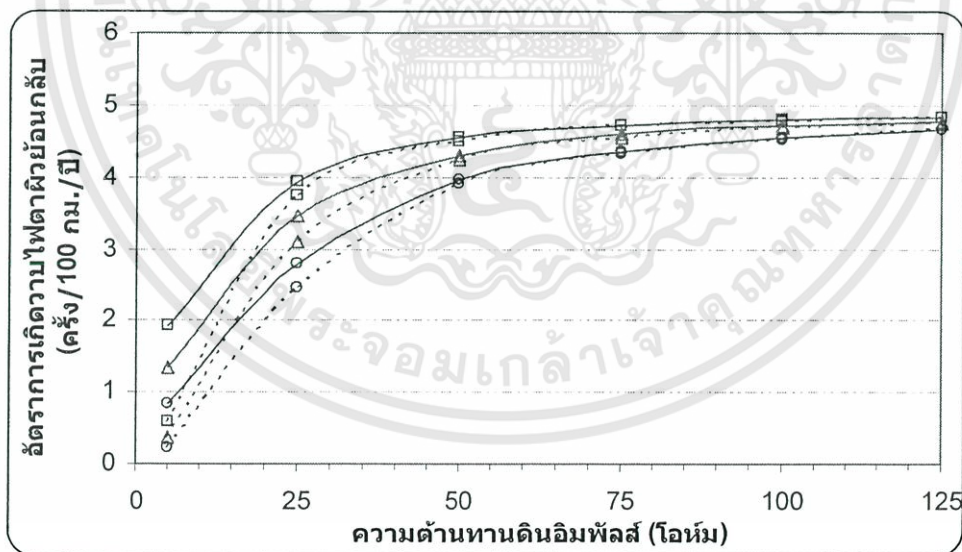
6 —○— ○ —○—

รูปที่ 4.78 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤตของลูกถ้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.101 และรูปที่ 4.79 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.101 ค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	อัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กม./ปี)					
	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	1.94	0.60	1.35	0.37	0.83	0.22
25	3.94	3.74	3.45	3.09	2.78	2.47
50	4.54	4.51	4.30	4.25	3.96	3.90
75	4.73	4.72	4.61	4.55	4.36	4.33
100	4.79	4.78	4.71	4.70	4.54	4.52
125	4.82	4.82	4.76	4.76	4.66	4.66



จำนวนลูกถ้วย โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

4 —□— - - □ - -

5 —△— - - △ - -

6 —○— - - ○ - -

รูปที่ 4.79 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย

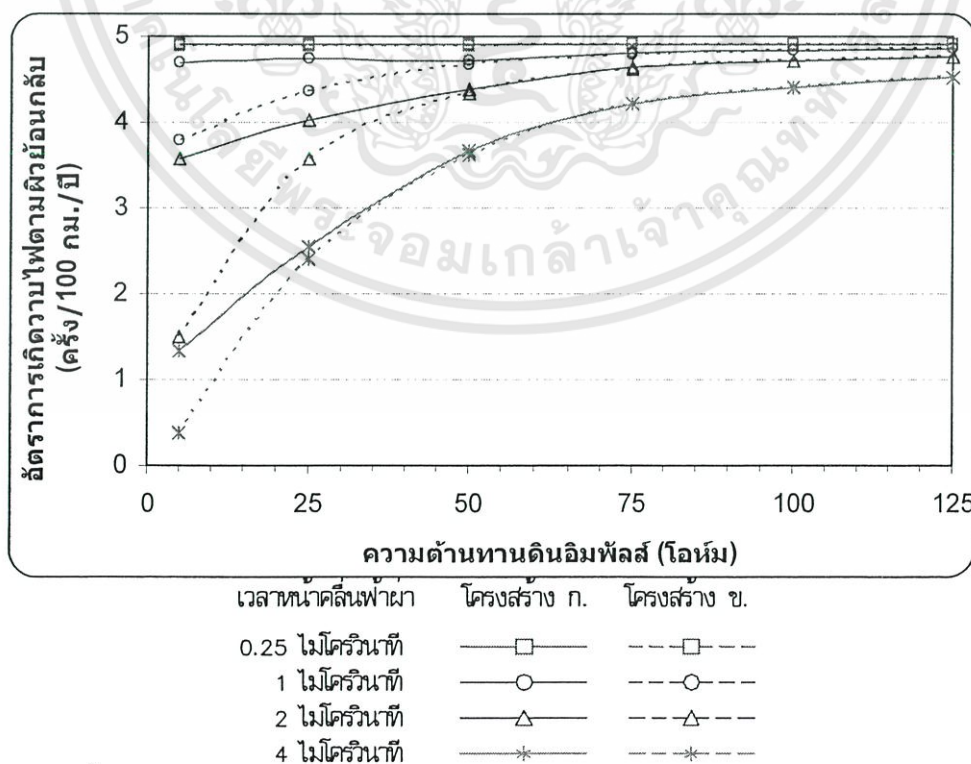
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 3

นำผลการวิเคราะห์จากขั้นตอนที่ 2 มาศึกษาเปรียบเทียบผลของอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ ที่เวลาหน้าคลื่นต่างๆ จากตารางที่ 4.102 และรูปที่ 4.80 แสดงค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.102 ค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า							
	0.25 ไมโครวินาที		1 ไมโครวินาที		2 ไมโครวินาที		4 ไมโครวินาที	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.90	4.88	4.69	3.78	3.56	1.50	1.33	0.37
25	4.90	4.89	4.73	4.35	4.02	3.57	2.54	2.41
50	4.90	4.89	4.72	4.67	4.39	4.32	3.67	3.61
75	4.90	4.89	4.80	4.79	4.64	4.61	4.23	4.22
100	4.90	4.89	4.84	4.83	4.72	4.71	4.41	4.40
125	4.90	4.89	4.86	4.85	4.77	4.76	4.51	4.51

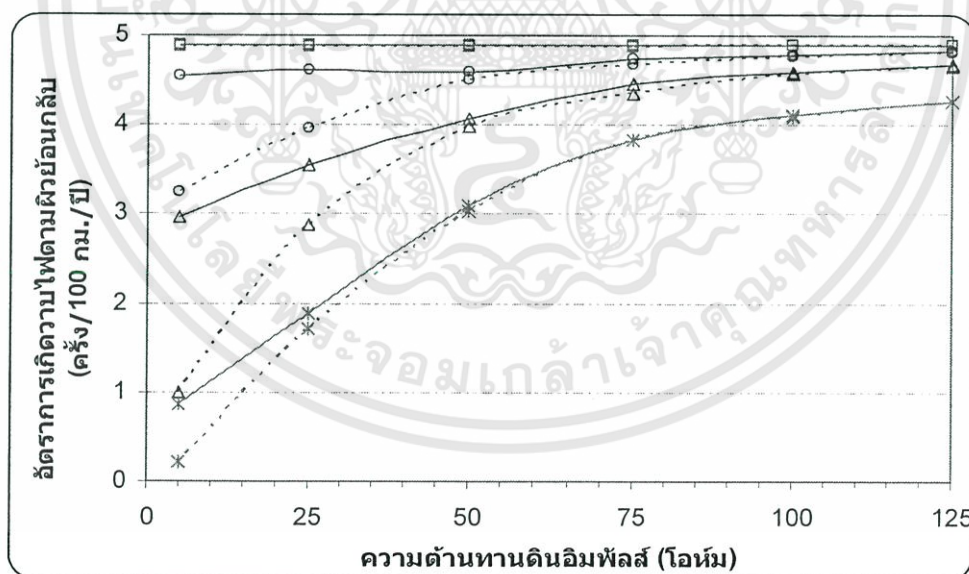


รูปที่ 4.80 แสดงอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เมื่อผู้ใช้งานเอกสารนี้จะต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขการใช้งาน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.103 และรูปที่ 4.81 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่าของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.103 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า							
	0.25 ไมโครวินาที		1 ไมโครวินาที		2 ไมโครวินาที		4 ไมโครวินาที	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.90	4.86	4.54	3.24	2.97	1.00	0.87	0.22
25	4.90	4.87	4.61	3.97	3.55	2.87	1.88	1.72
50	4.90	4.88	4.60	4.51	4.08	3.98	3.11	3.03
75	4.90	4.88	4.73	4.68	4.46	4.35	3.84	3.82
100	4.90	4.88	4.79	4.77	4.59	4.57	4.11	4.10
125	4.90	4.88	4.82	4.81	4.67	4.65	4.26	4.26



เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
0.25 ไมโครวินาที	—□—	---□---
1 ไมโครวินาที	—○—	---○---
2 ไมโครวินาที	—△—	---△---
4 ไมโครวินาที	—*—	---*---

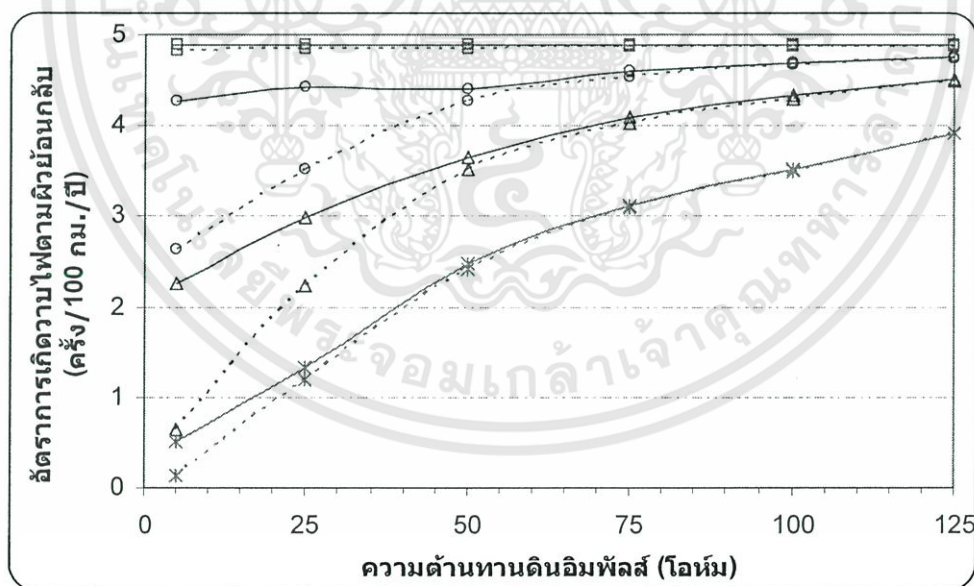
รูปที่ 4.81 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.104 และรูปที่ 4.82 แสดงค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่าของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.104 ค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า							
	0.25 ไมโครวินาที		1 ไมโครวินาที		2 ไมโครวินาที		4 ไมโครวินาที	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.89	4.83	4.28	2.63	2.26	0.65	0.50	0.14
25	4.89	4.85	4.42	3.51	2.99	2.24	1.33	1.20
50	4.89	4.85	4.41	4.28	3.66	3.53	2.49	2.41
75	4.89	4.86	4.60	4.54	4.10	4.04	3.12	3.09
100	4.89	4.86	4.69	4.66	4.33	4.29	3.52	3.50
125	4.89	4.87	4.76	4.74	4.52	4.49	3.92	3.92



เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
0.25 ไมโครวินาที	—□—	---□---
1 ไมโครวินาที	—○—	---○---
2 ไมโครวินาที	—△—	---△---
4 ไมโครวินาที	—*—	---*---

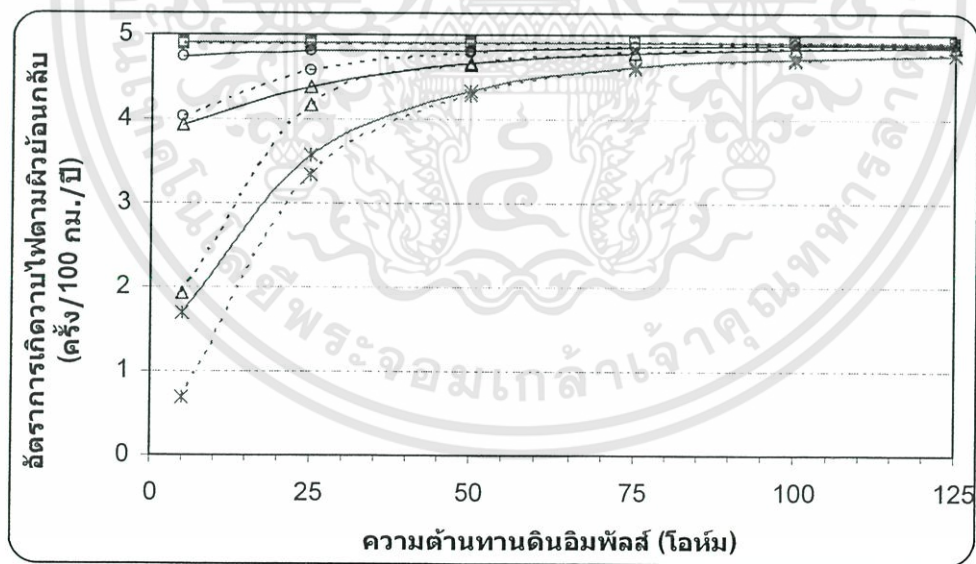
รูปที่ 4.82 แสดงค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.105 และรูปที่ 4.83 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่าของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.105 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า							
	0.25 ไมโครวินาที		1 ไมโครวินาที		2 ไมโครวินาที		4 ไมโครวินาที	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.90	4.88	4.75	4.02	3.93	1.92	1.68	0.69
25	4.90	4.89	4.80	4.58	4.37	4.16	3.57	3.33
50	4.90	4.89	4.82	4.79	4.68	4.64	4.32	4.28
75	4.90	4.89	4.86	4.85	4.80	4.78	4.61	4.60
100	4.90	4.90	4.88	4.87	4.83	4.83	4.70	4.70
125	4.90	4.90	4.89	4.88	4.85	4.85	4.76	4.75



เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
0.25 ไมโครวินาที	—□—	---□---
1 ไมโครวินาที	—○—	---○---
2 ไมโครวินาที	—△—	---△---
4 ไมโครวินาที	—*—	---*---

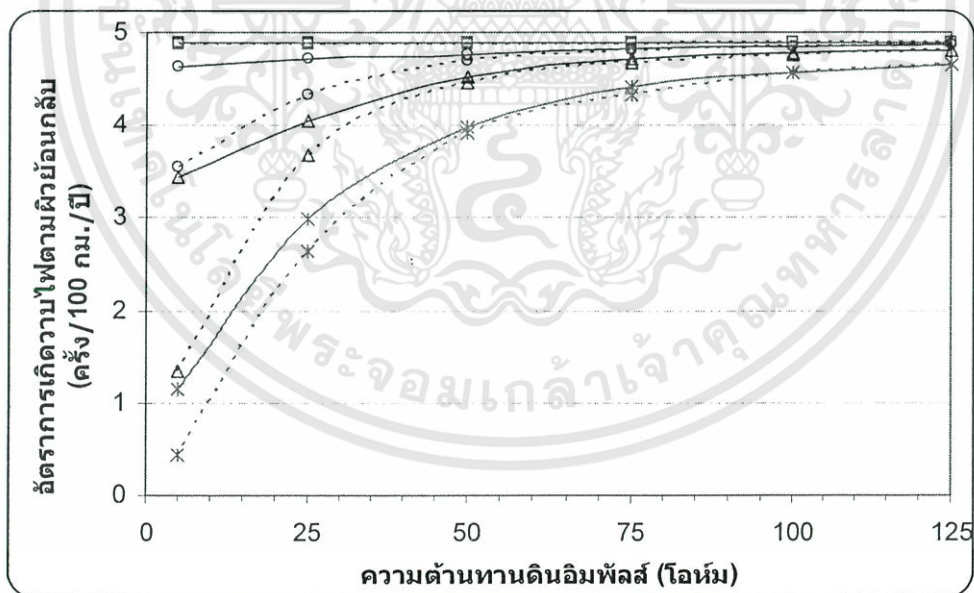
รูปที่ 4.83 แสดงอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.106 และรูปที่ 4.84 แสดงค่าอัตราการเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.106 ค่าอัตราการเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า							
	0.25 ไมโครวินาที		1 ไมโครวินาที		2 ไมโครวินาที		4 ไมโครวินาที	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.90	4.87	4.63	3.55	3.43	1.34	1.14	0.43
25	4.90	4.87	4.73	4.33	4.05	3.68	2.98	2.65
50	4.90	4.88	4.76	4.70	4.52	4.47	3.98	3.92
75	4.90	4.88	4.83	4.80	4.72	4.67	4.42	4.32
100	4.90	4.89	4.86	4.85	4.78	4.77	4.57	4.56
125	4.90	4.89	4.87	4.86	4.82	4.81	4.65	4.65



เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
0.25 ไมโครวินาที	—□—	---□---
1 ไมโครวินาที	—○—	---○---
2 ไมโครวินาที	—△—	---△---
4 ไมโครวินาที	—*—	---*---

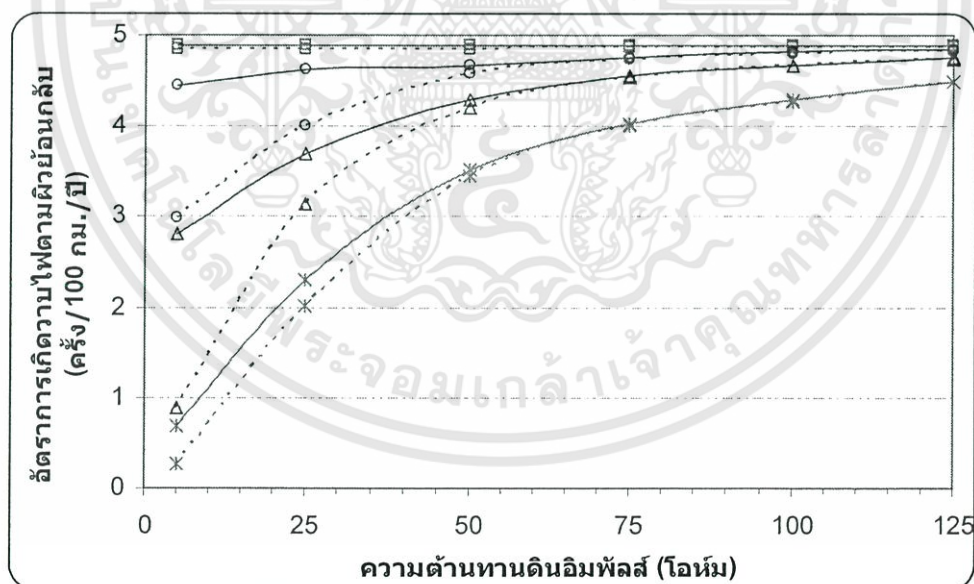
รูปที่ 4.84 แสดงค่าอัตราการเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.107 และรูปที่ 4.85 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่าของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.107 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า							
	0.25 ไมโครวินาที		1 ไมโครวินาที		2 ไมโครวินาที		4 ไมโครวินาที	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.89	4.84	4.44	2.99	2.81	0.90	0.69	0.26
25	4.89	4.85	4.61	4.01	3.70	3.15	2.31	2.02
50	4.89	4.86	4.66	4.57	4.29	4.21	3.53	3.45
75	4.89	4.86	4.76	4.73	4.56	4.52	4.03	3.99
100	4.89	4.87	4.81	4.79	4.68	4.66	4.29	4.27
125	4.90	4.87	4.84	4.83	4.75	4.74	4.49	4.48



เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
0.25 ไมโครวินาที	—□—	---□---
1 ไมโครวินาที	—○—	---○---
2 ไมโครวินาที	—△—	---△---
4 ไมโครวินาที	—*—	---*---

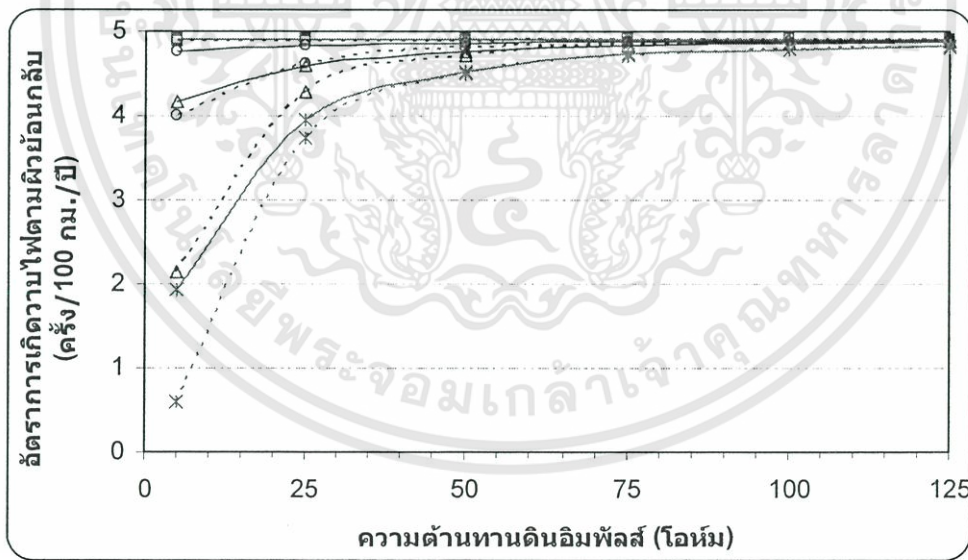
รูปที่ 4.85 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.108 และรูปที่ 4.86 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่าของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.108 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า							
	0.25 ไมโครวินาที		1 ไมโครวินาที		2 ไมโครวินาที		4 ไมโครวินาที	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.90	4.88	4.76	4.00	4.16	2.15	1.94	0.60
25	4.90	4.89	4.83	4.62	4.61	4.29	3.94	3.74
50	4.90	4.89	4.86	4.81	4.76	4.72	4.54	4.51
75	4.90	4.89	4.88	4.87	4.84	4.83	4.73	4.72
100	4.90	4.90	4.89	4.88	4.86	4.86	4.79	4.78
125	4.90	4.90	4.90	4.89	4.88	4.87	4.82	4.82



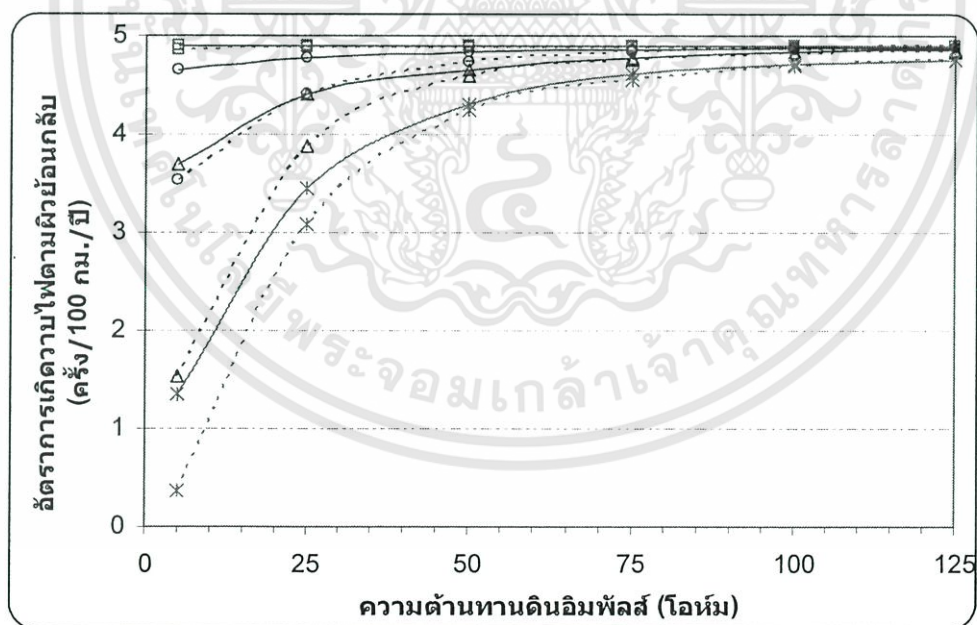
เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
0.25 ไมโครวินาที	—□—	---□---
1 ไมโครวินาที	—○—	---○---
2 ไมโครวินาที	—△—	---△---
4 ไมโครวินาที	—*—	---*---

รูปที่ 4.86 แสดงอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.109 และรูปที่ 4.87 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่าของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.109 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า							
	0.25 ไมโครวินาที		1 ไมโครวินาที		2 ไมโครวินาที		4 ไมโครวินาที	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.90	4.87	4.65	3.53	3.69	1.53	1.35	0.37
25	4.90	4.87	4.77	4.41	4.41	3.88	3.45	3.09
50	4.90	4.88	4.83	4.74	4.66	4.59	4.30	4.25
75	4.90	4.88	4.86	4.83	4.78	4.75	4.61	4.55
100	4.90	4.89	4.88	4.87	4.83	4.82	4.71	4.70
125	4.90	4.89	4.89	4.88	4.85	4.85	4.76	4.76



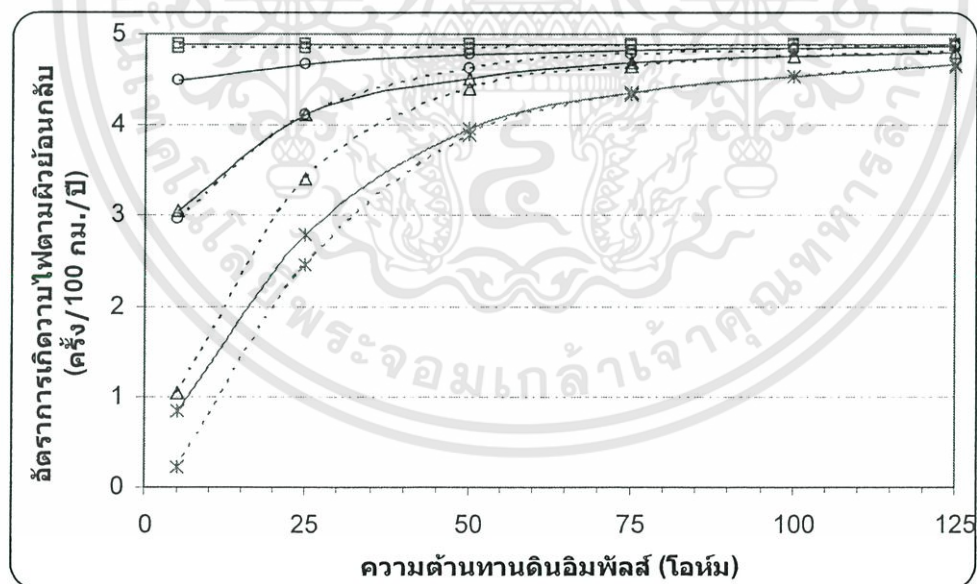
เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
0.25 ไมโครวินาที	—□—	---□---
1 ไมโครวินาที	—○—	---○---
2 ไมโครวินาที	—△—	---△---
4 ไมโครวินาที	—*—	---*---

รูปที่ 4.87 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.110 และรูปที่ 4.88 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่าของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.110 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า							
	0.25 ไมโครวินาที		1 ไมโครวินาที		2 ไมโครวินาที		4 ไมโครวินาที	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.89	4.84	4.48	2.96	3.06	1.04	0.83	0.22
25	4.89	4.85	4.67	4.12	4.12	3.40	2.78	2.47
50	4.89	4.86	4.77	4.63	4.51	4.40	3.96	3.90
75	4.89	4.86	4.82	4.78	4.68	4.65	4.36	4.33
100	4.89	4.86	4.85	4.83	4.76	4.75	4.54	4.52
125	4.90	4.87	4.87	4.86	4.81	4.80	4.66	4.66



เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า	โครงสร้าง ก.	โครงสร้าง ข.
0.25 ไมโครวินาที	—□—	- -□- -
1 ไมโครวินาที	—○—	- -○- -
2 ไมโครวินาที	—△—	- -△- -
4 ไมโครวินาที	—*—	- -*- -

รูปที่ 4.88 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 4

นำผลการวิเคราะห์จากขั้นตอนที่ 2 มาศึกษาเปรียบเทียบผลของอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ ที่ระยะห่างระหว่างเสา ค่าต่างๆ จากตารางที่ 4.111 และรูปที่ 4.89 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาน้ำคลื่นฟ้าผ่า 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.111 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย เวลาน้ำคลื่นฟ้า 0.25 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.90	4.88	4.90	4.88	4.90	4.88
25	4.90	4.89	4.90	4.89	4.90	4.89
50	4.90	4.89	4.90	4.89	4.90	4.89
75	4.90	4.89	4.90	4.89	4.90	4.89
100	4.90	4.89	4.90	4.90	4.90	4.90
125	4.90	4.89	4.90	4.90	4.90	4.90



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

40 เมตร —□— - - - □ - - -

80 เมตร —○— - - - ○ - - -

120 เมตร —△— - - - △ - - -

รูปที่ 4.89 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.112 และรูปที่ 4.90 แสดงค่าอัตราการเกิดวามไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.112 ค่าอัตราการเกิดวามไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 0.25 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.90	4.86	4.90	4.87	4.90	4.87
25	4.90	4.87	4.90	4.87	4.90	4.87
50	4.90	4.88	4.90	4.88	4.90	4.88
75	4.90	4.88	4.90	4.88	4.90	4.88
100	4.90	4.88	4.90	4.89	4.90	4.89
125	4.90	4.88	4.90	4.89	4.90	4.89



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 40 เมตร —□— —□—
 80 เมตร —○— —○—
 120 เมตร —△— —△—

รูปที่ 4.90 แสดงค่าอัตราการเกิดวามไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.113 และรูปที่ 4.91 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 0.25 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.113 ค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.89	4.83	4.89	4.84	4.89	4.84
25	4.89	4.85	4.89	4.85	4.89	4.85
50	4.89	4.85	4.89	4.86	4.89	4.86
75	4.89	4.86	4.89	4.86	4.89	4.86
100	4.89	4.86	4.89	4.87	4.89	4.86
125	4.89	4.87	4.90	4.87	4.90	4.87



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

40 เมตร —□— □ —□—

80 เมตร —○— ○ —○—

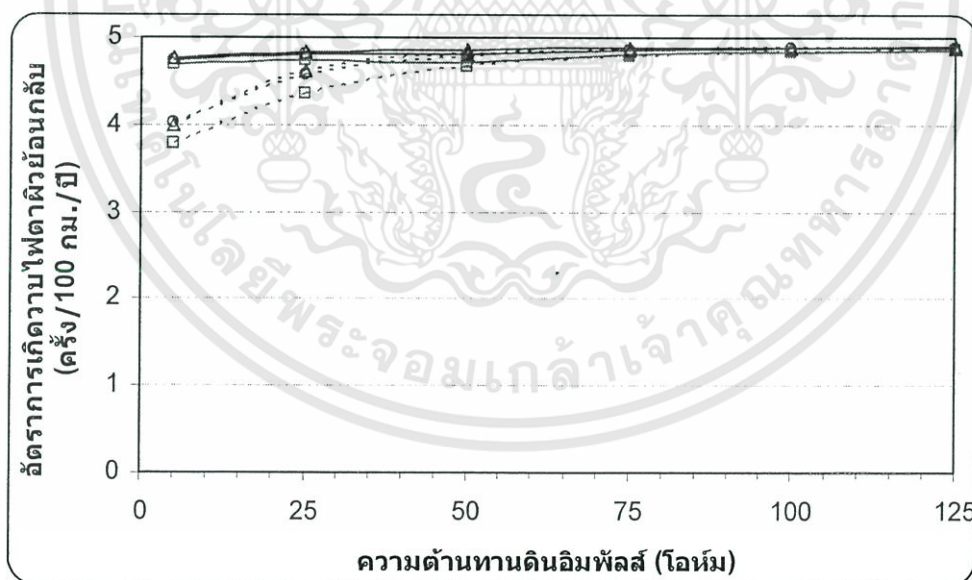
120 เมตร —△— △ —△—

รูปที่ 4.91 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.114 และรูปที่ 4.92 แสดงค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.114 ค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.69	3.78	4.75	4.02	4.76	4.00
25	4.73	4.35	4.80	4.58	4.83	4.62
50	4.72	4.67	4.82	4.79	4.86	4.81
75	4.80	4.79	4.86	4.85	4.88	4.87
100	4.84	4.83	4.88	4.87	4.89	4.88
125	4.86	4.85	4.89	4.88	4.90	4.89



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

40 เมตร —□— - - - □ - - -

80 เมตร —○— - - - ○ - - -

120 เมตร —△— - - - △ - - -

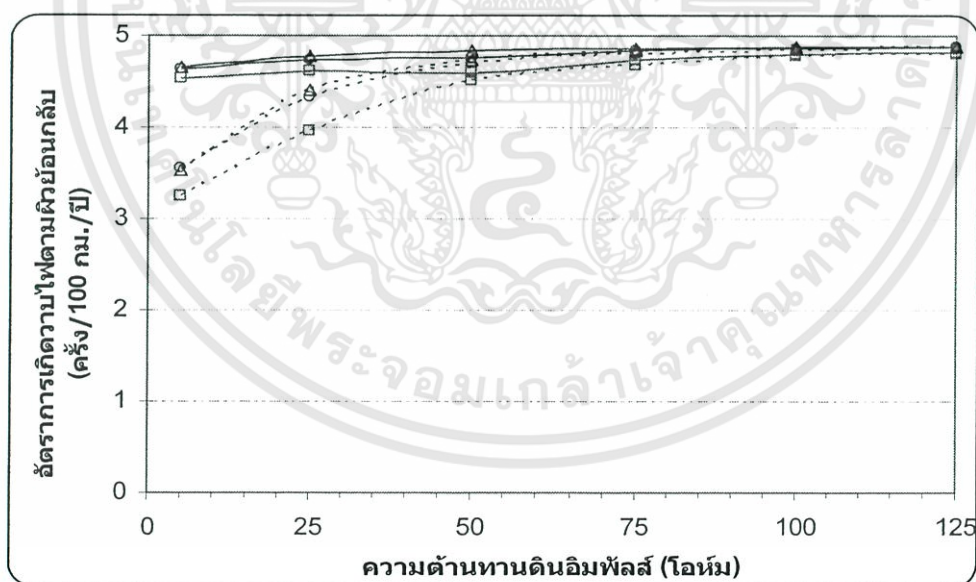
รูปที่ 4.92 แสดงค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.115 และรูปที่ 4.93 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.115 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.54	3.24	4.63	3.55	4.65	3.53
25	4.61	3.97	4.73	4.33	4.77	4.41
50	4.60	4.51	4.76	4.70	4.83	4.74
75	4.73	4.68	4.83	4.80	4.86	4.83
100	4.79	4.77	4.86	4.85	4.88	4.87
125	4.82	4.81	4.87	4.86	4.89	4.88



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

40 เมตร —□— —□—

80 เมตร —○— —○—

120 เมตร —△— —△—

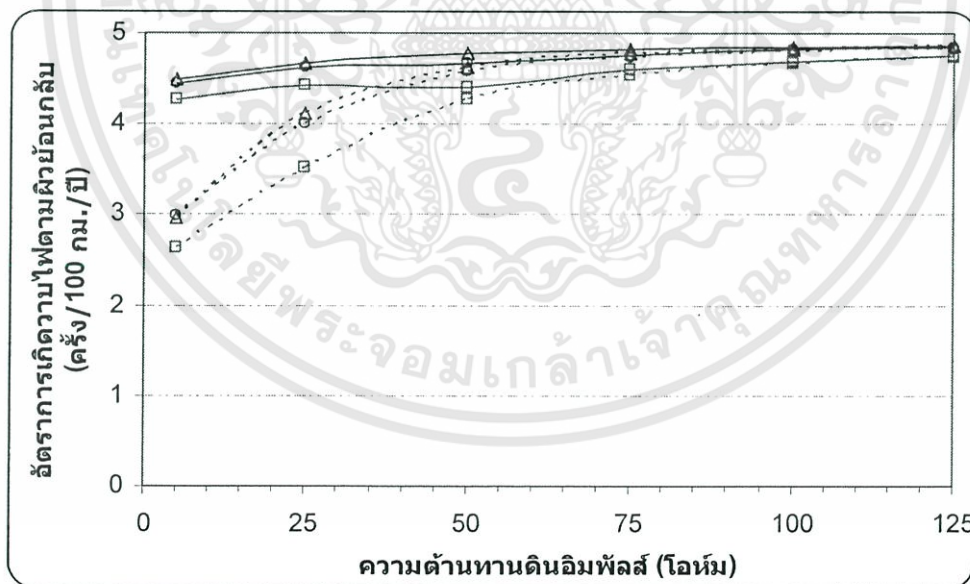
รูปที่ 4.93 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.116 และรูปที่ 4.94 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 1 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.116 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 1 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	4.28	2.63	4.44	2.99	4.48	2.96
25	4.42	3.51	4.61	4.01	4.67	4.12
50	4.41	4.28	4.66	4.57	4.77	4.63
75	4.60	4.54	4.76	4.73	4.82	4.78
100	4.69	4.66	4.81	4.79	4.85	4.83
125	4.76	4.74	4.84	4.83	4.87	4.86



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 40 เมตร —□— □ — □ —
 80 เมตร —○— ○ — ○ —
 120 เมตร —△— △ — △ —

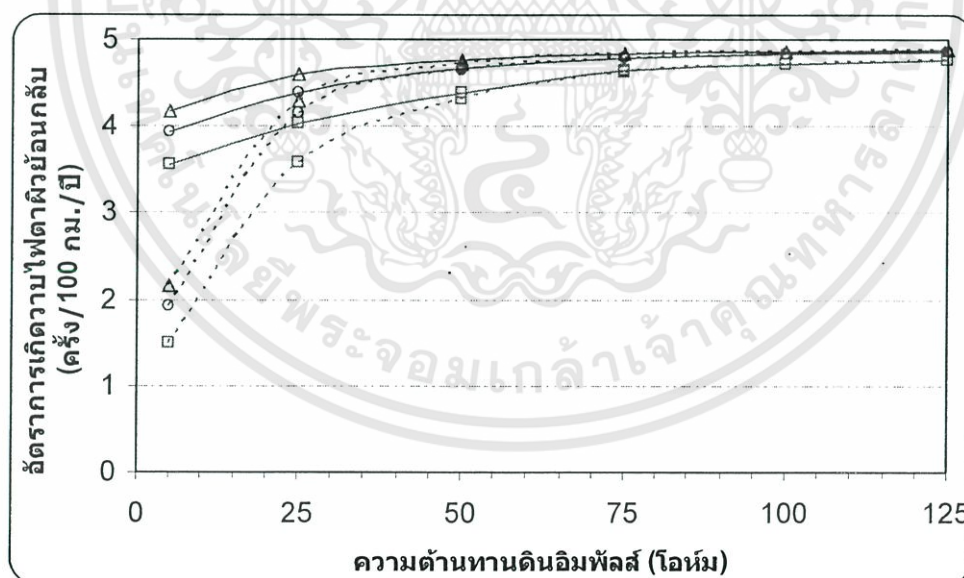
รูปที่ 4.94 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.117 และรูปที่ 4.95 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.117 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	3.56	1.50	3.93	1.92	4.16	2.15
25	4.02	3.57	4.37	4.16	4.61	4.29
50	4.39	4.32	4.68	4.64	4.76	4.72
75	4.64	4.61	4.80	4.78	4.84	4.83
100	4.72	4.71	4.83	4.83	4.86	4.86
125	4.77	4.76	4.85	4.85	4.88	4.87



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

40 เมตร —□— □ —□—

80 เมตร —○— ○ —○—

120 เมตร —△— △ —△—

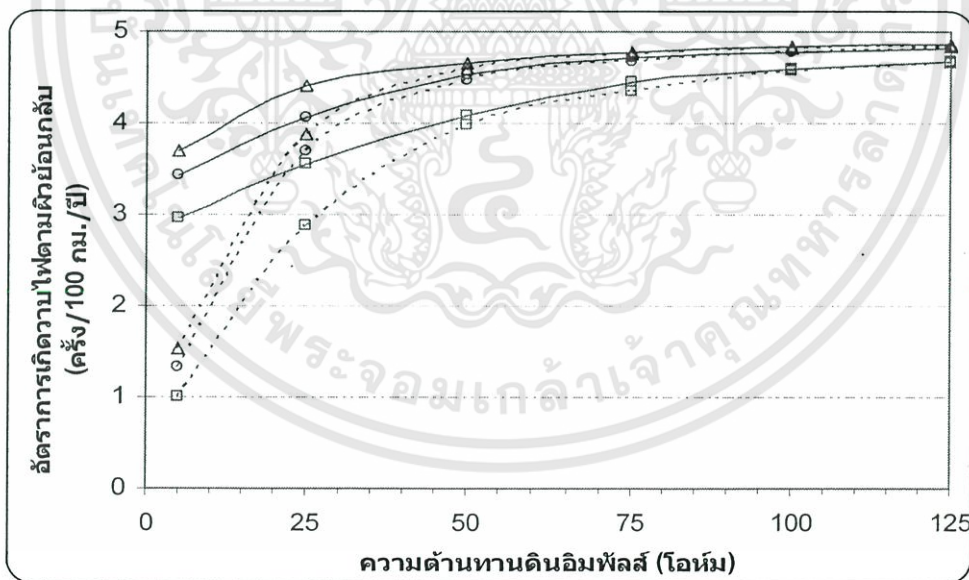
รูปที่ 4.95 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.118 และรูปที่ 4.96 แสดงค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.118 ค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	2.97	1.00	3.43	1.34	3.69	1.53
25	3.55	2.87	4.05	3.68	4.41	3.88
50	4.08	3.98	4.52	4.47	4.66	4.59
75	4.46	4.35	4.72	4.67	4.78	4.75
100	4.59	4.57	4.78	4.77	4.83	4.82
125	4.67	4.65	4.82	4.81	4.85	4.85



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 40 เมตร —□— □ — □ —
 80 เมตร —○— ○ — ○ —
 120 เมตร —△— △ — △ —

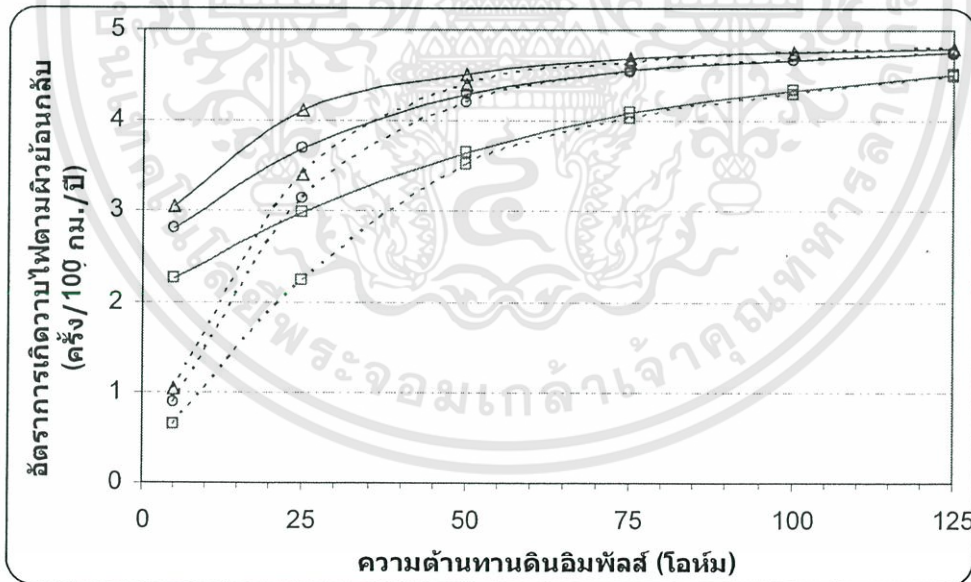
รูปที่ 4.96 แสดงค่าอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.119 และรูปที่ 4.97 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 2 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.119 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	2.26	0.65	2.81	0.90	3.06	1.04
25	2.99	2.24	3.70	3.15	4.12	3.40
50	3.66	3.53	4.29	4.21	4.51	4.40
75	4.10	4.04	4.56	4.52	4.68	4.65
100	4.33	4.29	4.68	4.66	4.76	4.75
125	4.52	4.49	4.75	4.74	4.81	4.80



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

40 เมตร —□— - - - □ - - -

80 เมตร —○— - - - ○ - - -

120 เมตร —△— - - - △ - - -

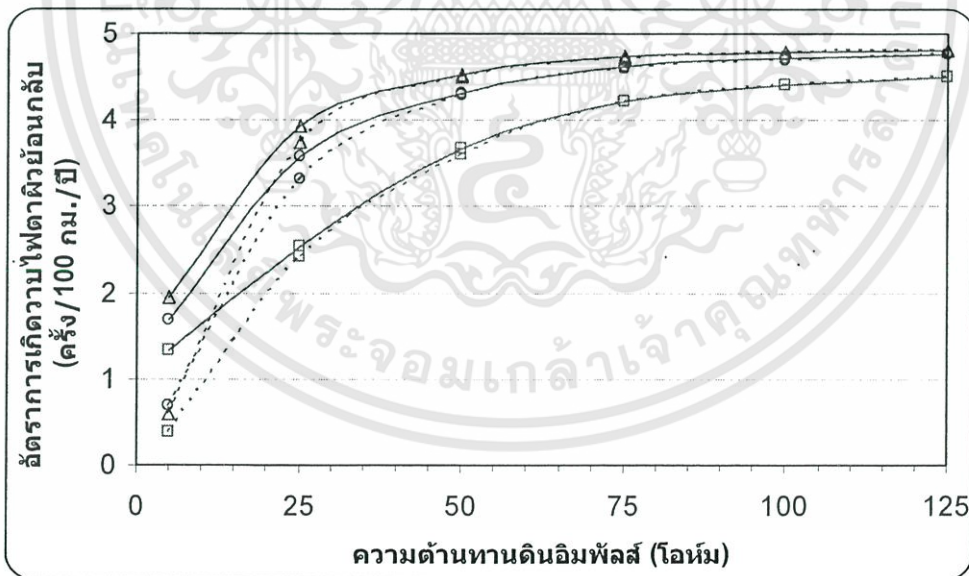
รูปที่ 4.97 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.120 และรูปที่ 4.98 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.120 ค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	1.33	0.37	1.68	0.69	1.94	0.60
25	2.54	2.41	3.57	3.33	3.94	3.74
50	3.67	3.61	4.32	4.28	4.54	4.51
75	4.23	4.22	4.61	4.60	4.73	4.72
100	4.41	4.40	4.70	4.70	4.79	4.78
125	4.51	4.51	4.76	4.75	4.82	4.82



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

40 เมตร —□— □ —□—

80 เมตร —○— ○ —○—

120 เมตร —△— △ —△—

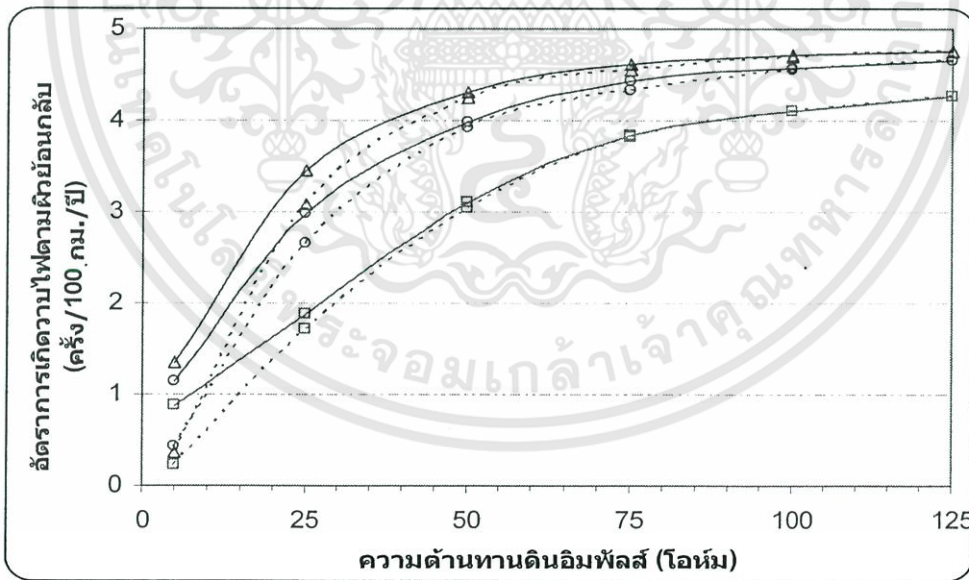
รูปที่ 4.98 แสดงค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.121 และรูปที่ 4.99 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.121 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 5 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.87	0.22	1.14	0.43	1.35	0.37
25	1.88	1.72	2.98	2.65	3.45	3.09
50	3.11	3.03	3.98	3.92	4.30	4.25
75	3.84	3.82	4.42	4.32	4.61	4.55
100	4.11	4.10	4.57	4.56	4.71	4.70
125	4.26	4.26	4.65	4.65	4.76	4.76



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.
 40 เมตร —□— - - □ - -
 80 เมตร —○— - - ○ - -
 120 เมตร —△— - - △ - -

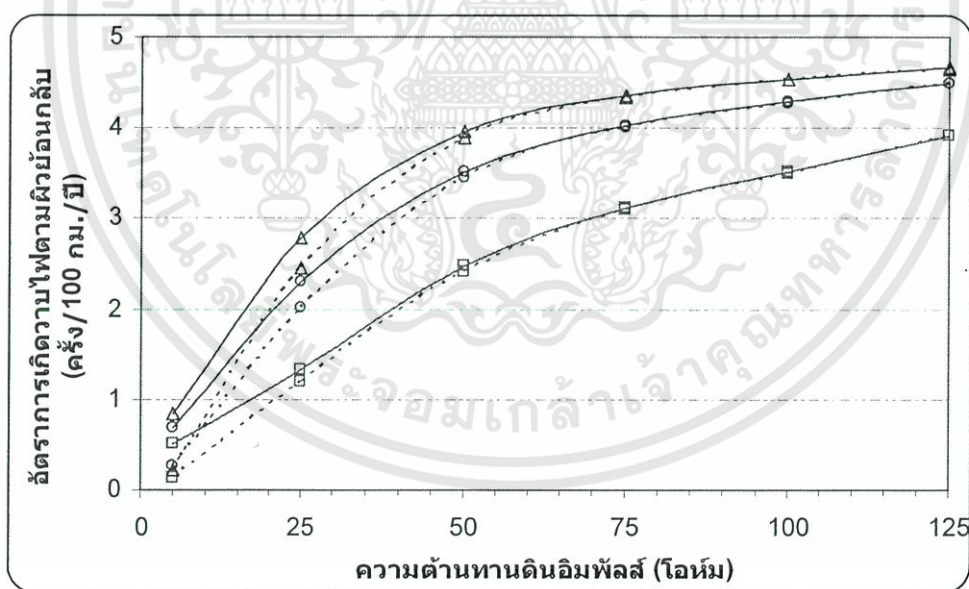
รูปที่ 4.99 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 5 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.122 และรูปที่ 4.100 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ(ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และระยะห่างระหว่างเสา ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 4 ไมโครวินาที ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.122 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณี 6 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	ระยะห่างระหว่างเสา (SPAN)					
	40 เมตร		80 เมตร		120 เมตร	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
5	0.50	0.14	0.69	0.26	0.83	0.22
25	1.33	1.20	2.31	2.02	2.78	2.47
50	2.49	2.41	3.53	3.45	3.96	3.90
75	3.12	3.09	4.03	3.99	4.36	4.33
100	3.52	3.50	4.29	4.27	4.54	4.52
125	3.92	3.92	4.49	4.48	4.66	4.66



ระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้าง ก. โครงสร้าง ข.

40 เมตร —□— - - - □ - - -

80 เมตร —○— - - - ○ - - -

120 เมตร —△— - - - △ - - -

รูปที่ 4.100 แสดงค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ลูกถ้วย 6 ลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 5

นำผลการวิเคราะห์จากขั้นตอนที่ 2 มาศึกษาหาค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่ทำให้ฉนวนลูกถ้วยไม่เกิดฉนวนไฟตามผิวย้อนกลับ จากตารางที่ 4.123-4.125 แสดงค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ ที่ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 0.25 ไมโครวินาที กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.123 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.124 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.125 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-

- หมายถึง ไม่มีค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ที่สามารถยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.126-4.128 แสดงค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ ที่ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร และเวลาหน่วงคลื่น 1 ไมโครวินาที กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.126 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	100	115	130	130	150	150
20	-	25	-	40	30	60
30	-	-	-	10	-	25
40	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.127 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	60	65	85	90	125	125
20	-	15	-	25	-	35
30	-	-	-	5	-	10
40	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.128 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	25	55	50	75	100	100
20	-	13	-	25	-	30
30	-	-	-	5	-	10
40	-	-	-	-	-	-

- หมายถึง ไม่มีค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ที่สามารถยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.129-4.131 แสดงค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ ที่ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.129 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	150	150	175	175	200	200
20	50	50	75	75	110	110
30	5	25	28	30	50	50
40	-	13	-	20	25	30

ตารางที่ 4.130 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	105	105	130	130	150	150
20	25	35	40	45	60	60
30	-	15	5	25	20	30
40	-	8	-	13	-	18

ตารางที่ 4.131 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	85	85	125	125	130	130
20	17	27	25	37	37	50
30	-	13	5	20	15	25
40	-	6	-	12	-	17

- หมายถึง ไม่มีค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ที่สามารถยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.132-4.134 แสดงค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ ที่ค่ากระแสฟ้าผ่า 10-40 กิโลแอมแปร์ ของระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, 120 เมตร และเวลาหน้าคลื่น 4 ไมโครวินาที กรณีใช้ลูกถ้วย 4-6 ลูกถ้วย ของโครงสร้าง ก. และ ข.

ตารางที่ 4.132 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	300	300	350	350	400	400
20	110	110	150	150	190	190
30	47	47	70	70	100	100
40	25	25	40	40	55	55

ตารางที่ 4.133 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	150	150	200	200	300	300
20	55	55	80	80	125	125
30	25	27	35	37	55	55
40	12	17	18	23	25	27

ตารางที่ 4.134 ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ (โอห์ม) กรณีระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	4 ลูกถ้วย		5 ลูกถ้วย		6 ลูกถ้วย	
	ก	ข	ก	ข	ก	ข
10	130	130	140	140	150	150
20	42	42	55	55	80	80
30	20	23	27	30	37	37
40	10	15	15	20	22	25

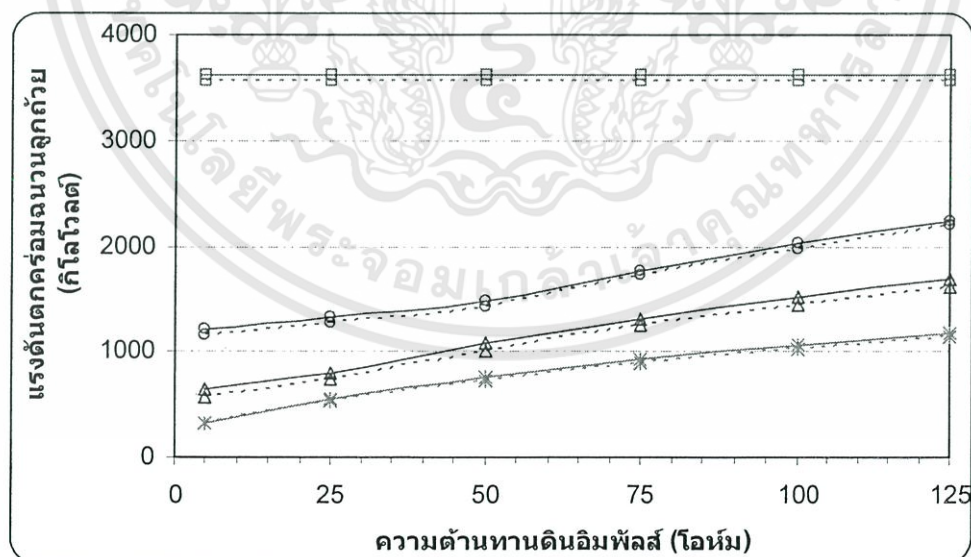
- หมายถึง ไม่มีค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ที่สามารถยอมรับได้

4.6 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 6

ศึกษาเปรียบเทียบผลกระแสฟ้าผ่าชั่วคราว และกระแสฟ้าผ่าชั่วลบที่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ตารางที่ 4.135 และรูปที่ 4.101 แสดงค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กรณีเกิดฟ้าผ่ากระแสฟ้าผ่าชั่วคราว และกระแสฟ้าผ่าชั่วลบ ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25-4 ไมโครวินาที ความต้านทานดินอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร และจำนวนฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ของโครงสร้าง ก.

ตารางที่ 4.135 ค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีเกิดกระแสฟ้าผ่า 40 กิโลแอมแปร์

ความต้านทาน ดินอิมพัลส์ (โอห์ม)	เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า							
	0.25 ไมโครวินาที		1 ไมโครวินาที		2 ไมโครวินาที		4 ไมโครวินาที	
	ก (+)	ก (-)	ก (+)	ก (-)	ก (+)	ก (-)	ก (+)	ก (-)
5	3612	3565	1214	1165	642	570	326	313
25	3612	3565	1325	1276	795	733	554	524
50	3612	3565	1472	1424	1072	1014	764	726
75	3612	3565	1772	1723	1316	1247	930	886
100	3612	3565	2025	1976	1519	1441	1066	1022
125	3612	3565	2236	2193	1694	1608	1183	1141



เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า โครงสร้าง ก. (ฟ้าผ่าชั่วคราว) โครงสร้าง ก. (ฟ้าผ่าชั่วลบ)

0.25 ไมโครวินาที —□— □—□—
 1 ไมโครวินาที —○— ○—○—
 2 ไมโครวินาที —△— △—△—
 4 ไมโครวินาที —*— *—*—

รูปที่ 4.101 แสดงค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย (กิโลโวลต์) กรณีเกิดกระแสฟ้าผ่า 40 กิโลแอมแปร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) โดยการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา (External Ground Wire) กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 69 กิโลโวลต์ ด้วยโปรแกรม Electromagnetic Transients Program (EMTP) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะทรานเซียนต์ โดยมีเป้าหมายที่จะเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ให้กับระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าระดับแรงดัน 69 กิโลโวลต์เดิมที่มีการใช้งานแล้วเป็นส่วนใหญ่ และเป็นแนวทางในการพิจารณาปรับปรุงมาตรฐานการก่อสร้างใหม่เพื่อรองรับการขยายเขตอุตสาหกรรมในอนาคตต่อไป ซึ่งจากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. สำหรับการศึกษานี้จะพิจารณาถึงความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาจุดคุ้มทุนในการติดตั้งสายดินนอกเสาว่าคุ้มค่ากับการลงทุนหรือไม่ ซึ่งได้คำนวณเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของความเสียหายจากไฟฟ้าดับที่ลดลง สรุปได้ว่าการติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้น และการติดตั้งดินเวนตัน ให้ระยะเวลาคืนทุนประมาณ 5 ปี เท่ากัน อย่างไรก็ตามในปีที่ 6 เป็นต้นไปการติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้นจะลดอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้มากกว่าการติดตั้งสายดินนอกเสาดินเวนตัน ดังแสดงตารางที่ 4.17 ดังนั้นวิทยานิพนธ์จึงเลือกวิธีติดตั้งสายดินนอกเสาทุกต้น (โครงสร้าง ข) เป็นแนวทางที่จะปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ต่อไป

2. ค่าความต้านทานดินที่ฐานเสามีความสำคัญต่ออัตราการเกิดไฟฟ้าขัดข้องของระบบไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่า ยิ่งค่าความต้านทานดินที่ฐานเสามีค่าต่ำมากขนาดของกระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่จะทำให้เกิดไฟฟ้าขัดข้องของระบบไฟฟ้าจะยิ่งมากขึ้น นั่นหมายถึงความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่ากระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ามีน้อยลง และส่งผลให้โอกาสการเกิดการเกิดความผิดปกติเพิ่มขึ้นในระบบไฟฟ้ามีน้อยลง เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.66 ที่เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า 2 ไมโครวินาที ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร จำนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย เมื่อความต้านทานดินอิมพัลส์ลดลงจาก 125 โอห์ม เหลือ 5 โอห์ม พิจารณาโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา (โครงสร้าง ก) อัตราการเกิดวาวไฟตามผิวข้อนกลับมีค่าลดลงจาก 4.85 เหลือ 3.93 ครั้งต่อ 100 กิโลเมตรต่อปี หรือลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาโครงสร้างที่ปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยการ

ต่อเพิ่มสายดินนอกเสาทุกต้น(โครงสร้าง ข) อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับมีค่าลดลงจาก 4.85 เหลือ 1.92 ครั้งต่อ 100 กิโลเมตรต่อปี หรือลดลงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความต้านทานดินที่ฐานเสามีความสำคัญต่ออัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับของระบบเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างที่มีการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา(โครงสร้าง ข.) จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อความต้านทานดินที่ฐานเสามีค่าต่ำด้วยเช่นกัน เช่น ที่ความต้านทานดินอิมพัลส์ 5 โอห์ม (ความต้านทานดินความถี่กำลังเท่ากับ 10 โอห์ม ข้อแนะนำของ กฟน.) อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ มีค่าลดลงจาก 3.93 เหลือ 1.92 ครั้งต่อ 100 กิโลเมตรต่อปี หรือลดลงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ต่อสายดินนอกเสา (โครงสร้าง ก.) และเมื่อความต้านทานดินอิมพัลส์สูงกว่า 100 โอห์ม การต่อเพิ่มสายดินนอกเสาจะไม่สามารถลดผลของอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับได้เลย ดังนั้นก่อนที่จะพิจารณาติดตั้งสายดินนอกเสา ควรที่จะพิจารณาการลดค่าความต้านทานดินให้มีค่าต่ำที่สุดก่อนเป็นอันดับแรก

3. อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับของระบบไฟฟ้าจะแปรผกผันกับช่วงเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า โดยเมื่อเวลาหน้าคลื่นสูงจะส่งผลอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับมีค่าต่ำเนื่องจากคลื่นสะท้อนจากฐานเสา และเสาข้างเคียงสามารถเดินทางมาหักล้างแรงดันเกินค่ายอดที่หัวเสาได้ทัน เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.105 ที่ความต้านทานดินอิมพัลส์ 5 โอห์ม ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร จำนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่าที่เพิ่มขึ้นจาก 0.25 ไมโครวินาที เป็น 4 ไมโครวินาที พิจารณาที่โครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา(โครงสร้าง ก.) อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ มีค่าลดลงจาก 4.9 เหลือ 1.68 ครั้งต่อ 100 กิโลเมตรต่อปี หรือลดลงประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาโครงสร้างที่ปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสาทุกต้น(ข) อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับมีค่าลดลงจาก 1.68 เหลือ 0.69 ครั้งต่อ 100 กิโลเมตรต่อปี หรือลดลงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับทุกๆเวลาหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่า ที่ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ค่าสูงกว่า 100 โอห์ม การต่อเพิ่มสายดินนอกเสาจะไม่สามารถลดผลของอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับได้เลย เช่นเดียวกับข้อสรุปในข้อ 2 ใดๆก็ตามเวลาหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่า เป็นองค์ประกอบที่ไม่สามารถควบคุมได้ จะขึ้นอยู่กับโอกาส (Probability) ในการเกิดฟ้าผ่าในแต่ละครั้ง

4. ระยะห่างระหว่างเสา มีผลต่ออัตราการเกิดวาทไฟตามผิวของระบบไฟฟ้าเนื่องจากผลของคลื่นสะท้อนกลับของเสิร์จฟ้าผ่าจากเสาดันที่อยู่ข้างเคียง เดินทางกลับมาหักล้างแรงดันเกินค่ายอดที่เสาดันที่ถูกฟ้าผ่า เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.117 ที่ความต้านทานดินอิมพัลส์ 5 โอห์ม เวลาหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่า 2 ไมโครวินาที จำนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสาที่ลดลงจาก 120 เมตร เป็น 80 และ 40 เมตร พิจารณาที่โครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา(โครงสร้าง ก.) อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ มีค่าลดลงจาก 4.16 เหลือ 3.93 และ 3.56 ครั้งต่อ 100 กิโลเมตรต่อปี หรือลดลงประมาณ 5 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาโครงสร้างที่ปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสาทุกต้น(โครงสร้าง ข.) อัตราการเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับมีค่าลดลงจาก 2.15 เหลือ 1.92 และ 1.5 ครั้งต่อ 100 กิโลเมตรต่อปี หรือลดลงประมาณ 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้ว่ายิ่งระยะห่างระหว่างเสามีระยะที่ใกล้กัน จะมีผลต่อการลดลงของอัตราการเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับที่เสาดันที่ถูกฟ้าผ่าได้มากขึ้นตามลำดับ ทั้งโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา(โครงสร้าง ก.) และโครงสร้างที่ต่อเพิ่มสายดินนอกเสา(โครงสร้าง ข.) แต่อย่างไรก็ตามคลื่นสะท้อนที่เดินทางกลับมาหักล้างแรงดันเกินหัวเสาส่วนใหญ่จะเกิดจากคลื่นสะท้อนที่ฐานเสาเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากมีระยะทางที่ใกล้กว่าคลื่นสะท้อนที่เดินทางมาจากเสาข้างเคียง และสำหรับทุกๆระยะห่างระหว่างเสาที่ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ค่าสูงกว่า 100 โอห์ม การต่อเพิ่มสายดินนอกเสาจะไม่สามารถลดผลของอัตราการเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับได้เลย เช่นเดียวกับข้อสรุปในข้อ 2

5. เหตุผลหลักของการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา เนื่องจากคลื่นฟ้าผ่าที่เคลื่อนที่ผ่านสายดินภายในเสาไฟฟ้าคอนกรีตจะต้องเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีการสูญเสียจะทำให้เกิดการหน่วงซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากต้องมิงานส่วนหนึ่งที่จะต้องกระทำเพื่อเอาชนะแรงหน่วงนี้ ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ซึ่งจะทำให้คลื่นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 123 เมตรต่อไมโครวินาที แต่เมื่อมีการต่อเพิ่มสายดินนอกเสาแล้วทำให้คลื่นฟ้าผ่าเคลื่อนที่ผ่านสายดินนอกเสา ซึ่งคลื่นจะไม่สูญเสียพลังงานเพื่อเอาชนะแรงหน่วงเนื่องจากอยู่ในอากาศจึงทำให้คลื่นเคลื่อนที่ได้ประมาณความเร็วแสง หรือประมาณ 300 เมตรต่อไมโครวินาที ดังนั้นถ้ามีการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา เมื่อเกิดฟ้าผ่าขึ้นที่หัวเสาจะมีคลื่นสะท้อนที่ฐานเสาเดินทางกลับมาหักล้างแรงดันที่หัวเสาได้ด้วยความเร็วประมาณ 300 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งเร็วกว่ากรณีที่ไม่มีการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา จึงทำให้แรงดันเกินที่หัวเสามีค่าต่ำกว่าก่อนที่จะถึงค่ายอดสูงสุดซึ่งอาจเป็นเหตุให้ฉนวนเกิดควาบไฟตามผิวขึ้นได้

6. กระแสฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEEE มีค่ากระแสฟ้าผ่าเฉลี่ยเท่ากับ 31 กิโลแอมแปร์ ขณะที่ประเทศไทยมีขนาดกระแสฟ้าผ่าเฉลี่ยที่รุนแรงกว่ามาตรฐาน IEEE คือเท่ากับ 40 กิโลแอมแปร์ ดังนั้นการเลือกใช้ค่าความต้านทานดินควรเลือกใช้ค่าความต้านทานดินค่าต่ำๆ เพื่อควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น ไม่ให้เกินค่าแรงดันควาบไฟตามผิวของลูกถ้วย ซึ่งผลการศึกษาได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.123-4.134 ซึ่งแสดงค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ที่สามารถยอมรับได้ สำหรับขนาดกระแสฟ้าผ่า เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า ระยะห่างระหว่างเสา และจำนวนฉนวนลูกถ้วย ค่าต่างๆ ที่ยังไม่ทำให้แรงดันเกินที่เกิดขึ้นเกินค่าแรงดันควาบไฟตามผิววิกฤตของลูกถ้วย เมื่อพิจารณาระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ตามมาตรฐานของ กฟน. ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย และความต้านทานดินที่ฐานที่ กฟน. แนะนำมีค่าไม่เกิน 10 โอห์ม (ความต้านทานดินอิมพัลส์เท่ากับ 5 โอห์ม) เมื่อพิจารณาประกอบกับผลการศึกษาที่ได้พบว่า โครงสร้างที่ไม่ได้ต่อเพิ่มสายดินนอกเสา (โครงสร้าง ก.) ข้อเสนอที่ให้ความต้านทานดินที่ฐานเสาไม่เกิน 10 โอห์ม นั้นมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมกับขนาดกระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในเมืองไทย (40 กิโลแอมแปร์) จะครอบคลุมกับเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่าที่มากกว่า 4 ไมโครวินาที เป็นต้นไปจึงไม่เกิดควาไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วย แต่ถ้าระบบมีการต่อเพิ่มสายดินนอกเสา(โครงสร้าง ข.) จะเหมาะสมกับขนาดกระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในเมืองไทย ครอบคลุมตั้งแต่ 2 ไมโครวินาที เป็นต้นไปจึงไม่เกิดควาไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วย และในความเป็นจริงบางพื้นที่ไม่สามารถทำให้ความต้านทานดินที่ฐานเสาได้ตามที่แนะนำไว้ ดังนั้นผลการวิเคราะห์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอแนะนำให้ต่อเพิ่มสายดินนอกเสา หรือทำการเพิ่มฉนวนลูกถ้วยจากปกติ 4 ลูกถ้วย เป็น 5 หรือ 6 ลูกถ้วย ตามความเหมาะสมของค่าความต้านทานดินในบริเวณนั้น ดังตารางที่ 4.123-4.134

7. จากการศึกษาที่ผ่านมา [6] พบว่า 80-85 % เป็นฟ้าผ่าลบ และฟ้าผ่าลบมักเป็นฟ้าผ่าซ้ำหลายลำ ส่วนฟ้าผ่าบวกมักเป็นลำฟ้าผ่าเดี่ยว และพบว่าจำนวนประจุฟ้าผ่าบวกจะมีมากกว่าประจุฟ้าผ่าลบถึง 9 เท่า และเวลาของรูปคลื่นก็ยาวกว่ามากถึง 9 เท่าเช่นกัน เนื่องจากกลุ่มประจุบวกจะอยู่ส่วนบนของก้อนเมฆซึ่งอยู่สูงห่างจากพื้นโลกเป็นระยะทางไกลกว่ากลุ่มประจุลบที่กระจายอยู่ที่ฐานก้อนเมฆใกล้กับพื้นโลก ประจุบวกที่อยู่ห่างจากพื้นโลกมากจึงต้องสะสมประจุให้มีจำนวนมากพอที่จะทำให้เกิดเบรคดาวนลงมายังพื้นโลกได้ ซึ่งค่าของฟ้าผ่าบวกจะเป็นข้อมูลที่น่าสนใจในการกำหนดมิติต่างๆของการป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่า สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบการจำลองโดยใช้กระแสฟ้าผ่าบวกเป็นหลัก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสฟ้าผ่าลบ ที่คายอด และเวลาของรูปคลื่นฟ้าผ่าเดียวกันพบว่ามีความแตกต่างกันไม่มากนัก ดังตารางที่ 4.135-4.136 และรูปที่ 4.101-4.102

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในปัจจุบันมีการนำข้อมูลฟ้าผ่าของต่างประเทศมาใช้ในการวิเคราะห์ และออกแบบระบบไฟฟ้ากันเป็นอย่างมาก รวมถึงรูปแบบการจัดวางสายส่ง หรือสายจำหน่ายระบบไฟฟ้าที่ได้คัดลอกมาจากต่างประเทศ ซึ่งเมื่อนำมาใช้ในประเทศไทย ทำให้อัตราการเกิดไฟฟ้าดับมีค่ามากกว่าที่เกิดในต่างประเทศเนื่องจากกระแสฟ้าผ่าและค่าจำนวนวันที่เกิดพายุฝนฟ้าคะนอง (T_d – Thunder Storm Days per year) ในประเทศไทย มีค่ามากกว่านั่นเอง ตัวอย่างเช่น ที่ประเทศอังกฤษมีค่า T_d ต่อปีเฉลี่ยที่ 10 – 30 วันต่อปี แต่ในประเทศไทยมีค่า T_d ต่อปีเฉลี่ยที่ 60 – 90 วันต่อปี สรุปแล้วกระแสฟ้าผ่าที่เกิดในประเทศไทยรุนแรงกว่า ดังนั้นในอนาคตควรมีการรวบรวมสถิติข้อมูลฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทยให้ทั่วทั้งประเทศ แล้วนำมาสร้างความสัมพันธ์เป็นสูตรความหนาแน่นของฟ้าผ่า (N_g) จากจำนวนวันเกิดฝนตกฟ้าคะนอง (T_d) หรือสูตรเปอร์เซ็นต์โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าขนาดกระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย รวมทั้งควรมีการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจวัดฟ้าผ่าให้สามารถตรวจวัดค่าเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการประสานสัมพันธ์ทางฉนวนอย่างหนึ่ง จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา และวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายในประเทศเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญมาก สมितिลีลา เอกสารประกอบการบรรยาย ข้อมูลฟ้าผ่าประเทศไทย Lightning Statistic in Thailand การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [2] ชำนาญ ห่อเกียรติ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง Electrical Power System Analysis พิมพ์ครั้งที่ 2 , มีนาคม 2550
- [3] เทพกัญญา ชติแสง. 2548. การต่อลงดินและการติดตั้งอะเรสเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบ 22-24 กิโลโวลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] A.R Hileman “Insulation Coordination for Power System”, Marcel Dekker, Inc., New York., 1999.
- [5] ลือชัย ทองนิล. เอกสารบทความทางวิชาการ ชมรมวิศวกร การไฟฟ้านครหลวง
- [6] ตำรวัย สังข์สะอาด วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง กรุงเทพมหานคร สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ พิมพ์ครั้งที่ 3 มีนาคม 2549
- [7] ตำรวัย สังข์สะอาด เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง กรุงเทพมหานคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541
- [8] Martinez, J.A., Chowdhuri, P.,2000 “ Calculation of Lightning Flashover Rates of Overhead Distribution lines. A Comparative Study ” , IEEE 0-7803-6420-1/00/\$ 10.00 (c) 2000 pp. 2577-2582
- [9] ชำนาญ ห่อเกียรติ, เทพกัญญา ชติแสง การต่อลงดิน Grounding, ตุลาคม 2549
- [10] ชำนาญ ห่อเกียรติ ความเชื่อถือได้ และการบำรุงรักษาระบบจำหน่ายไฟฟ้า, สิงหาคม 2549
- [11] IEEE Standard 1243-1997. “IEEE guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Line” 1997.
- [12] Diesendrof, W. 1974, Insulation Co-ordination in High-voltage Electrical Power System, Butterworth & Co.(Publishers) Ltd., USA.
- [13] Ontario Hydro Research Division 800 Kipling Avenue, Canadian Electrical Association(CEA) “Application Guide For Surge Arrester on Distribution Systems”, September 1988, pp.321.
- [14] Task Force Report “ Investigation and Evaluation of Lightning Protective Methods for Distribution Circuits, Part II : Application and Evaluation,” IEEE Transactions, Vol. PAS-88, No.8, 1969, pp. 1239-1247.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] การไฟฟ้านครหลวง ฝ่ายควบคุมระบบไฟฟ้า แผนกสถิติระบบไฟฟ้า และกองผังระบบไฟฟ้า, ข้อมูลสถิติไฟฟ้าฉบับเนื่องจากฟ้าผ่า และข้อมูลความยาวสายส่ง 69 กิโลเมตร
- [16] IEEE Working Group. A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Apparatus and System Vol. PAS-104, No.4 (April 1985), pp 919-932
- [17] N.Klairuang, W.Pobporn and J.Hokierti “Effect of Electric fields Generated by Direct Lightning Strikes on Ground to Lightning Strikes on Ground to Underground Cable”, 2004 International Conference on Power System Technology, Singapore,2004
- [18] Smitthileela, B. and S.Bhumiwat. 1999. Some Experience of Lightning in Thailand International conference on Lightning Protection (ICLP) 23rd
- [19] การไฟฟ้านครหลวง ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า กองวิศวกรรมไฟฟ้า งานจัดทำมาตรฐาน, คู่มือแบบมาตรฐานการก่อสร้างระบบสายส่ง (MEA Overhead Subtransmission Construction Standards)
- [20] การไฟฟ้านครหลวง ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า กองวิศวกรรมไฟฟ้า “คู่มือการฝึกอบรมหลักสูตรการฝึกอบรมพนักงานสำนักงานเขต เรื่องเสาไฟฟ้าคอนกรีต ”
- [21] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2528. ลูกถ้วยแขวน มอก.354-2528.
- [22] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2540. ลวดเหล็กเคลือบสังกะสีตีเกลียว. มอก.404-2540.
- [23] R.Alberto, V.Moreno, V.Naredo and Z. Guardado “Non Uniform Line Tower Model for Lightning Transient Studies” International Conference on Power System Transients, 2001.
- [24] สำเร็จ อินท่าไม้. 2548. เสริมพีแอนด์ซีของเสาไฟฟ้าคอนกรีต อันเนื่องจากผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [25] IEEE Working Group, “Modeling Guidelines for Fast Front Transients”, IEEE Transactions on Power Deliver, Vol. 11, No.1, pp.493-501
- [26] M.Jambak and H.Ahmad “Measurement of Grounding System Resistance Based on Ground High Frequency Behavior for Difference Soil Type” IEEE Transactions on Power Deliver, pp.207-211, 2000.
- [27] T.Mozumi, N. Nagaoka, “ An Empirical formula for the Surge Impedance of a grounding conductor along a Reinforce concrete pole in a distribution Line”, International Conference on Power System Transients, 2001

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. พรชัย เศรษฐสมบัติ และ ชาย ชมภูอินไหว, 2551 “ การปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้านครหลวงโดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสา”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON 31), 29-31 ตุลาคม 2551, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ มหาวิทยาลัยศรีประทุม, หน้า 57-60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้านครหลวง โดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสา

Improvement of MEA's 69 kV Transmission Line Lightning Performance by Adding External Ground Wire

พรชัย เศรษฐสมบัติ และชาย ชมภูอินไหว

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร : 0-2326-4550 โทรสาร 0-2326-4550 E-mail : s0060205@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งการไฟฟ้านครหลวง(กฟน.) โดยการต่อเพิ่มสายตัวนำลงดินนอกเสา กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 69 kV ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม และการวิเคราะห์พบว่าเมื่อต่อเพิ่มสายตัวนำลงดินนอกเสาแล้ว แรงดันบนยอดเสาลดลงจาก 4700 kV เหลือ 3000 kV หรือลดลง 36% ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25 μ s และยังพบว่าอัตราการเกิดวาปไฟตามผิวลดลงจาก 2.16 เหลือ 1 ครั้ง/100กม./ปี หรือลดลง 54% ที่เวลาหน้าคลื่น 2 μ s และความต้านทานดินอิมพัลส์ 5 โอห์ม

คำสำคัญ : ฟ้าผ่าลงโดยตรง, อัตราการเกิดวาปไฟตามผิว, ATP-EMTP

Abstract

This paper proposes the method to improve MEA transmission line lightning performance by adding external ground wire from direct stroke on 69 kV pole based on ATP-EMTP program. The simulated and analyzed results show the voltage at top pole reduces from 4700 kV to 3000 kV or 36% at front time 0.25 μ s when adding external ground wire. In addition, lightning flashover rate reduces from 2.16 to 1 times/100km/year or 54% on condition that front time 2 μ s and impulse resistance 5 ohms.

Keywords: Direct lightning stroke, flashover rate, ATP-EMTP

1. บทนำ

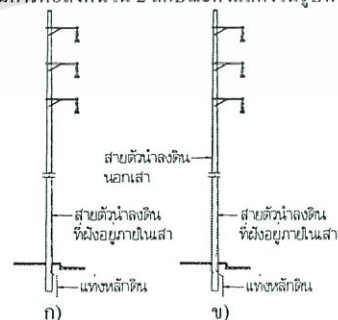
ประเทศไทยนั้นอยู่ในเขตร้อนชื้นที่เกิดฝนฟ้าคะนองสูง ดังนั้นปัญหาหลักอย่างหนึ่งของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า คือการเกิดฟ้าผ่าลงระบบสายส่งทำให้เกิดแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า และส่งผลให้เกิดไฟฟ้าขัดข้องตามมา

สำหรับเขตพื้นที่ กรุงเทพฯ นนทบุรี สมุทรปราการ ที่รับผิดชอบโดย กฟน. มีสถิติการเกิดไฟฟ้าดับเนื่องจากฟ้าผ่าอยู่บ่อยครั้ง ซึ่งเมื่อเกิดไฟฟ้าดับแต่ละครั้ง จะส่งผลให้เกิดเสียหายต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในทุกระดับ และนำมาซึ่งความสูญเสียทางเศรษฐกิจ และความเชื่อถือในการลงทุนด้วย ดังนั้นในบทความนี้จะเสนอวิธีปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่ง กฟน. โดยการต่อเพิ่มสายตัวนำลงดินนอกเสา กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 69 kV ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เพื่อลดสถิติการเกิดไฟฟ้าดับเนื่องจากฟ้าผ่าให้มีค่าต่ำที่สุด และนำมาเป็นข้อมูลในการปรับปรุงระบบสายส่งของ กฟน. ให้มีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าที่ดีขึ้นต่อไป

2. ข้อมูลและแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.1 ข้อมูลของระบบ 69 kV

ในการวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลระบบสายส่ง 69 kV ของ กฟน. [1] แบบวงจรเดี่ยวตัวนำคู่ ที่มีการจัดวางสายเฟสในแนวตั้งประกอบด้วยสายตัวนำคู่ 3 เฟสชนิด AAC ขนาด 400 มม². สายล่อฟ้า 1 เส้นเป็นชนิดสายเหล็กตีเกลียวขนาด 0.00793 เมตร โดยจะทำการต่อลงดินผ่านสายตัวนำลงดินไปยังระบบรากสายดิน ซึ่งเป็นชนิดแท่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 เมตร มีความยาว 3 เมตร และเสาไฟฟ้าคอนกรีตมีความสูง 20 เมตร เมื่อสายล่อฟ้ามีการต่อลงดินใน 2 ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์

- ก) สายล่อฟ้าต่อลงดินผ่านสายตัวนำลงดินที่ฝังอยู่ในเสาไฟฟ้าคอนกรีต (โครงสร้างที่ใช้จนปัจจุบัน)
- ข) จากข้อ ก. เพิ่มการต่อร่วมสายตัวนำลงดินนอกเสาที่เดินในอากาศ (โครงสร้างที่ปรับปรุง)

2.2 ข้อมูลการคำนวณอัตราการเกิดวาปไฟตามผิว

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดินที่หัวเสาไฟฟ้าคอนกรีต กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะกระจายลงสู่ดิน และอีกส่วนหนึ่งจะไหลไปตามสายล่อฟ้าไปยังเสาข้างเคียงในลักษณะของคลื่น และเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งทำให้เกิดการหักล้าง หรือเสริมกันกับแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นบนยอดเสา ส่งผลให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในสายเฟส และทำให้มีแรงดันตกคร่อมพวงลวดด้วยเกิดขึ้น ซึ่งถ้าสูงเกินกว่าค่าแรงดันวาปไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลวดจะทำให้พวงลวดเกิดวาปไฟตามผิว และอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดไฟฟ้าดับต่อมา อัตราการเกิดวาปไฟตามผิวสามารถคำนวณได้จากสมการ [2]

$$BFR = N_L P(Ip) \tag{1}$$

- เมื่อ BFR คือ อัตราการเกิดวาปไฟตามผิว (ครั้ง/100 กม./ปี)
- N_L คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสายดิน (ครั้ง/100 กม./ปี)
- $P(Ip)$ คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดกระแสฟ้าผ่าสูงกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤตของพวงลวด

2.2.1 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสายดิน

สามารถคำนวณได้หลายวิธีจากบทความวิจัยจากต่างประเทศ แต่เพื่อให้ผลการคำนวณนั้นใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในเขตพื้นที่ กฟน. บทความนี้จะใช้สถิติฟ้าผ่าดับเนื่องจากฟ้าผ่าที่เกิดกับระบบสายส่ง กฟน. ตามตารางที่ 1 และสมการที่ 2 คำนวณหาจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสายดิน

$$Obf = \frac{N_L Nbf}{100} \tag{2}$$

- เมื่อ Obf คือ อัตราการเกิดไฟดับเนื่องจากการเกิดวาปไฟตามผิว (ครั้ง/100 กม./ปี)
- N_L คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสายดิน (ครั้ง/100 กม./ปี)
- Nbf คือ จำนวนครั้งที่เกิดวาปไฟตามผิวต่อฟ้าผ่าลงสายดิน 100 ครั้ง (กำหนดให้เท่ากับ 70 ครั้ง [3])

ตารางที่ 1 ข้อมูลระบบสายส่ง กฟน. [4] ปี 2550

รายละเอียด	ระบบไฟฟ้า	69 kV	115 kV	230 kV	รวม
ไฟดับเนื่องจากฟ้าผ่า (ครั้ง/ปี)		22	-	-	22
ความยาวสายส่ง (กม.)		640	500	26	1166

ดังนั้นจากตารางที่ 1 และสมการที่ 2 สามารถคำนวณหาจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสายดินในเขตพื้นที่ กฟน. ได้ดังนี้

$$N_L = (22 \times 100) / (11.66 \times 70) = 2.7 \text{ ครั้ง/100 กม./ปี}$$

2.2.2 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดกระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสวิกฤตของพวงลวด

สำหรับในประเทศไทยจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ [5]

$$P(Ip) = \frac{1}{1 + (I / I_{50})^{3.09}} \tag{3}$$

- เมื่อ I คือ กระแสวิกฤตของพวงลวดด้วย (kA)
- I_{50} คือ กระแสฟ้าผ่าเฉลี่ย (kA) = 40 kA (ประเทศไทย)

2.3 แบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีต

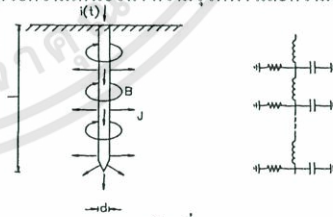
เสาไฟฟ้าคอนกรีตในระบบ 69 kV ของ กฟน. ใช้เสาขนาด 20 เมตร โดยมีสายดินภายในเสาคอนกรีต 1 เส้น ขนาด 0.00793 เมตร เสริมอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากสมการ [6]

$$Z_{pole} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r - j\sigma/(\epsilon_0\omega)}} \ln \left(\frac{h + \sqrt{h^2 + R_{GMR}^2}}{R_{GMR}} \right) \tag{4}$$

- เมื่อ Z_{pole} คือ เสริมอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีต (โอห์ม)
- h คือ ความสูงของเสาไฟฟ้า (เมตร)
- R_{GMR} คือ รัศมีเฉลี่ยทางเรขาคณิต (เมตร)

2.4 แบบจำลองของรากสายดิน

ความต้านทานที่ฐานเสาส่งแทนด้วยแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งประกอบด้วยความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า และความต้านทานของรากสายดิน [6]



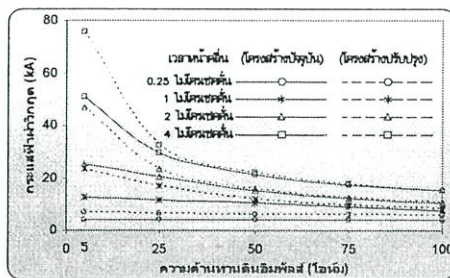
รูปที่ 2 วงจรสมมูลของรากสายดินเนื่องจากผลของกระแสฟ้าผ่า

2.5 แบบจำลองสายตัวนำลงดินภายนอกเสา

สายตัวนำลงดินภายนอกเสาส่งจะใช้สายเหล็กตีเกลียวขนาด 0.00793 เมตร โดยประสานเข้าด้วยกันกับสายเหล็กตีเกลียวที่ฝังภายในเสาที่ยอดเสา ค่าเสริมอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากสมการ [7]

$$Z = 60 \ln(h / er) - k \cdot \ln\{1 + (rc / D)\} \tag{5}$$

- เมื่อ Z คือ เซอร์จิมพีแดนซ์ของสาย (โอห์ม)
- e คือ ลอกรฐานธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 2.71828
- h คือ ความยาวสายตัวนำลงดิน (เมตร)
- r คือ รัศมีสายตัวนำลงดิน (เมตร)
- rc คือ รัศมีเสาคอนกรีต (เมตร)
- D คือ ระยะห่างระหว่างผิวสายถึงสายตัวนำลงดินภายนอกเสา (เมตร)



รูปที่ 3 กระแสวิกฤตของพวงลวดด้วยจำนวน 4 ลวด

2.6 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการออกแบบ

รายละเอียด		ข้อมูล	แบบจำลอง
กระแสฟ้าผ่า	ขนาดกระแสฟ้าผ่า (kA)	40 kA	Ramp
	เวลาหน่วงคลื่น	0.25-4 μ s	
สายตัวนำ (bundle)	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก	25.65 mm	J.Marti
	ความต้านทานกระแสดร	0.0474 Ω /km	
สายล่อฟ้า	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก	7.93 mm	Distributed Parameter
	ความต้านทานกระแสดร	4.7 Ω /km	
สายลงดินนอกเสา	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก	7.93 mm	Distributed Parameter
	เซอร์จิมพีแดนซ์	400 Ω	
	ความเร็วคลื่น	300 m/ μ s	
เสาไฟฟ้า	เซอร์จิมพีแดนซ์	220 Ω	Distributed Parameter
	ความเร็วคลื่น	123 m/ μ s	
	ระยะห่างเสา	80 m	
	ความสูงเสา	20 m	
รากสายดิน	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก	16 mm	Distributed Parameter
	ความยาว	3 m	
	ความต้านทานดินสัมผัส	5-100 Ω	

จากรูปที่ 3 พบว่าที่เวลาหน่วงคลื่น 0.25 μ s กระแสวิกฤตของพวงลวดของโครงสร้างดรูปที่ 1 ก. และโครงสร้างดรูปที่ 1 ข. มีค่าเป็น 5 kA และ 7 kA ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อความต้านทานดินสัมผัสที่ฐานเสามีค่าต่างกัน และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหน่วงคลื่นเป็น 1, 2 และ 4 μ s กระแสวิกฤตของทั้ง 2 โครงสร้างจะเริ่มแตกต่างกันเมื่อความต้านทานดินสัมผัสที่ฐานเสามีค่าน้อยกว่า 50 โอห์ม เช่น ที่เวลาหน่วงคลื่น 2 μ s, ความต้านทานดินสัมผัส 5 โอห์ม (ค่าเฉลี่ยของกฟน.) กระแสฟ้าผ่าวิกฤตเพิ่มขึ้นจาก 25 kA เป็น 46 kA

3.2 แรงดันเกินบนยอดเสาไฟฟ้าคอนกรีต

ในการวิเคราะห์แรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนยอดเสาไฟฟ้าคอนกรีต ได้ทำการจำลองการเกิดฟ้าผ่าลงเสาไฟฟ้าโดยตรงด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ซึ่งผลการจำลองดังแสดงต่อไปนี้



รูปที่ 4 แรงดันเกินบนยอดเสา กรณีเกิดกระแสฟ้าผ่า 40 kA

3. ผลการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์จะพิจารณาสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าจากโครงสร้างดรูปที่ 1 ก. และข. กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 69 kV เมื่อระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP โดยการเปลี่ยนแปลงเวลาหน่วงคลื่นกระแสฟ้าผ่า และต้านทานดินสัมผัสให้มีค่าต่างๆ ซึ่งทำให้ได้ผลของค่ากระแสวิกฤตของพวงลวดด้วย, แรงดันเกินบนยอดเสา และอัตราการเกิดวาปไฟตามผิวของระบบ

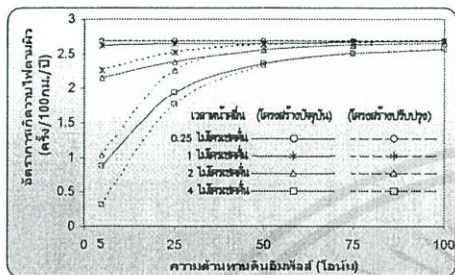
3.1 กระแสวิกฤตของพวงลวดด้วย

กระแสวิกฤตของพวงลวดด้วยหาได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP จากโครงสร้างดรูปที่ 1 ก. และข. เมื่อพิจารณาพวงลวดด้วยมีค่าแรงดันวาปไฟตามผิวสัมผัสเท่ากับ 415 kV ดังแสดงในรูปที่ 3

จากรูปที่ 4 พบว่าที่เวลาหน่วงคลื่น 0.25 μ s โครงสร้างปัจจุบันดรูปที่ 1 ก. แรงดันบนยอดเสามีค่าสูงถึง 4700 kV เมื่อความต้านทานดินสัมผัสที่ฐานเสามีค่าต่างกัน ในขณะที่เมื่อปรับปรุงโดยต่อลงดินนอกเสาดรูปที่ 1 ข. แรงดันยอดเสาตกลงจาก 4700 kV เหลือ 3000 kV หรือลดลง 36% อันเนื่องมาจากค่าเซอร์จิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีตลดลงจาก 220 โอห์ม เหลือ 142 โอห์ม และมีผลของคลื่นสะท้อนจากฐานเสาหักล้างคลื่นกระแสฟ้าผ่าก่อนที่จะถึงค่าสูงสุดของคลื่น และเมื่อเพิ่มเวลาหน่วงคลื่นเป็น 1, 2 และ 4 μ s แรงดันยอดเสาของทั้ง 2 โครงสร้างจะมีค่าลดลงตามลำดับ และจะขึ้นกับความต้านทานดินสัมผัสมากขึ้น

3.3 อัตราการเกิดวาทไฟตามผิว

ในการคำนวณหาอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวของพวงฉนวน ลูกถ้วยในระบบ 69 kV สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 ซึ่งได้ผลการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวของฉนวนลูกถ้วยระบบ 69 kV

จากรูปที่ 5 พบว่าเมื่อปรับปรุงโครงสร้างจากรูปที่ 1 ก. เป็นรูปที่ 1 ข. ที่เวลาหน้าคลื่น 2 μ s และความต้านทานดินอิมพัลส์โอห์ม อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวลดลงจาก 2.16 เหลือ 1 ครั้ง/100กม./ปี หรือลดลง 54% เมื่อเพิ่มเวลาหน้าคลื่นเป็น 4 μ s อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวจะขึ้นกับความต้านทานดินอิมพัลส์มากขึ้น ในทางตรงข้ามเมื่อลดเวลาหน้าคลื่นเป็น 1 และ 0.25 μ s อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวจะขึ้นกับความต้านทานดินอิมพัลส์น้อยลงตามลำดับ และพบว่าเมื่อความต้านทานดินอิมพัลส์ที่มีค่ามากกว่า 100 โอห์ม อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวของทั้ง 2 โครงสร้างจะมีค่าประมาณเท่ากับจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสายดิน

4. สรุป

การปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสากรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงด้วยโปรแกรม ATP-EMTP สรุปได้ดังนี้

1. เมื่อปรับปรุงโดยต่อลงดินนอกเสาแล้ว สามารถทำให้แรงดันเกินบนยอดเสาไฟฟ้าคอนกรีตลดลงประมาณ 36% ที่เวลาหน้าคลื่น 0.25 μ s และพบว่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวลดลงประมาณ 54% ที่เวลาหน้าคลื่น 2 μ s และความต้านทานดินอิมพัลส์ 5 โอห์ม
2. ดังนั้นในทางปฏิบัติสายล่อฟ้าของระบบสายส่งควรจะต้องลงดินโดยผ่านสายตัวนำลงดินที่ฝังภายในเสาไฟฟ้า และทำการต่อร่วมกับสายดินนอกเสาที่เดินในอากาศขนานไปตามเสาไฟฟ้า รวมทั้งจะต้องทำให้ความต้านทานดินอิมพัลส์ที่ฐานเสาแต่ละคันทันมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม (ความต้านทานดินที่ความถี่ต่ำ 10 โอห์ม) เพื่อลดแรงดันเกินบนยอดเสาไฟฟ้าคอนกรีตและอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวให้มีค่าต่ำที่สุด
3. ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำมาใช้ปรับปรุงโครงสร้างระบบสายส่งเดิมให้มีประสิทธิภาพการป้องกันฟ้าผ่าให้ดียิ่งขึ้น และเป็นแนวทางในการพิจารณาปรับปรุงมาตรฐานการก่อสร้างระบบสายส่งใหม่เพื่อรองรับการขยายเขตอุตสาหกรรมในอนาคตต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้านครหลวงที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการวิเคราะห์ และขอขอบคุณ ดร. สำเริง อินท่าไม้ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] งานจัดทำมาตรฐานไฟฟ้า/กองวิศวกรรมไฟฟ้าฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง
- [2] A.R Hileman "Insulation Coordination for Power System", Marcel Dekker, Inc., New York., 1999.
- [3] Task Force Report " Investigation and Evaluation of Lightning Protective Methods for Distribution Circuits, Part II : Application and Evaluation," IEEE Transactions, Vol. PAS-88, No.8, 1969, pp. 1239-1247.
- [4] แผนกสถิติระบบไฟฟ้า/กองวิจัย และวางแผนระบบไฟฟ้า/ฝ่ายควบคุมระบบไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง
- [5] N.Klairuang, W.Pobporn and J.Hokierti "Effect of Electric fields Generated by Direct Lightning Strikes on Ground to Lightning Strikes on Ground to Underground Cable", 2004 International Conference on Power System Technology, Singapore,2004
- [6] สำเริง อินท่าไม้, วันชัย จันไกรผล, สุภชัย แซ่เจียม, ธนภัทร พรหมวัฒน์ภักดี และวิจิต เครือสุข " การวิเคราะห์ผลการทดลองดินของเสาไฟฟ้าคอนกรีตต่อแรงดันเกินในระบบสายจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงด้วย โปรแกรม ATP-EMTP", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2549
- [7] T.Mozumi, N. Nagaoka, " An Empirical formula for the Surge Impedance of a grounding conductor along a Reinforce concrete pole in a distribution Line", International Conference on Power System Transients, 2001



พรชัย เศรษฐสมบัติ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชาย ชมภูอินไหว ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิชาที่สนใจ Illumination Engineering, Power System Control Stability, Power System Deregulation

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายพรชัย เศรษฐสมบัติ
 วัน เดือน ปีเกิด 10 กันยายน 2520 ที่จังหวัด กรุงเทพฯ
 ที่อยู่ 18 หมู่ 2 แขวงฉิมพลี เขตตลิ่งชัน
 จ.กรุงเทพฯ 10170
 e-mail : pornchaise@mea.or.th

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 3539 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) แผนกช่างไฟฟ้ากำลัง
 โรงเรียนกองทัพบกอุปถัมภ์ ช่างกล ขนส่งทหารบก (ขส.ทบ.)
 พ.ศ. 2542 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) ไฟฟ้าอุตสาหกรรม (IE)
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 พ.ศ. 2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2545-ปัจจุบัน วิศวกรไฟฟ้าระดับ 6
 งานจัดทำมาตรฐานไฟฟ้า กองวิศวกรรมไฟฟ้า
 ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง

ผลงานทางวิชาการ

พรชัย เศรษฐสมบัติ และ ชาย ชมภูอินไหว, 2551 “ การปรับปรุง
 สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้านคร
 หลวง โดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสา” , การประชุมวิชาการทาง
 วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON 31), 29-31 ตุลาคม 2551,
 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ มหาวิทยาลัยศรีประทุม, หน้า 57-60