

การวิเคราะห์ผลของระยะห่างเสาและค่าความต้านทานดิน
ต่อแรงดันเกิน กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาในระบบ 115 กิโลโวลต์

THE EFFECT ANALYSIS OF SPAN LENGTH AND GROUNDING RESISTANCE
FOR OVERVOLTAGE DUE TO DIRECT
LIGHTNING STROKES TO 115 KV POLE

สุภชัย แซ่เจียม
SUPACHAI SAEICHEAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-2659-8

การวิเคราะห์ผลของระยะห่างเสาและค่าความต้านทานดิน
ต่อแรงดันเกิน กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสา ระบบ 115 กิโลโวลต์

**THE EFFECT ANALYSIS OF SPAN LENGTH AND GROUNDING RESISTANCE
FOR OVERVOLTAGE DUE TO DIRECT
LIGHTNING STROKES TO 115 kV POLE**

ศุภชัย แซ่เจียม
SUPACHAI SAEICHEAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2549

ISBN 974 - 15 - 2659 - 8

**THE EFFECT ANALYSIS OF SPAN LENGTH AND GROUNDING
RESISTANCE FOR OVERVOLTAGE DUE TO DIRECT
LIGHTNING STROKES TO 115 kV POLE**

SUPACHAI SAECEAM

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974 - 15 - 2659 - 8

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ผลของระยะห่างเสาและค่าความต้านทานดินต่อแรงดันเกิน กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาในระบบ 115 กิโลโวลต์
นักศึกษา	นายศุภชัย แซ่เจียม
รหัสนักศึกษา	44061058
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.สมชาติ จิรีวิภากร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการหาระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า กับความต้านทานดินที่ฐานเสาที่เหมาะสม และการเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ความชันหน้าคลื่น 2 ไมโครวินาที กรณีการใช้ลูกถ้วย 7 – 9 ลูกถ้วย ในกรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 115 กิโลโวลต์ ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม จะนำมาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างการปักเสาพาดสายไฟฟ้าและความต้านทานดินที่ฐานเสา อัตราการวาทไฟย้อนกลับ เพื่อการลงทุนที่สมเหตุสมผล

Thesis	The Effect Analysis of Span Length and Grounding Resistance for Overvoltage due to Direct Lightning Strokes to 115 kV Pole
Student	Mr.SUPACHAI SAEICHEAM
Student ID	44061058
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. MONTHON LEELACHINDAKAILEAK
Thesis Co-Advisor	Assist. Prof. Dr.SOMCHAT JIRIWIBHAKORN

ABSTRACT

This thesis proposes the method to determine the optimal tower span and footing ground resistance to obtain the best and effect to insulators flashover have been studied. The cases studies are conducted for 115 kV towers using 10 – 50 kA direct lightning stroke with front wave of 2 microseconds. The number of insulator is varying from 7 – 9 pins. The ATP – EMTP program is used for simulations. The relation between tower span and footing ground resistance, back flashover rate for reasonable investment is illustrated.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากท่าน รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ และ ผศ.ดร.สมชาติ จิรวิภากร ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ความรู้ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบหัวข้อและ โครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดจน ข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณอาจารย์สำเร็จ อินทามั้ย ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการเขียน โปรแกรมและทำการทดลอง

ขอขอบคุณท่านคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นเสมือนกำลังใจ ให้คำแนะนำที่ดีตลอดมา

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้การสนับสนุนด้านข้อมูลในการทำวิจัยนี้

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณท่าน ดร.รัชนิพร พุคยาภรณ์ พุกกะมาน อธิการบดี มหาวิทยาลัยศรีปทุม คณะกรรมการพิจารณาทุนและบุคลากรที่เกี่ยวข้อง ที่ให้โอกาสในการศึกษา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ต่างๆ ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ศุภชัย แซ่เจียม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า (The Lightning Flash).....	5
2.3 ผลที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่า (The Lightning Flash of Effect).....	7
2.3.1 แรงดัน.....	7
2.3.2 ความชันกระแสฟ้าผ่า.....	9
2.3.3 แรงกระทำ กระแสฟ้าผ่า.....	10
2.3.4 ความร้อน.....	10
2.4 การป้องกันและแรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่าที่เกิดบนสาย.....	10
2.4.1 การป้องกันแรงดันเกินในระบบสายส่ง.....	11
2.4.2 แรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่าที่เกิดบนสาย.....	11
2.5 อัตราการวาบไฟตามผิว (Flashover Rate).....	13
2.5.1 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse).....	13
2.5.2 โอกาสการเกิดฟ้าผ่า.....	14
2.5.3 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.4 ฟีด้าในระบบสายส่ง.....	18
2.5.5 ฟีด้าในระบบสายเฟส.....	19
2.5.6 ฟีด้าลงบนสายล่อฟ้า.....	21
2.6 อัตราการวาบไฟตามควิย้อนกลับ (Back flashover Rate)	24
บทที่ 3 โปรแกรมและแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์	26
3.1 บทนำ	26
3.2.1 TACS.....	26
3.2.2 MODELS	26
3.2 การจำลองอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ.....	27
3.2.1 แบบจำลองเสิร์จฟีด้า.....	27
3.2.2 แบบจำลองสายส่ง	27
3.2.3 แบบจำลองเสาไฟฟ้า.....	28
3.2.4 แบบจำลองฉนวนลูกถ้วย.....	29
3.2.3 แบบจำลองความต้านทานดินที่ฐานเสาไฟฟ้า.....	30
บทที่ 4 กระบวนการและผลการวิเคราะห์	34
4.1 กระบวนการวิเคราะห์.....	34
4.2 ผลการวิเคราะห์	35
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	102
เอกสารอ้างอิง	103
ภาคผนวก	105
ประวัติผู้เขียน.....	110

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.28 ค่าเปอร์ยูนิตของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณิใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย.....	83
4.29 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 110 เมตร.....	87
4.30 ค่าเปอร์ยูนิตของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณิใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย.....	88
4.31 ค่าเปอร์ยูนิตของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณิใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย.....	89
4.32 ค่าเปอร์ยูนิตของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณิใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย.....	90
4.33 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 120 เมตร.....	94
4.34 ค่าเปอร์ยูนิตของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณิใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย.....	95
4.35 ค่าเปอร์ยูนิตของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณิใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย.....	96
4.36 ค่าเปอร์ยูนิตของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณิใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย.....	97
4.37 แสดงค่าความต้านทานอิมพัลส์สูงสุดที่รับ ได้ต่อระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า กรณิใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย.....	99
4.38 แสดงค่าความต้านทานอิมพัลส์สูงสุดที่รับ ได้ต่อระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า กรณิใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย.....	99
4.39 แสดงค่าความต้านทานอิมพัลส์สูงสุดที่รับ ได้ต่อระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า กรณิใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย.....	100

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกินประเภทต่างๆ.....	4
2.2 ประจุไฟฟ้าที่เกิดที่ก้อนเมฆก่อนเกิดฟ้าผ่า.....	6
2.3 ขั้นตอนการเกิดฟ้าผ่า.....	6
2.4 ฟ้าผ่าลงที่สายล่อฟ้าบนเสาส่ง.....	8
2.5 คลื่นเคลื่อนที่และสะท้อนกลับจากเสาข้างเคียง.....	9
2.6 ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อเกิดฟ้าผ่า.....	9
2.7 แรงกระทำที่เกิดเนื่องจากกระแสฟ้าผ่ากับสนามแม่เหล็ก.....	10
2.8 ฟ้าผ่าโดยตรงลงสายส่ง.....	11
2.9 ฟ้าผ่าลงสายดิน.....	12
2.10 ฟ้าผ่าลงดิน	12
2.11 ฟ้าผ่าลงดินเฉียดขนานกับสายส่ง.....	13
2.12 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม.....	14
2.13 โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีกราฟกระแสฟ้าผ่ากราฟยอดเกินกว่า I_0 สำหรับฟ้าผ่าชั่วพล.....	15
2.14 Right-of way width หรือ shadow width (W).....	17
2.15 ตำแหน่งฟ้าผ่า และ การเกิดการชัตต์ล้มเหลวและแลบข้ามกลับ.....	18
2.16 วงจรของฟ้าผ่าบนสายเฟส.....	19
2.17 แรงดันแลบข้ามลูกถ้วยไฟฟ้า.....	20
2.18 แรงดันที่เสา และแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวน.....	21
2.19 สายส่ง 3 เฟสที่มีแฟกเตอร์คัปปลิงและแรงดันยอดเสาแตกต่างกัน.....	24
3.1 รูปคลื่นของแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	27
3.2 การจัดวางสายเฟสวงเดี่ยวและสายล่อฟ้าของระบบ 115 kV.....	27
3.3 แบบจำลองสายส่งและคอนที่ใช้ในการศึกษา.....	28
3.4 โครงสร้างเสาและการต่อลงดินของระบบ 115 kV.....	28
3.5 แบบจำลองเสาที่ใช้ในการศึกษา.....	29
3.6 อิมพัลส์เบรกดาวน์ๆของดินรอบๆ รากสายดิน	30
3.7 การเกิดดิสชาร์จบริเวณรอบๆ รากสายดิน.....	32
3.8 แบบจำลองวงจรสมมูลของตัวนำลงดินชนิดขึ้นกับความถี่และกระแส.....	32
3.9 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง.....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.59 กราฟระยะห่างเสาไฟฟ้ากับความต้านทานอิมพัลส์ที่เหมาะสม กรณีใช้ 7 ลูกถ้วย.....	100
4.60 กราฟระยะห่างเสาไฟฟ้ากับความต้านทานอิมพัลส์ที่เหมาะสม กรณีใช้ 8 ลูกถ้วย.....	100
4.61 กราฟระยะห่างเสาไฟฟ้ากับความต้านทานอิมพัลส์ที่เหมาะสม กรณีใช้ 9 ลูกถ้วย.....	101

บทที่ 1

บทนำ

1.1.ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยทั่วไปจะเป็นระบบติดตั้งแบบกลางแจ้ง ดังนั้นโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกินเนื่องจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ที่มีช่วงการเกิดระยะสั้นๆ ในลักษณะเสิร์จหรือทรานเซียนต์และมีขนาดมากกว่าแรงดันเกินชนิดอื่นๆ แต่มีความสำคัญต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ ของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เพราะในช่วงเวลาดังกล่าวฉนวนของระบบและอุปกรณ์ต่างๆ จะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า หากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน จะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนและเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดปกติในระบบ

ในภูมิภาคบางพื้นที่ ไม่สามารถติดตั้งรากสายดินในระบบ 115 kV ให้ได้ค่าความต้านทานดิน ได้ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดการเกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วยจากฟ้าผ่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ความต้านทานดินกับระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าระยะต่างๆ มีความสัมพันธ์กับการเกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วย ที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าและยังมีผลต่อค่าใช้จ่ายและความเสียหายที่ตามมา

1.2.ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1.เพื่อศึกษาระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้ากับค่าความต้านทานอิมพัลส์ ที่มีผลต่อค่าแรงดันวาวไฟวิกฤต ในกรณีการใช้ลูกถ้วย 7 - 9 ลูกถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ความชันหน้าคลื่น(Front time) 2 ไมโครเซคคันด์

1.2.2.เพื่อศึกษาอัตราการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate)

1.2.3.เพื่อศึกษาหาความเหมาะสมของระยะห่างการปักเสาพาดสายไฟฟ้ากับค่าความต้านทานอิมพัลส์ ในกรณีการใช้ลูกถ้วย 7 - 9 ลูกถ้วย

1.3.สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1.ภูมิภาคบางพื้นที่ที่มีความยากลำบากในการติดตั้งค่าความต้านทานอิมพัลส์ให้ได้ตามมาตรฐานการไฟฟ้า

1.3.2.ระยะห่างการปักเสาพาดสายไฟฟ้ากับความต้านทานอิมพัลส์ มีผลต่อการเกิด

อัตราการวาบไฟตามผิวลูกถ้วย (Flashover Rate)

1.3.3. จำนวนลูกถ้วยมีผลต่อค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต

1.3.4. จากผลการวิเคราะห์ที่ได้นำไปหาอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ และค่าระยะห่างการปักเสาพาดสายไฟฟ้ากับค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่เหมาะสม

1.4. ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการศึกษาและคำนวณแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยโดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP เพื่อหาค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าและค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่เหมาะสม และศึกษาหาอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าและค่าความต้านทานอิมพัลส์ ในกรณีการใช้ลูกถ้วย 7 - 9 ลูกถ้วย

1.5. ขอบเขตการวิจัย

1.5.1. ศึกษาวิเคราะห์ระบบสายส่ง 115 กิโลโวลต์ แบบวงจรเดี่ยว ลูกถ้วยแขวนแก้วเหนียว (แบบ 52-3) 7-9 ลูก ในกรณีที่มีฟ้าผ่าลงหัวเสา โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ในการหาค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย

1.5.2. การทดสอบจะใช้กระแสฟ้าผ่า 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ความชันหน้าคลื่น (Front time) 2 ไมโครเซคคันด์ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน $100 \Omega.m$ ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าวิกฤต 400 kV/m

1.5.3. ศึกษาค่าแรงดันวาบไฟวิกฤตของลูกถ้วย ในกรณีการใช้ลูกถ้วย 7 - 9 ลูกถ้วยระหว่างระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าและค่าความต้านทานอิมพัลส์

1.5.4. ศึกษาผลการเกิดอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ระหว่างระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าและค่าความต้านทานอิมพัลส์ ในกรณีการใช้ลูกถ้วย 7 - 9 ลูกถ้วย

1.5.5. ศึกษาหาระยะห่างการปักเสาพาดสายไฟฟ้ากับค่าความต้านทานอิมพัลส์ ที่เหมาะสมของในกรณีการใช้ลูกถ้วย 7 - 9 ลูกถ้วย

1.6. ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1. ศึกษาบทความที่ยอมรับและได้ตีพิมพ์เผยแพร่ ในเรื่องปัจจัยและสาเหตุของการเกิดฟ้าผ่าในระบบสายส่งต่างๆ ปัญหาที่มี วิธีการแก้ไขปัญหา การป้องกัน แนวความคิด

1.6.2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าขัดข้องจากสาเหตุการเกิดฟ้าผ่าของระบบ 115 kV

1.6.3.ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่ใช้ในระบบสายส่ง 115 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้าภูมิภาค

1.6.4.นำข้อมูลวิเคราะห์หาค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ระหว่างระยะห่างของการปักเสา
พาดสายไฟฟ้าและค่าความต้านทานอิมพีดส์ ที่กระแสไฟฟ้า 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ความชันหน้า
คลื่น 2 ไมโครเซคคันด์ ในกรณีการใช้ลูกถ้วย 7 – 9 ลูกถ้วย โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP

1.6.5.นำผลการวิเคราะห์ที่ได้หาค่าอัตราการวางไฟตามผิวย้อนกลับ และหาระยะห่างการ
ปักเสาพาดสายไฟฟ้ากับค่าความต้านทานอิมพีดส์ ที่เหมาะสม

1.6.6.สรุปผลการวิเคราะห์

ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 บทนำ

ไฟฟ้าแรงสูงตามความหมายที่ระบุไว้ในมาตรฐานสากล หมายถึงแรงดันไฟฟ้าที่สูงตั้งแต่ 1000 โวลต์ ขึ้นไป ไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติ เป็นผลของการเกิดดีสชาร์จหรือคายประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆและดิน มีค่าสูงมากจนอากาศแตกตัวแล้วเกิดไอออนในเซชันแบบสมบูรณจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดิน

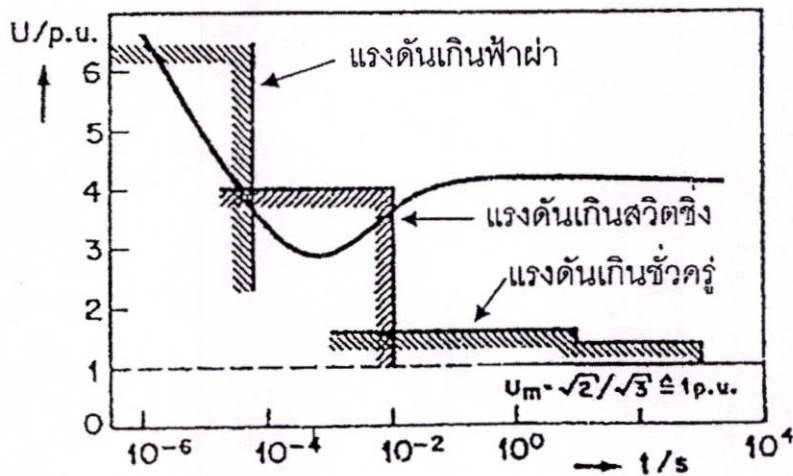
ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามีโอกาสได้รับแรงดันเกินที่มีต้นกำเนิด 2 ประเภท ประเภทแรกมีต้นกำเนิดมาจากภายในบรรยากาศ เช่น ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ประเภทที่สองมีต้นกำเนิดจากภายในระบบ เช่น แรงดันเกินชั่วคราว และแรงดันเกินสวิตซ์อินเนื่องมาจากการปิดวงจร เปิดวงจร หรือเกิดจากการผิดพลาด [1] โดยแรงดันเกินเหล่านี้อาจมีขนาดเกินกว่าแรงดันระบบหลายเท่า เมื่อพิจารณาขนาดของช่วงระยะเวลาที่เกิดขึ้น อาจแบ่งแรงดันเกินออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

2.1.1 แรงดันเกินฟ้าผ่า

2.1.2 แรงดันเกินสวิตซ์อิน

2.1.3 แรงดันเกินชั่วคราว

ช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกินทั้ง 3 ชนิดมีค่าแตกต่างกันดังรูปที่ 1 เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนว่าแรงดันเกินแต่ละชนิดนั้นมีขนาดมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 2.1 ช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกินประเภทต่างๆ

จึงมีการเทียบขนาดแรงดันที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนเท่าของแรงดันเฟสค่ายอด ตามสมการที่ 2.1

$$U_{ph} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_m = 1 p.u. (per unit) \quad (2.1)$$

ในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าแรงดันเกินฟ้าผ่าจะมีขนาดเป็นจำนวนมากกว่าแรงดันเกินชนิดอื่น คือมีโอกาสสูงมากกว่า 6 เท่าของแรงดันเฟสค่ายอด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการวิเคราะห์เพื่อการป้องกันและการออกแบบให้เหมาะสม

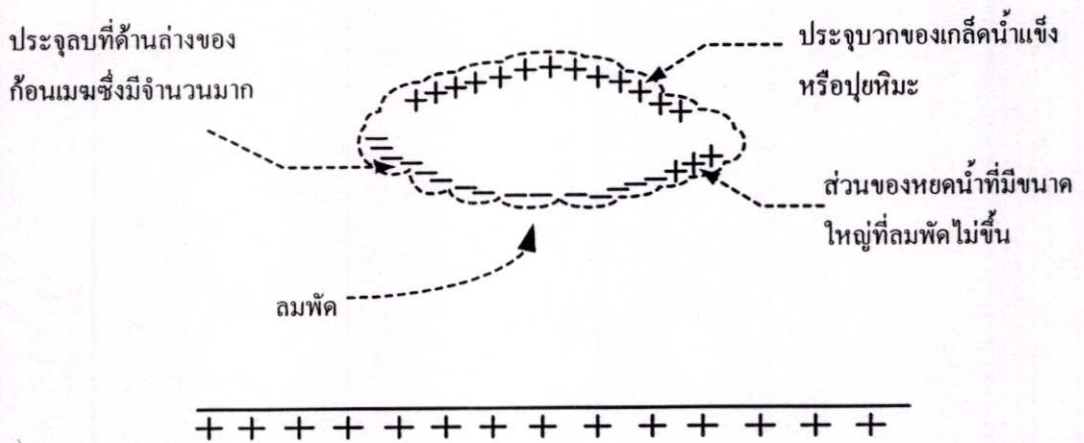
การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของพารามิเตอร์ใด จำเป็นต้องมีฐานเพื่ออ้างอิงหรือเปรียบเทียบ เช่น แรงดันเฟสค่ายอดที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง คือแรงดันสูงสุดที่พวงลูกถ้วยรับได้ จึงมีการเทียบขนาดแรงดันที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนเท่าของแรงดันสูงสุดที่พวงลูกถ้วยรับได้ (แสดงในตารางที่ 3.1) อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์หรือเปอร์เซ็นต์ของค่าอ้างอิง (Reference Value) ตามสมการที่ 2.2

$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันวาบไฟวิกฤต} = \frac{\text{แรงดันที่เกิดจากฟ้าผ่า (กิโลโวลต์)}}{\text{แรงดันสูงสุดที่พวงลูกถ้วยรับได้ (กิโลโวลต์)}} \quad (2.2)$$

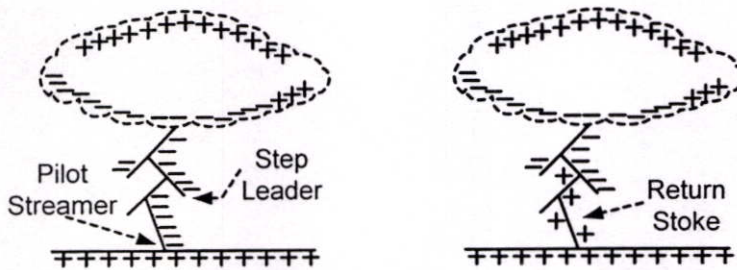
2.2 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า (The Lightning Flash)

การเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเกิดจากประจุบวกและประจุลบบนก้อนเมฆ เกิดขึ้นเนื่องจากมีลมพัดเมล็ดฝนจากส่วนล่างของก้อนเมฆขึ้นไปด้านบนที่เย็นมากจนเป็นเกล็ดน้ำแข็ง เกิดการเสียดสีของอากาศและหยดน้ำทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต โดยมากด้านล่างของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบและมีบางส่วนเป็นประจุบวกประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดเนื่องจากหยดน้ำมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่ลมจะพัดพาขึ้นไปได้ ส่วนบนของก้อนเมฆจะเป็นประจุบวก ดังรูปที่ 2.2 เมื่อเกิดประจุที่ก้อนเมฆทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆและดิน ถ้าสนามไฟฟ้าที่สะสมสูงมากเกินกว่าที่อากาศจะทนได้ ก็จะเกิดการแตกตัวของอากาศและเปลี่ยนสภาพอากาศจากฉนวนเป็นตัวนำ เกิดฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน (สนามไฟฟ้าวิกฤตได้ก้อนเมฆประมาณ 10 KV / cm.) เนื่องจากสภาพอากาศในแต่ละบริเวณมีความดันและอุณหภูมิไม่เท่ากัน ดังนั้นการเกิดไอออไนเซชันจึงต่างกันทำให้เห็นการเกิดการแตกตัวของอากาศเป็นเหมือนรากต้นไม้ ดังรูปที่ 2.3 (ก) ด้านหัวของฟ้าผ่าเรียกว่า Pilot Streamer แต่ละแยกของฟ้าผ่าเรียกว่า Step Leader ช่วงดังกล่าวประจุบนก้อนเมฆจะเคลื่อนที่ลงมาไม่รวดเร็วนัก เกิดกระแสขนาดไม่กี่ร้อยแอมแปร์ ช่วงนี้ยังไม่เห็นแสงหรือได้ยินเสียง เมื่อฟ้าผ่าลงถึงพื้นดินเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วระหว่างประจุบวกและลบ ทำให้เกิดกระแสมากขึ้น กระแสที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนประจุบนก้อนเมฆ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุ

การเคลื่อนที่ของประจุจากภาคพื้นดินเพื่อขึ้นไปรวมตัวกับประจุนบนก้อนเมฆเรียกว่า Return Stroke ดังรูปที่ 2.3 (ข) ทำให้เกิดแสงและเสียง



รูปที่ 2.2 ประจุไฟฟ้าที่เกิดที่ก้อนเมฆก่อนเกิดฟ้าผ่า



ก.) อากาศเริ่มเกิดไอออไนเซชัน

ข.) เกิดฟ้าผ่าที่สมบูรณ์

รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเกิดฟ้าผ่า

กระแสฟ้าผ่าโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 10 - 20 กิโลแอมแปร์ กระแสฟ้าผ่าสูงสุดที่เคยมีการวัดได้มีค่าประมาณ 240 กิโลแอมแปร์ กระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่า 20 กิโลแอมแปร์ ฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังมีโอกาสเสียหายได้ เพราะฉนวนในระบบถูกออกแบบโดยขึ้นกับกระแสฟ้าผ่าเฉลี่ยเท่านั้น แต่ถ้าออกแบบฉนวนให้ขึ้นกับกระแสฟ้าผ่าสูงๆ ก็ต้องลงทุนสูงมาก ซึ่งกระแสฟ้าผ่าสูงๆ นั้นนานปีจึงเกิดขึ้นสักครั้ง จึงไม่คุ้มกับการลงทุน

2.3 ผลที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่า (The Lightning Flash of Effect)

ผลที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าทำให้เกิดความเสียหายสามารถแยกออกได้ 4 แบบ

2.3.1 แรงดัน

แรงดันฟ้าผ่าที่มีค่าสูง ทำให้ฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเสียหาย ถ้าอุปกรณ์นั้นถูกฟ้าผ่าโดยตรง ดังนั้นการลดแรงดันดังกล่าวจึงมีความจำเป็น ซึ่งในทางปฏิบัติจะพยายามไม่ให้ผ่าลงสายส่งโดยตรง แต่จะใช้สายดินรับฟ้าผ่า เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่ เกิดในสายเฟสมีค่าน้อยลง

2.3.1.1 แรงดันเสิร์จที่สะท้อนจากฐานเสา การที่ฟ้าผ่าลงที่สายดินยอดเสาส่ง ดังรูปที่ 2.4 จะทำให้เกิดแรงดันเกิน ขึ้นบนสายดิน และในขณะเดียวกันก็เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่สายเฟส ทำให้เกิดแรงดันระหว่างสายเฟสกับสายดิน แรงดันดังกล่าวถ้ามีมากก็ทำให้เกิดควาไฟฟ้าที่ฉนวนที่เสา จะเกิดเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินและเสาส่ง ซึ่งทำให้แรงดันที่เสามีค่าตามสมการที่ 2.3 โดยฟ้าผ่าลงที่สายดินยอดเสาส่งทำให้เสิร์จอิมพีแดนซ์รวมมีค่า $Z_g \parallel Z_T \parallel Z_g$ ตามสมการที่ 2.4 โดยทั่วไปค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสามีค่าโดยประมาณ 60 – 150 โอห์ม และความเร็วของคลื่นคิตที่ 300 เมตรต่อไมโครวินาที

$$V_T = \frac{Z_T(Z_g/2)}{Z_T + (Z_g/2)} I_o \quad (2.3)$$

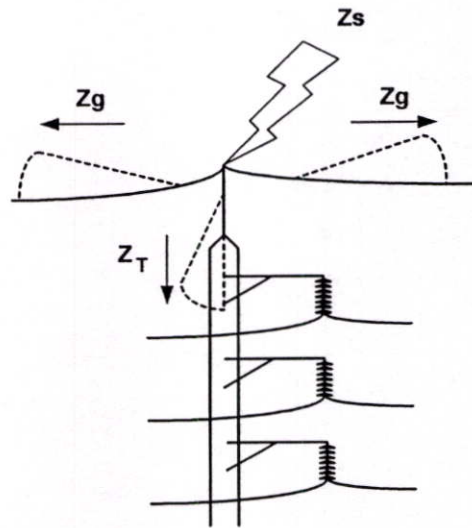
$$Z = Z_T / (1 + 2Z_T / Z_g) \quad (2.4)$$

เมื่อ	V_T	คือ แรงดันเกินฟ้าผ่ายอดเสา
	Z_T	คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาส่ง
	Z_g	คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน
	I_o	คือ กระแสฟ้าผ่า

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากฐานเสามีค่าตามสมการที่ 2.5

$$\alpha_T = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i} \quad (2.5)$$

เมื่อ	α_T	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน
	R_i	คือ ค่าความต้านทานอิมพลัส



รูปที่ 2.4 ฟ้าผ่าลงที่สายล่อฟ้าบนเสาส่ง

สมการที่ 2.6 แสดงแรงดันที่ยอดเสาก่อนที่คลื่นจะสะท้อนจากฐานเสาจะเดินทางมาถึง

$$V_{TT} = \frac{Z_T T_T}{t_f} I_o \quad (2.6)$$

เมื่อ V_{TT} คือ ค่าแรงดันที่ยอดเสาก่อนที่คลื่นจะสะท้อนจากฐานเสา
 T_T คือ เวลาที่คลื่นเดินทางจากยอดเสาถึงฐานเสา
 t_f คือ เวลาหน้าคลื่น

สมการที่ 2.7 แสดงแรงดันสุดท้ายหลังจากที่มีการสะท้อนจากฐานเสา

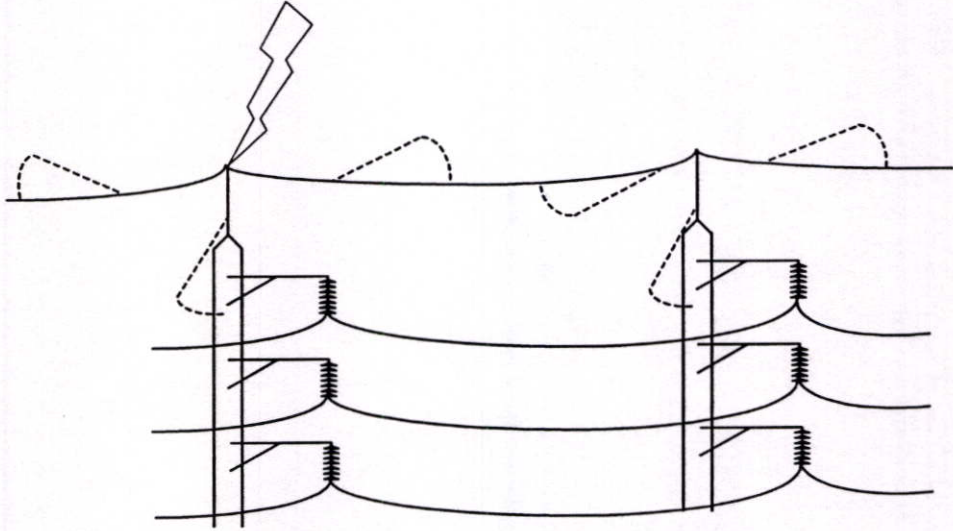
$$V_F = \alpha_T V_{TT} - V_T \quad (2.7)$$

แรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วยหาได้จากสมการที่ 2.8

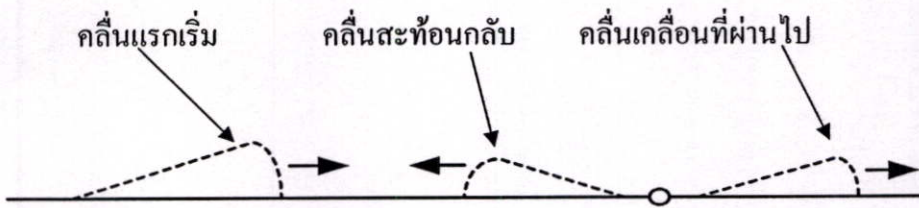
$$V_i = V_T (1 - K) \quad (2.8)$$

V_i คือ แรงดันวาบไฟตามผิวลูกถ้วย (kV)
 V_T คือ แรงดันเกินฟ้าผ่ายอดเสา
 K คือ ตัวประกอบคัปปลิงระหว่างสายดินและสายเฟส (มีค่าประมาณ 0.15 - 0.30)

2.3.1.2 แรงดันเสิร์จที่สะท้อนจากเสาต้นถัดไป ผลของความต้านทานดินที่ฐานเสา ส่งมีผลอย่างมากต่อแรงดันที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.5 เพราะถ้าความต้านทานดินน้อย ก็ทำให้ค่าแรงดันที่เสาส่งน้อยลงด้วย ตามทฤษฎีของคลื่นเคลื่อนที่ในสายส่ง คลื่นที่วิ่งไปจะมีคลื่นส่วนหนึ่งจะผ่านไปและคลื่นอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 คลื่นเคลื่อนที่ที่และสะท้อนกลับจากเสาข้างเคียง



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อเกิดฟ้าผ่า

2.3.2 ค่าความชันกระแสฟ้าผ่า

ความชันของกระแสฟ้าผ่ามีผลต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ตามสมการที่ 2.9

$$E = L \frac{di}{dt} \quad (2.9)$$

เมื่อมีกระแสที่ความชันมากๆ แม้ขนาดกระแสจะมีค่าต่ำก็ตาม จะทำให้เกิดแรงดันสูงได้ เมื่อมีอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเป็นความเหนี่ยวนำ เช่น ทรานซิสเตอร์กระแสฟ้าผ่าต่ำๆ แต่มีความชันมาก สามารถเกิดตลอดผ่านอะเรสเตอร์มาได้ เมื่อเข้ามาหือแปลงที่มีคุณสมบัติเป็นความเหนี่ยวนำ ก็ทำให้เกิดแรงดันสูงภายในหือแปลง ทำให้เกิดความเสียหายกับหือแปลง แรงดันที่หือแปลงที่

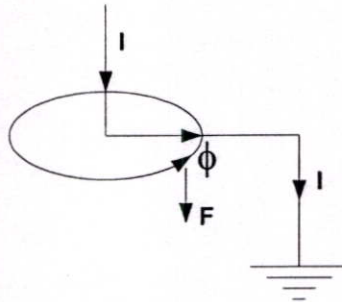
เกิดขึ้นเนื่องจากความชัน เป็นเรื่องที่ยากได้ลำบาก ดังนั้นในการป้องกันต้องพยายามไม่ให้เกิดแรงดันฟ้าผ่าที่บริเวณใกล้หม้อแปลง โดยการติดตั้งสายดินเหนือสายส่งในบริเวณที่ใกล้หม้อแปลง

2.3.3 แรงกระทำ กระแสฟ้าผ่า

แรงกระทำ กระแสฟ้าผ่าทำให้เกิดแรงกระทำสูงๆ ได้ แรงกระทำที่เกิดขึ้นมี 2 อย่าง คือ

2.3.3.1 แรงกระทำที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของอากาศรอบๆ ล้ำฟ้าผ่าอย่างรวดเร็ว

2.3.3.2 แรงกระทำที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสฟ้าผ่ากระทำกับสนามแม่เหล็ก กระแสฟ้าผ่าไหลผ่าน ลวดตัวนำที่ออกจาก กระแสในแนวตั้งสร้างสนามแม่เหล็ก ตั้งฉากกับ กระแสในแนวนอนตามกฎมือขวาของ Maxwell และทำให้เกิดแรงขึ้นตามทิศทาง ดังรูปที่ 2.7 เหตุผลดังกล่าวนี้เองที่เป็นข้อแนะนำหรือข้อห้ามว่าเมื่อติดตั้งสายนำกระแสฟ้าผ่าลงดินควรเดินตั้งลงดิน โดยตรงและไม่ควรหักฉาก



รูปที่ 2.7 แรงกระทำที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสฟ้าผ่ากับสนามแม่เหล็ก

2.3.4 ความร้อน

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลต่ออุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังคือ ฟ้าผ่าที่มีขนาดแรงดันไม่มาก แต่ช่วงเวลาที่เกิดขึ้น ก็สามารถทำให้อุปกรณ์เสียหายได้เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์

2.4 การป้องกันและแรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่าที่เกิดบนสาย

การป้องกันแรงดันที่อาจเกิดขึ้นบนสายส่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะสายส่งมีความยาวมากกว่าอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ ในระบบไฟฟ้า มีโอกาสเกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าสูง และสายส่งยังเป็นพาหะที่นำแรงดันเกินจากแหล่งหนึ่งไปยังอีกแหล่งหนึ่ง ไปสู่อุปกรณ์สำคัญ ๆ ในระบบ โดยทั่วไป ในการออกแบบจนวนของอุปกรณ์และระบบ จะได้รับการออกแบบให้ทนต่อแรงดันเกินได้ระดับหนึ่ง ส่วนที่เกินกว่านั้นจะให้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินทำหน้าที่ตัด ขุด หรือลดทอนลงให้ต่ำพอเพื่อมิให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์และระบบ โดยอาศัยการประสานสัมพันธ์การ

ฉนวนที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

2.4.1 การป้องกันแรงดันเกินในระบบสายส่ง สามารถนำ 3 วิธีต่อไปนี้มาร่วมกันได้ [2]

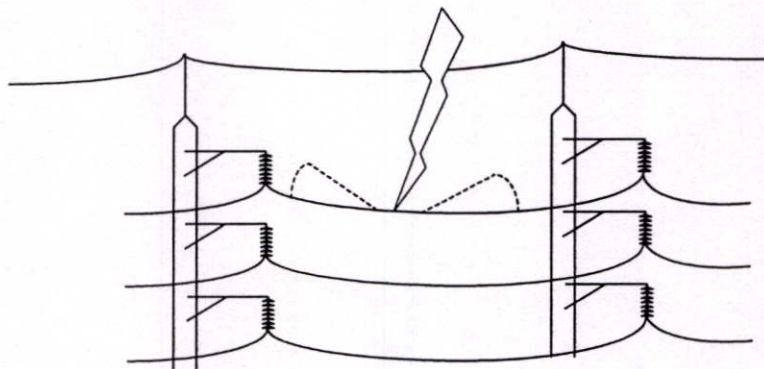
2.4.1.1 การติดตั้งสายดินซึ่งในอากาศเหนือสายส่งตามแนวความยาวของสายส่ง หรือ สายล่อฟ้ามิให้ฟ้าผ่าที่มีขนาดกระแสสูง ๆ ฝ่าลงสู่สายเฟส ในการออกแบบ สายล่อฟ้าต้องคำนึงถึงมุมชิลด์ (shielding angle) ที่พอเหมาะและค่าความต้านทานดินของ ฐานเสาต้องมีความต่ำ ๆ เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยสูงและทำให้เกิดการวาว ไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไปยังสายเฟส

2.4.1.2 การใช้ช่องว่างอากาศระหว่างแท่งอิเล็กโตรดหรือที่เรียกกันว่า arcing horn ติดตั้งคร่อมระหว่างอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน เช่น ลูกถ้วยฉนวน เมื่อแรงดัน เกิดขึ้นจะเกิดเบรกดาวนที่แกปอากาศระหว่างแท่งอิเล็กโตรด ช่วยมิให้เกิดการวาวไฟตาม ผิวของลูกถ้วยฉนวน ทำให้ลูกถ้วยไม่ได้รับการเสียหาย การเกิดเบรกดาวนของแกป อากาศนี้เป็นการลัดวงจรสู่ดินเพียงชั่วคราวเท่านั้น

2.4.1.3 การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าใกล้อุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน โดยทั่วไปการ ทำงานของกับดักฟ้าผ่า มีหลักการอยู่ 2 อย่างคือ ต้องสามารถดิสชาร์จประจุผ่านสู่ดินได้ ซึ่งทำให้แรงดันเกินลดลงก่อนผ่านเข้าไปยังอุปกรณ์ที่มันทำหน้าที่ป้องกัน และต้อง สามารถหยุดนำกระแสไฟฟ้าลงสู่ดินเมื่อประจุฟ้าผ่าถูกดิสชาร์จผ่านไปแล้ว หากหยุด ไม่ได้ก็จะมีกระแสไฟฟ้าที่มาจากแหล่งจ่ายพลังงานของระบบไหลติดตามลงไปด้วย มีผล ให้ตัวฉนวนทนต่อพลังงานที่ถูกถ่ายเทเป็นเวลาหลาย ๆ มิลลิวินาทีไม่ได้ และเกิดระเบิดขึ้น

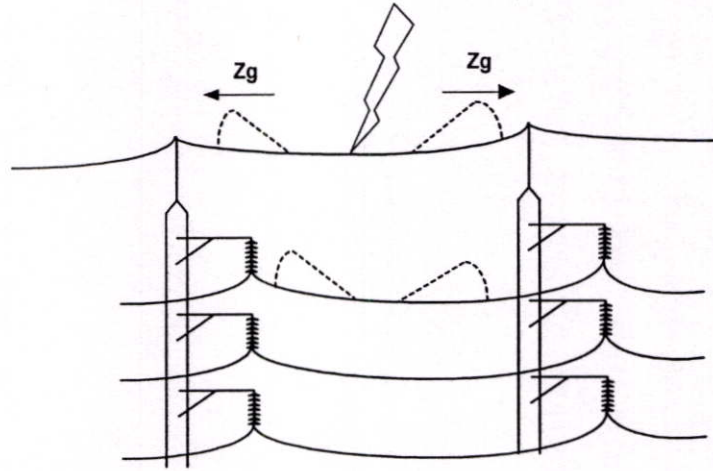
2.4.2 แรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่าที่เกิดบนสายมี 4 แบบ

2.4.2.1 ฟ้าผ่าโดยตรงลงสายส่ง แรงดันไฟฟ้าเกินที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมากและ โดยทั่วไปมักเกิดเบรกดาวนกับแนวนของสายส่ง ดังรูปที่ 2.8



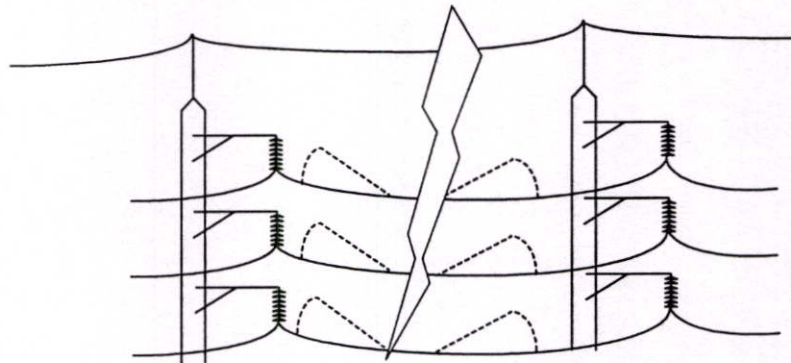
รูปที่ 2.8 ฟ้าผ่าโดยตรงลงสายส่ง

2.4.2.2 ฟีด้าล้งสายคิน แร้งคัณไฟฟาเกันทึเก็ดซึ้นทึสายเฟลสมึค้่าประมาณ 20 – 30 เปร้อเร็นตึ ของแร้งคัณไฟฟาเกันบนสายคิน ดัังรูปทึ 2.9 ส่วนมากแร้งคัณเกันบนสายสััง มัักเก็ดซึ้นดว้วยวึธีการนี้ โดยฟีด้าล้งกลางสายคินทึาให้เส็ร์จิมพีแณซัมีค้่า $Z_g // Z_g$



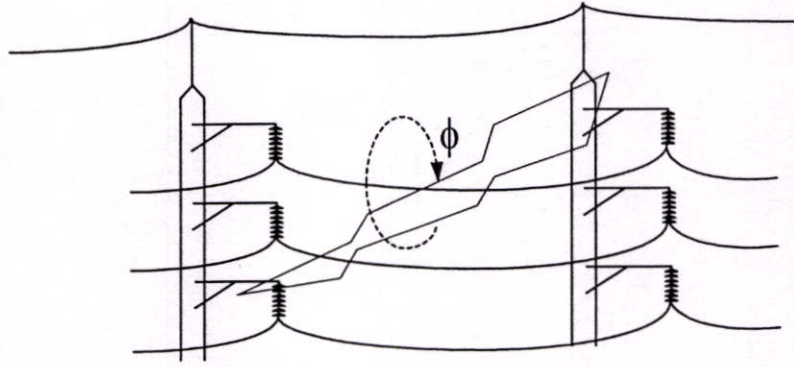
รูปทึ 2.9 ฟีด้าล้งสายคิน

2.4.2.3 ฟีด้าล้งคิน ฟีด้าล้งคินโกลึ้เก็ดซึ้นกับสายสัังทึาให้ประจุนบนสายสัังมึอึสระทึ จะเก็ดซึ้นดว้วยวึธีการนี้ โดยฟีด้าล้งกลางสายคินทึาให้เส็ร์จิมพีแณซัมีค้่า $Z_g // Z_g$ ส่วนมากมัักมึค้่าน้อยกว่า 200 กิโลวอลตึ



รูปทึ 2.10 ฟีด้าล้งคิน

2.4.2.4 ฟีด้าล้งคินเน็ียงขนานกับสายสััง แร้งคัณไฟฟาเกันบนสายสัังในกรณีนี้ เก็ดเน็ืองจากการเหน็ยว้เนาของสนามแม่เหล็ก ดัังรูปทึ 2.11 โอกาสเก็ดแบบนึมีน้้อย แต่ถึา เก็ดซึ้นจะมึผลรุนแรงกว่าแบบฟีด้าล้งคิน



รูปที่ 2.11 ฟาผ่าลงดินเฉียงขนานกับสายส่ง

แรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟาผ่าลงที่สายส่งหรือสายเฟส ทำให้แรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟาผ่าที่ลงสายดิน ลงดินข้างเคียง เมื่อฟาผ่าขนาดกระแส (I) ลงสายที่มีเสรีจิมพีแดนซ์ (Z) ทำให้แรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าตามสมการที่ 2.10

$$V = \frac{I_o Z}{2} \quad (2.10)$$

2.5 อัตราการวาวไฟตามผิว (Flashover Rate)

สาเหตุสำคัญหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟดับ คือการเกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วยเนื่องจากผลของการเกิดฟาผ่าทำให้เกิดลัดวงจร การเกิดวาวไฟเกิดได้ 2 ลักษณะ คือการเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับที่เกิดจากฟาผ่าที่ขอดเสาหรือผ่าลงที่สายดิน และการเกิดวาวไฟตามผิวที่เกิดจากการป้องกันลัมเหลวของสายดิน (Shielding failure flashover) ทำให้ฟาผ่าลงสายตัวนำ

การวิเคราะห์แรงดันเกินฟาผ่าในระบบสายส่งเพื่อป้องกันและออกแบบการประสานสัมพันธ์การจนวนให้เหมาะสมสามารถแยกออกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

2.5.1 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟาผ่า (Lightning impulse)

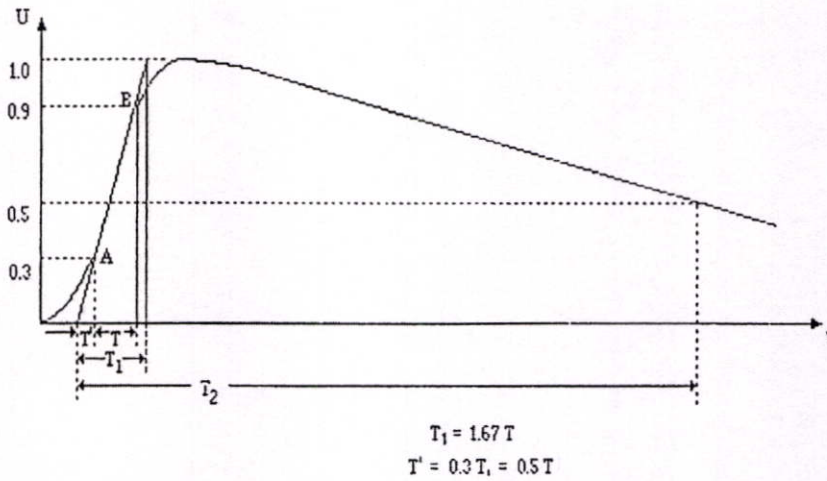
รูปคลื่นอิมพัลส์ฟาผ่าอาจมีรูปร่างแตกต่างกันไป ตามมาตรฐาน IEC 60 - 1 [3] กำหนดให้รูปคลื่นอิมพัลส์ฟาผ่าเต็ม เป็นดังรูปที่ 2.12 พารามิเตอร์ต่างๆ กำหนดได้ดังนี้

2.5.1.1 ค่าขอด คือ ค่าขอดของรูปคลื่นเต็ม

2.5.1.2 เวลาคู่คลื่น T มีค่าเท่ากับ $1.67T$ โดย T เป็นผลต่างของเวลาที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 30 % ของค่าขอด กับเวลาที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 90 % ของค่าขอด ทั้งนี้สมมุติว่าจุดเริ่มต้นเป็นจุดที่แรงดันมีค่าเป็นศูนย์โดยคำนวณจากเส้นตรงที่ผ่านจุด 2 จุด

ที่นำมาคำนวณค่า T ดังกล่าวเรียกว่าจุดเริ่มต้นเสมือน (virtual origin, O_1)

2.5.1.3 เวลาถึงถึงค่ายอด T_2 เป็นเวลาจากจุดเริ่มต้นเสมือนผ่านค่ายอด จนถึงจุดที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 50% ของค่ายอด



รูปที่ 2.12 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

2.5.2 โอกาสการเกิดฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ อันเป็นผลของการคายประจุหรือดีสชาร์จของประจุไฟฟ้าที่สมบูรณ์อยู่ในก้อนเมฆ การสะสมของประจุที่มีขั้วต่างกันเป็นผลให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างกลุ่มประจุเหล่านั้น ถ้าประจุสะสมรวมกันมีปริมาณมากขึ้น ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเกินค่าวิกฤติความคงทนของอากาศต่อแรงดันไฟฟ้า ก็จะทำให้เกิดการดีสชาร์จของประจุขึ้น อันเป็นจุดเริ่มต้นของการนำไปสู่การเกิดการดีสชาร์จเบรกดาวน์ขึ้น ดีสชาร์จอาจเกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆ หรือระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกก็ได้ ในกรณีที่เกิดดีสชาร์จขึ้นระหว่างเมฆกับพื้นโลก จะเป็นกรณีที่เกิดฟ้าผ้านั่นเอง [4] Armstrong-Whitehead [5] ได้นำเสนอโอกาสการเกิดฟ้าผ่า (probability density function) เป็นตามสมการที่ 2.11

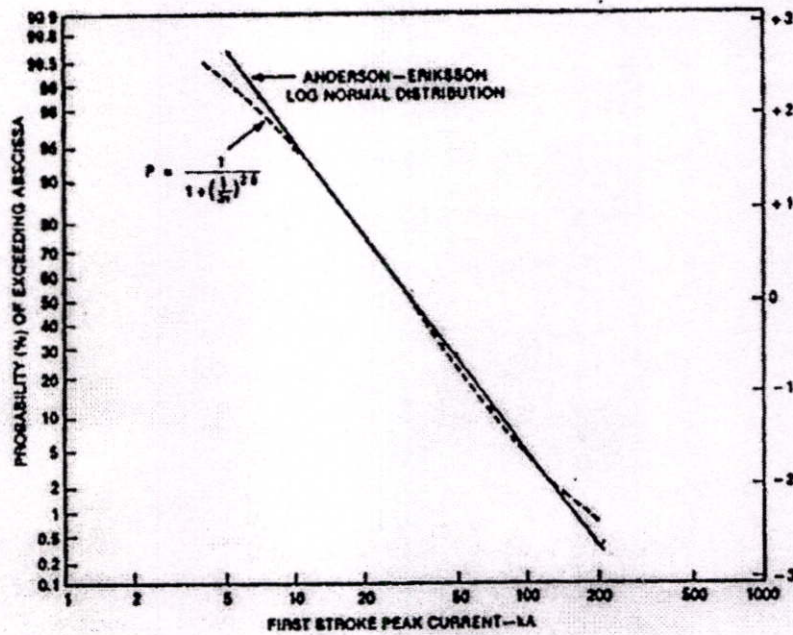
$$P(I) = 0.0475e^{\left(-\frac{I}{20}\right)} + 0.001e^{\left(-\frac{I}{50}\right)} \quad (2.11)$$

เมื่อ I คือ ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า (kA)

โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าเกินกว่ากระแส I_0 อาจหาได้จากสมการ 2.12 ประมาณค่าของ IEEE Working Group [6] ซึ่งมีพื้นฐานมาจากข้อมูลของ Anderson และ Eriksson [7] ดังรูปที่ 2.13

$$P(I > I_0) = \frac{I}{1 + \left(\frac{I_0}{3I}\right)^{2.6}} \quad (2.12)$$

เมื่อ I_0 คือ ค่ากระแสผ่าวิกฤติ (kA)



รูปที่ 2.13 โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าค่ายอดเกินกว่า I_0 สำหรับฟ้าผ่าชั่วพล

2.5.3 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง

กำหนดให้ N_g เป็นความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน (ground flash density) จำนวนครั้งต่อ 1 ตารางกิโลเมตรต่อปี ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากประสบการณ์ มีรูปแบบทั่วไปเป็นตามสมการที่ 2.13

$$N_g = k \cdot TD^a \quad (2.13)$$

เมื่อ TD คือ จำนวนวันที่เกิดฟ้าผ่าต่อปี (thunderstorm day per year หรือ keraunic level) มีผู้เสนอค่าคงที่ k และ a มากมาย Eriksson [8] เสนอสมการที่ 2.14 ของ N_g ซึ่งได้รับการยอมรับจากทั้ง CIGRE และ IEEE [9] คือ

$$N_g = 0.04 \cdot TD^{1.25} \quad (2.14)$$

นอกจากนี้ IEEE Working Group [10] ยังได้เสนอสมการที่ 2.15

$$N_g = 0.05 \cdot TH \quad (2.15)$$

เมื่อ TH คือ จำนวนชั่วโมงที่เกิดฟ้าผ่าต่อปี (thunderstorm hour per year)

สายส่งที่ทอดแนวอยู่เหนือพื้นดินเป็นระยะสูง h เมตร จะมีโชนบนพื้นดินรอบ ๆ แนวสายที่ฟ้าผ่าเข้าสู่โชนนี้แล้วก็จะผ่าลงสู่ระบบสายส่งทุกครั้ง แต่ฟ้าผ่านอกโชนนี้จะลงสู่พื้นดินทุกครั้ง รูปที่ 2.14 แสดงถึงลักษณะของโชนดังกล่าวนี้ โดยมองจากทางด้านกว้างออกไปจากเสาเป็นระยะ W และความกว้าง b ซึ่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อมีจุดสูงสุดเป็นจุดยอดเดียว เช่น การใช้สายดิน 1 เส้น ในทางปฏิบัติค่า b น้อยกว่า ค่า h มาก ช่วงกว้าง W นี้เรียกว่า right-of-way width หรือ shadow width Whitehead [11] ได้สร้างสมการที่ 2.16 หาค่า W (เมตร) ไว้ดังนี้

$$W = 4h^{1.09} + b \quad (2.16)$$

เมื่อ h คือ ความสูงเฉลี่ยของสายเฟส (เมตร)

b คือ ระยะห่างระหว่างสายล่อฟ้า (เมตร)

พารามิเตอร์ h ในสมการที่ 2.15 หาได้จากสมการที่ 2.17

$$h_{av} = h_{ph} \frac{2}{3} S \quad (2.17)$$

เมื่อ h_{av} คือ ความสูงเฉลี่ยของสายเฟส (เมตร)

h_{ph} คือ ความสูงเฉลี่ยของสายเฟสที่เสา (เมตร)

S คือ ระยะหย่อนของสาย (เมตร)

Eriksson [8] เสนอสมการที่ 2.18 ของระยะ W เป็น

$$W = 28 h_t^{0.6} + b \quad (2.18)$$

เมื่อ h_t คือ ความสูงของเสา (เมตร)

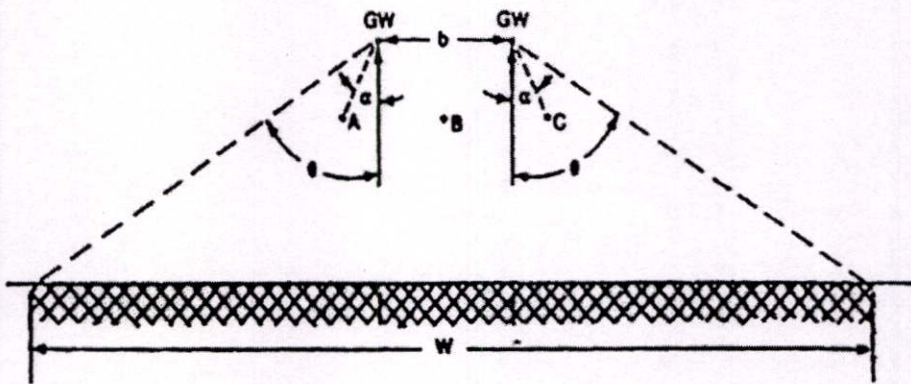
สมการของ Eriksson ขึ้นกับความสูงของเสาเท่านั้น แต่สมการของ Whitehead ขึ้นกับความสูงเฉลี่ยของสายเฟส ซึ่งเป็นฟังก์ชันของทั้งความสูงของสายเฟสที่เสาและระยะหย่อนของสาย

จากสมการของ N_g และ W สามารถกำหนดสมการที่ 2.19 ของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่งต่อระยะทาง 100 กิโลเมตร (N_L) พื้นที่ของแนวสายส่งยาว 100 กิโลเมตร และกว้าง W เมตร คือ $\frac{W}{10} km^2$ ดังนั้น

$$N_L = N_g \cdot \frac{W}{10} \quad (2.19)$$

จากสมการ 2.18 และสมการ 2.19 จะได้สมการ 2.20

$$N_L = \frac{N_g}{10} (28h_t^{0.6} + b) \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.14 right-of way width หรือ shadow width (W)

IEEE Standard กำหนดสมการที่ 2.21 ของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่งต่อระยะทาง 100 กิโลเมตร (N_L) มีค่าเท่ากับ [6]

$$N_L = \frac{N_g}{10} (28h^{0.6} + S_g) \quad (2.21)$$

เมื่อ h คือ ความสูงของสายดินป้องกัน (เมตร)

S_g คือ ระยะห่างระหว่างสายดินป้องกันในแนวราบ (เมตร)

N_g คือ ความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน

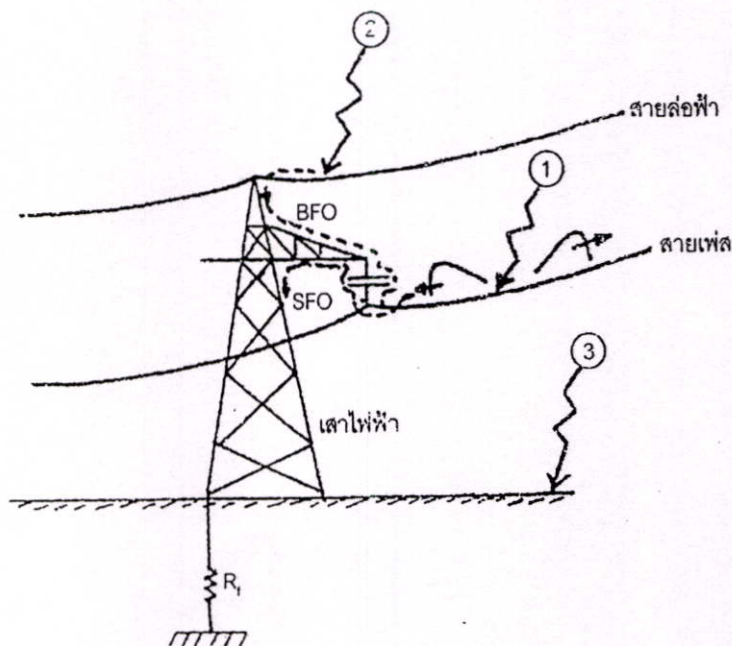
2.5.4 ฟิวส์ในระบบสายส่ง

การวิเคราะห์แรงดันเกินฟิวส์ จำเป็นต้องกำหนดองค์ประกอบพื้นฐานและค่าพารามิเตอร์ของระบบสายส่งดังรูปที่ 2.15 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของระบบซึ่งมีสายชีลด์ สายเฟส เสาไฟฟ้า ลูกถ้วยฉนวน และความต้านทานดินของฐานเสา และแสดงการเกิดฟิวส์ลบนระบบสายส่งในกรณีต่างๆ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

2.5.4.1 กรณีที่ 1 ฟิวส์ลนที่สายเฟส แม้มีสายล่อฟ้าเป็นระบบป้องกัน อาจมีการชิลด์ลัมเหลวเกิดขึ้นทำให้แรงดันของสายเฟสเพิ่มขึ้นอย่างมาก หากลูกถ้วยฉนวนไม่สามารถทนต่อแรงดันสูงระดับนี้ได้ ก็จะเกิดการวาวไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนไปยังเสาและดินที่มีความต้านทานดินของฐานเสา R_f

2.5.4.2 กรณีที่ 2 ฟิวส์ที่สายล่อฟ้าที่อยู่เหนือสายเฟส ส่วนหนึ่งของกระแสฟิวส์จะไหลลงไปตามเสา ส่วนที่เหลือจะไหลเข้าไปในสายล่อฟ้า กระแสส่วนที่ไหลลงไปตามเสานี้จะไหลไปยังดินที่ฐานของเสาไฟฟ้า ผ่านความต้านทานดินของฐานเสา แล้วสะท้อนกลับไปยังยอดของเสา ทำให้เสาไฟฟ้ามีศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวน คือผลต่างระหว่างแรงดันของเสาไฟฟ้ากับแรงดันของสายเฟส ในกรณีที่ฟิวส์รุนแรง ก็อาจเกิดการแลบข้ามลูกถ้วยกลับไปยังสายเฟสทำให้เกิดเสิร์จในสายเฟสได้

2.5.4.3 กรณีที่ 3 ฟิวส์ลนสู่ดิน เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส เนื่องจากค่าแรงดันเกินที่วัดได้ แทบจะไม่มีโอกาสที่จะมีค่าเกิน 300 kV [12] แรงดันเหนี่ยวนำนี้จึงมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในระดับแรงดันของระบบสายส่ง



รูปที่ 2.15 ตำแหน่งฟิวส์ และการเกิดการชิลด์ลัมเหลวและแลบข้ามกลับ

เนื่องจากในกรณีที่ 3 มีผลไม่รุนแรงเมื่อเทียบกับกรณีอื่นในการวิเคราะห์หาโอกาสที่จะเกิดความผิดปกติจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง จึงพิจารณาจากกรณีฟ้าผ่าลงบนสายเฟสและกรณีฟ้าผ่าลงสู่สายล่อฟ้า

2.5.5 ฟ้าผ่าลงบนสายเฟส

แรงดันเกินบนสายเฟสที่จุดฟ้าผ่าสามารถคำนวณได้จากกระแสฟ้าผ่าและเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเฟส กระแสฟ้าผ่ามีวงจรสมมูลเป็นแหล่งจ่ายกระแส ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ มีโหนดเป็นเสิร์จอิมพีแดนซ์สมมูล ดังนั้นแรงดันเกินที่จุดฟ้าผ่าในรูปที่ 2.16 จึงเป็นตามสมการที่ 2.22

$$E = \frac{I_0 \cdot Z_{eq} \cdot Z_0}{(Z_0 + Z_{eq})} = \frac{I_0}{\left(1 + \frac{Z_{eq}}{Z_0}\right)} \quad (2.22)$$

เมื่อ E คือ แรงดันเกินที่ฟ้าผ่า (kv)

I_0 คือ กระแสฟ้าผ่า (Ka)

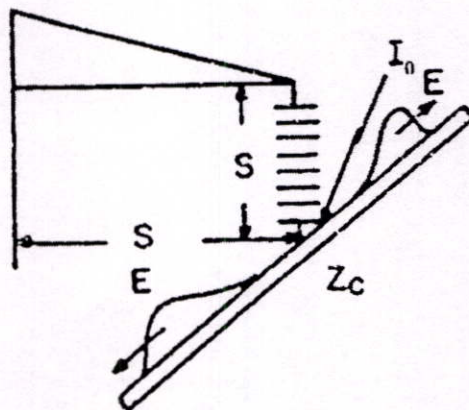
Z_{eq} คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์สมมูล (Ω)

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า (Ω)

ถ้า $Z_0 \gg Z_{eq}$; $V = I_0 Z_{eq}$ และในกรณีนี้ $Z_{eq} = \frac{Z_c}{2}$ ดังนั้นจะได้ตามสมการ 2.23

$$V = \frac{I Z_c}{2} \quad (2.23)$$

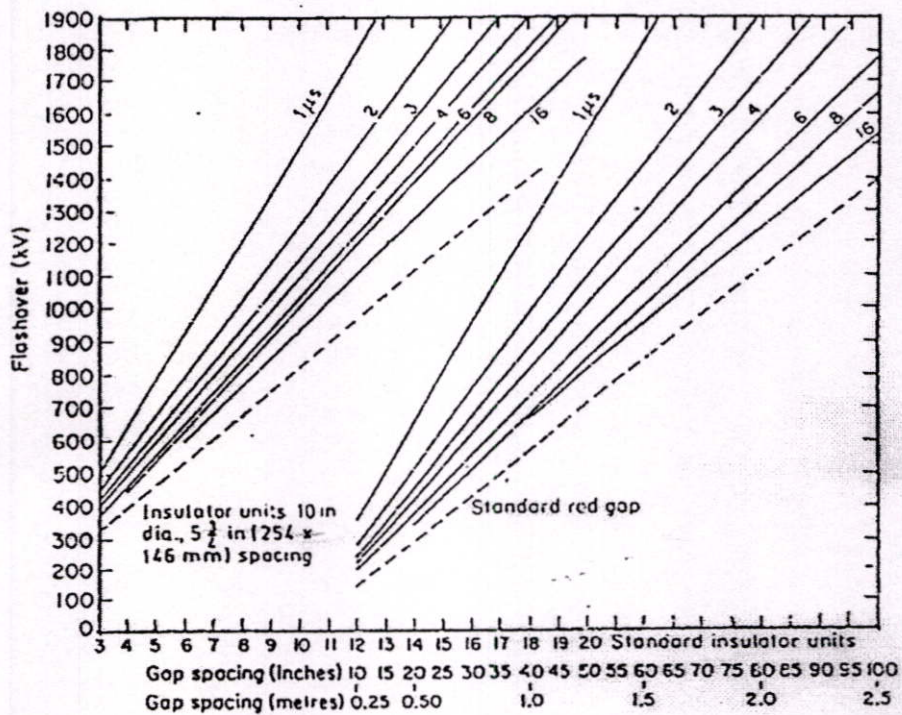
เมื่อ Z_c คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเฟส



รูปที่ 2.16 วงจรของฟ้าผ่าบนสายเฟส

สมการที่ (2.23) แสดงถึงการถ่ายเทพริจของกระแส (I_0) ไปข้างละครึ่งหนึ่ง ทำให้แรงดันเกิน (E) เคลื่อนที่ออกไปทางซ้ายและขวาของสายเฟส แรงดันเกินฟ้าผ่าที่เดินทางมาถึงขั้วลูกด้วยฉนวนที่อยู่ใกล้ตำแหน่งฟ้าผ่า จะเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวน หรือ เบรกควาน์ในแกปอากาศ การติดตั้ง arcing horn ต่อเมื่อแรงดันเกินนั้นมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันวิกฤติที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวลูกด้วยฉนวนหรือเกิดการเบรกควาน์ของแกปอากาศ (critical flashover voltage, CFO) ซึ่งมีค่าดังรูปที่ 2.17 ดังนั้นกระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ทำให้เกิดการแลบข้ามได้จึงหาได้จากสมการที่ 2.24

$$I_c = \frac{2 \cdot CFO}{Z_c} \quad (2.24)$$



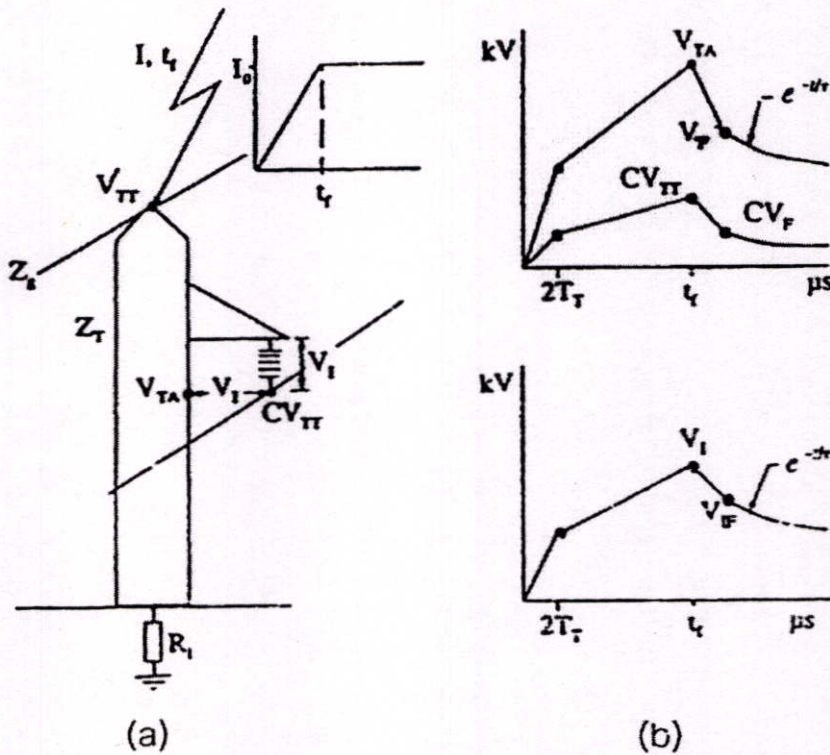
รูปที่ 2.17 แรงดันแลบข้ามลูกด้วยไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.17 เป็นการแสดงแรงดันแลบข้ามลูกด้วยไฟฟ้า (254×146 mm) และช่องว่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรด rod-rod (เวลาบนเส้นกราฟเป็นเวลาที่ใช้ในการเกิดการแลบข้าม แรงดันที่ใช้เป็น อิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s สำหรับเส้นประเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ทุก ๆ กราฟอยู่ที่สภาวะอากาศมาตรฐาน 20°C, 1013 mbar, ความชื้นสัมบูรณ์ 11g/m³)

2.5.6 ฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า

ฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้าทำให้เกิดแรงดันเกินที่ยอดเสา และทำให้เกิดเสิร์จเดินทางแยกเป็น 2 ทาง คือ เดินทางลงไปตามเสา และเดินทางไปตามสายล่อฟ้าทั้ง 2 ด้าน โดยในกรณีแรกจะทำให้เกิดการสะท้อนของเสิร์จที่จุดต่อระหว่างฐานเสากับความต้านทานดินของฐานเสา ส่วนกรณีที่สองจะทำให้เกิดการสะท้อนของเสิร์จที่ยอดเสาต้นถัด ๆ ไป Hileman [9] ได้เสนอกระบวนการคำนวณค่าแรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า โดยพิจารณาหาแรงดันที่ยอดเสา ทั้งในกรณีที่คิดผลของเสิร์จที่สะท้อนที่ฐานเสา และกรณีที่คิดของเสิร์จที่สะท้อนมาจากเสาต้นถัด ๆ ไป

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการแลกเปลี่ยนกลับของเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้า นั้นเกิดขึ้นได้เมื่อแรงดันเกินที่ตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนมีค่าสูงเกินกว่าที่ลูกถ้วยฉนวนจะทนได้ แรงดันเกินที่ตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนดังรูปที่ 2.18 โดยค่าตัวแปรต่างๆ สามารถคำนวณได้ โดยใช้กระบวนการคำนวณ



รูปที่ 2.18 แรงดันที่เสา และแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวน

$$V_{TT} = (K_{SP}K_{TT})I \quad (2.25)$$

$$V_{TA} = (K_{SP}K_{TA})I \quad (2.26)$$

$$V_F = R_e I \quad (2.27)$$

และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานดินของฐานเสาตามสมการที่ 2.27

$$I_R = \frac{R_e}{R_i} I \quad (2.28)$$

เมื่อ
$$K_{TT} = R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_i}$$

$$K_{TA} = R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_A}{t_i} \quad (2.29)$$

$$K_{SP} = 1 - \alpha_R (1 - \alpha_T) \left[1 - 2 \frac{T_S}{t_i} + \alpha_R \alpha_T \left(1 - 4 \frac{T_S}{t_i} \right) + (\alpha_R \alpha_T)^2 \left(1 - 6 \frac{T_S}{t_i} \right) + \dots \right]$$

จากสมการที่ 2.28

$$R_e = \frac{Z_g R_i}{Z_g + 2R_i} \quad \alpha_r = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i} = \frac{Z_g - 2R_i}{Z_g + 2R_i} \quad \alpha_n = \frac{Z_g}{Z_g + 2R_i} \quad (2.30)$$

จากรูปที่ 2.18 ส่วนทางคลื่นของแรงดันอันเป็นผลที่เกิดจากคลื่นสะท้อนจากเสาต้นถัด ๆ ไปจากเสาต้นที่ฟ้าผ่านั้นประมาณได้จากค่าคงที่เวลา τ [9] ตามสมการที่ 2.30

$$\tau = \frac{Z_g}{R_i} T_s \quad (2.31)$$

โดยที่สมการของแรงดันส่วนทางคลื่นนี้คือ

$$E_{TT} = V_F e^{-\frac{(t-t_i)}{\tau}} \quad (2.32)$$

ตัวแปรต่าง ๆ ในรูปที่ 2.18 และสมการ 2.25 - 2.32 มีความหมายดังนี้

- t_f : เวลาค้นคืนของกระแสฟ้าผ่า (μs)
- C : แฟกเตอร์คัปปลิง
- Z_T : เสรีจิมพีแดนซ์ของเสา (Ω)
- Z_G : เสรีจิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้า (Ω)
- T_T : เวลาที่เสด็จเดินทางในเสา (μs)
- T_A : เวลาที่เสด็จเดินทางในเสาไปยังตำแหน่ง A ใด (μs)
- T_S : เวลาที่เสด็จเดินทางในสายล่อฟ้าจากยอดเสาหนึ่งถึงอีกยอดเสาหนึ่ง (μs)
- I_o : ค่ายอดของกระแสฟ้าผ่า (kA)
- I_R : กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานดินของฐานเสาดันที่ถูฟ้าผ่า (kA)
- R_f : ความต้านทานดินของฐานเสา เมื่อมีกระแสเสด็จค่าสูงไหลผ่าน (Ω)
- τ : ค่าคงที่เวลาของหางคลื่น (μs)

แรงดันเสด็จในสายล่อฟ้าเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันเสด็จที่สายเฟส มีค่าเท่ากับค่าแฟกเตอร์คัปปลิง (coupling factor) C คูณกับค่าของแรงดันเสด็จในสายล่อฟ้าในรูปที่ 2.18 แรงดัน V_{TA} เป็นแรงดันบนเสา ที่ตำแหน่ง ซึ่งอยู่ตรงข้ามกับสายเฟสพอดี ดังนั้นแรงดันสูงสุดที่คร่อมลูกถ้วยฉนวน V_I คือ

$$V_I = I_o (K_{TA} - CK_{TT}) K_{SP} \quad (2.33)$$

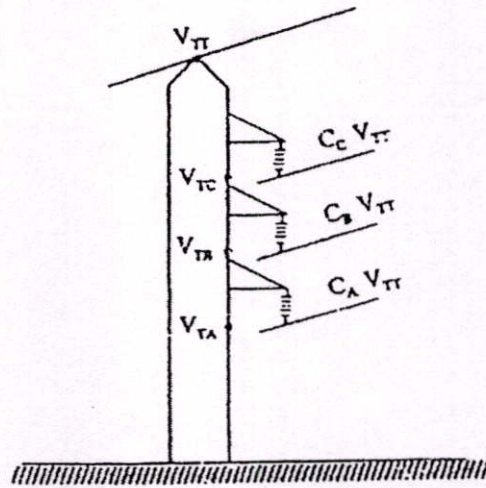
โดยค่า แฟกเตอร์คัปปลิงสามารถหาได้จากภาคผนวก ข

เมื่อพิจารณาสายทั้ง 3 เฟส ที่มีแฟกเตอร์คัปปลิงของเฟส A,B และ C เป็น C_A, C_B และ C_C ตามลำดับดังรูปที่ 2.19 จะได้แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนของทั้ง 3 เฟส เป็น

$$V_{IA} = (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP} I$$

$$V_{IB} = (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP} I \quad (2.34)$$

$$V_{IC} = (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP} I$$



รูปที่ 2.19 สายส่ง 3 เฟสที่มีแฟกเตอร์คัปปลิงและแรงดันยอดเสาแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาแรงดันของระบบสายส่ง ถ้าให้แรงดันเฟสค่ายอดคือ V_{LN} จะได้

$$\begin{aligned} V_{IA} &= (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin(\omega t) \\ V_{IB} &= (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ V_{IC} &= (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.35)$$

ถูกด้วยฉนวนจะทนต่อแรงดันเกินไม่ได้เมื่อแรงดันคร่อมถูกด้วยฉนวนมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ CFO ของฉนวน

2.6 อัตราการวับไฟตามผิวย้อนกลับ (Back flashover Rate)

ในระบบสายส่งจะมีเสาเพื่อใช้ในการพาดผ่านของสายส่งและสายล่อฟ้าเป็นช่วงๆ ซึ่งในแต่ละช่วงอาจจะมีค่าความต้านทานดินแตกต่างกัน สมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการวับไฟตามผิวย้อนกลับ ได้จากความสัมพันธ์ของสถิติกระแสฟ้าผ่าที่เกินค่ากระแสวิกฤตและความหนาแน่นฟ้าผ่าที่ผ่าลงระบบสายส่ง [6] ที่มีผลในแต่ละระยะของช่วงเสาส่งตามสมการ 2.36

$$BFR = N_L P(I) \quad (2.36)$$

เมื่อ $P(I)$ คือ ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามีค่าเกินกว่ากระแสวิกฤต
 N_L คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่งต่อระยะทาง

ในการคำนวณหาค่าอัตราการรวมไฟตามผิวย้อนกลับ ในแต่ละช่วงเสาส่งแล้วยังสามารถคำนวณหาค่ารวมอัตราการรวมไฟตามผิวย้อนกลับโดยเฉลี่ย ตามระยะทางโดยรวมในแต่ละระยะที่ต้องการตามสมการ 2.37

$$BFR = \frac{\Sigma BFR_n L_n}{\Sigma L_n} \quad (2.37)$$

เมื่อ BFR คือ ค่า BFR รวมโดยเฉลี่ย
 BFR_n คือ ค่า BFR ของสายช่วงที่ n
 L_n คือ ค่าความยาวสายช่วงที่ n

บทที่ 3

โปรแกรมและแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1 บทนำ

การหาค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ระยะห่างการปักเสาพาดสายไฟฟ้าและค่าความต้านทานดินที่ฐานเสา จากค่ากระแสฟ้าผ่า ในกรณีที่ฟ้าผ่าลงที่สายดินบนยอดเสาส่งด้วยโปรแกรม ATP-EMTP แบบจำลองต่างๆ การวิเคราะห์สภาวะทรานเซียนต์ของ EMTP ทำในโดเมนเวลา ทำให้สามารถนำผลมาใช้ในการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการได้ โดยคำนวณผ่าน TACS หรือ MODELS ก็ได้ หรืออาจสร้างองค์ประกอบจำลองจากแบบต่างๆ ซึ่ง TACS และ MODELS มีหลักการทำงานและความสามารถดังนี้

3.1.1 TACS

TACS ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นองค์ประกอบจำลองแบบบล็อกไดอะแกรม โดยผู้ใช้งานสามารถนำฟังก์ชันสำเร็จรูปที่มีการสร้างเอาไว้ใน EMTP อยู่แล้วมาประกอบกันเพื่อใช้ได้ทันที แต่จะถูกจำกัดอยู่ที่ไม่ได้รับการออกแบบมาเพื่อสร้างอัลกอริทึม จึงค่อนข้างลำบากในการออกแบบวงจรควบคุมในลักษณะที่ต้องใช้อัลกอริทึมที่ซับซ้อน

3.1.2 MODELS

MODELS เป็นภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม ที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ร่วมงานกับงานซิมูเลชันที่ใช้กับโดเมนเวลา ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและมีความซับซ้อนสูง ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อ

3.1.2.1 ใช้เป็นเครื่องมือในการพัฒนาแบบจำลองของวงจรไฟฟ้าหรือวงจรควบคุมที่ไม่สามารถสร้างได้โดยง่ายด้วยองค์ประกอบที่มีอยู่แล้วใน EMTP และ TACS

3.1.2.2 มีความยืดหยุ่นในการใช้เป็นภาษาในการเขียนโปรแกรมอย่างสมบูรณ์ โดยไม่ต้องติดต่อกับ EMTP อีกในระหว่างกระบวนการคำนวณด้วยโปรแกรม

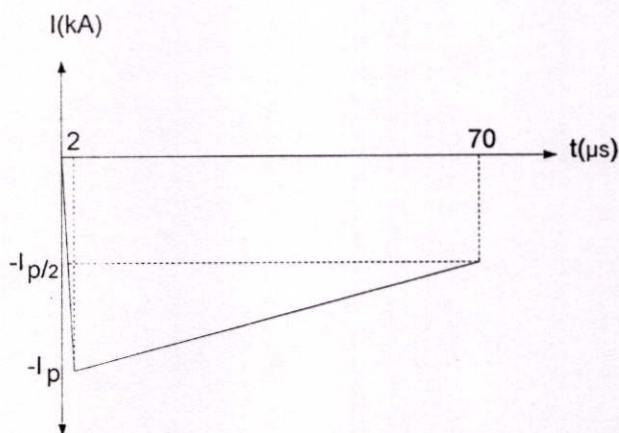
3.1.2.3 สามารถกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าได้

3.1.2.4 เป็นโปรแกรมมาตรฐานที่เป็นตัวเชื่อมต่อกับ EMTP ในรูปของแรงดันกระแสและสัญญาณควบคุม เป็นตัวแปรนำไปใช้ใน MODELS เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่วัดได้จากวงจรไฟฟ้า

3.2 การจำลองอุปกรณ์ต่างๆในระบบ

3.2.1 แบบจำลองเสิร์จฟ้าผ่า

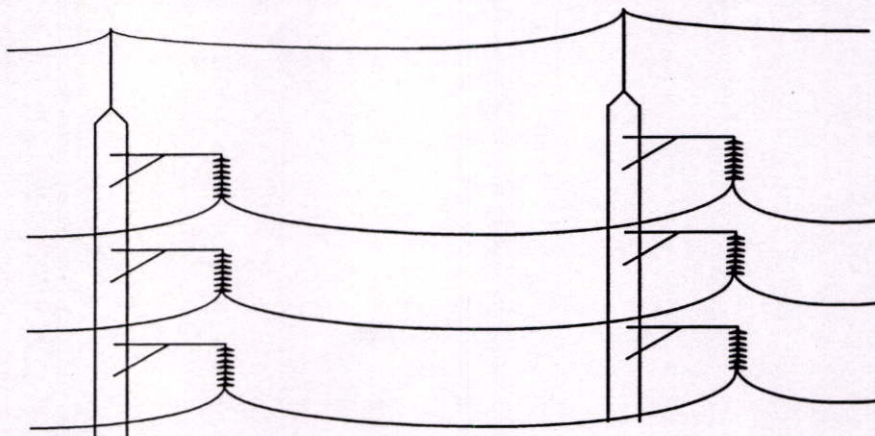
จากการรวบรวมข้อมูลฟ้าผ่า พบว่าประมาณร้อยละ 80 ที่ผ่าลงสู่พื้นโลกเป็นฟ้าผ่าลบ ร้อยละ 20 เป็นฟ้าผ่าบวก [4] ดังนั้นแบบจำลองเสิร์จฟ้าผ่าที่ใช้จึงกำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายกระแส อิมพัลส์ชั่วพล 2 / 70 ไมโครวินาที [20] ต่อขนานอยู่กับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของลําฟ้าผ่าขนาด 400 โอห์ม รูปคลื่นของแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปคลื่นของแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.2 แบบจำลองสายส่ง

แบบจำลองสายส่งที่ใช้เป็นแบบจำลองพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ของ J. Marti จำลองสายส่งวงจรวจรเดี่ยววางตัวเรียงกันในแนวดิ่ง ประกอบด้วยสายเฟส 3 เส้น และสายล่อฟ้า 1 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยแต่ละช่วงความยาวสาย สามารถคำนวณหาความถี่ได้จากสมการที่ 3.1 [13]



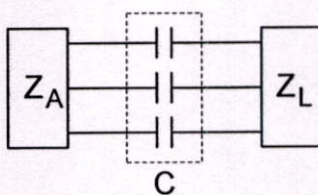
รูปที่ 3.2 การจัดวางสายเฟสวงจรวจรเดี่ยวและสายล่อฟ้าของระบบ 115 kV

$$f = \frac{3 \times 10^8}{4l_{Line}} \quad (3.1)$$

เมื่อ l_{Line} คือ ความยาวสาย (m)

ซึ่งแบบจำลองสายส่งและคอนที่ใช้ในการศึกษา [14] ดังแสดงในรูปที่ 3.3

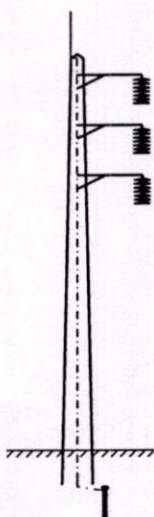
เมื่อ Z_A คือ แบบจำลองของคอน (Ω)
 Z_L คือ แบบจำลองของสาย (Ω)
 C คือ แบบจำลองของลูกถ้วย (F)



รูปที่ 3.3 แบบจำลองสายส่งและคอนที่ใช้ในการศึกษา

3.3.3 แบบจำลองเสาไฟฟ้า

ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กำหนดใช้เสาคอนกรีตที่มีความสูง 22 เมตร สายล่อฟ้าจะทำการต่อลงดิน โดยผ่านสายตัวนำลงดินที่ฝังในเสาคอนกรีตลงไปยังระบบบรากสายดิน ตัวนำลงดินจะเป็นโลหะทองแดงชนิดแท่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.016 เมตร มีความยาว 2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างเสาและการต่อลงดินของระบบ 115 kV

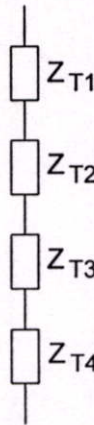
การหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีตหาได้จากสมการที่ 3.2 แยกเป็นส่วนๆ ตามความยาว [14] ดังแสดงในรูปที่ 3.5

$$Z_{Tk} = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h_k}{r_{ck}} - 2 \right) \quad (3.2)$$

เมื่อ	Z_{Tk}	คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาแต่ละช่วง (Ω)
	h_k	คือ ความสูงของเสาคอนกรีตแต่ละช่วงถึงพื้นดิน (m)
	r_{ck}	คือ รัศมีของเสาแต่ละช่วง (m)

$$r_{ek} = r_T^{1/3} r_B^{2/3}$$

เมื่อ	r_T	คือ รัศมียอดเสา (m)
	r_B	คือ รัศมีฐานเสา (m)



รูปที่ 3.5 แบบจำลองเสาที่ใช้ในการศึกษา

3.3.4 แบบจำลองฉนวนลูกถ้วย

ในการศึกษาการแพร่กระจายของคลื่น ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบมีผลต่อรูปร่างของคลื่น โดยเฉพาะคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นที่เร็วมาก [15] ซึ่งการเพิ่มสมรรถนะในการป้องกันระบบต่อแรงดันเกินฟ้าผ่าอย่างหนึ่งคือ การใช้จำนวนลูกถ้วยที่เหมาะสมจะทำให้อัตราการเกิดวาวไฟตามผิวลดลงได้สำหรับระบบ 115 kV ตามมาตรฐาน IEEE 1243-1997 [16] ได้แนะนำให้ใช้

ลูกถ้วยแขวนมาตรฐาน 146 มม. แบบ 52-3 และ 52-8 จำนวน 7-9 ลูกถ้วย แต่ละลูกถ้วยมีค่าพิทักแรงดันวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก เท่ากับ 125 kV แสดงในตารางที่ 3.1

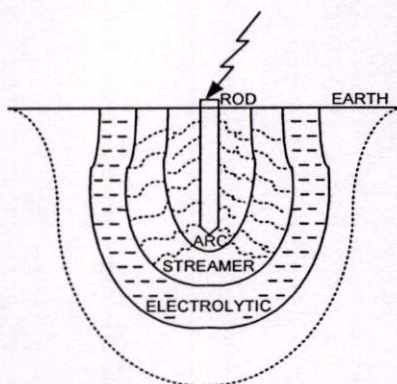
ตารางที่ 3.1 ระดับแรงดันสูงสุดที่พวงลูกถ้วยรับได้

จำนวน ลูกถ้วย	แรงดันที่ รับได้ (เปอร์ยูนิต)	แรงดันที่ รับได้ (กิโลโวลต์)	จำนวน ลูกถ้วย	แรงดันที่ รับได้ (เปอร์ยูนิต)	แรงดันที่ รับได้ (กิโลโวลต์)
1	1	125	6	4.856	606.99
2	1.7967	224.58	7	5.6182	702.27
3	2.5657	320.71	8	6.3802	797.53
4	3.3303	416.28	9	7.1421	892.77
5	4.0934	511.68	10	7.904	988.00

3.3.5 แบบจำลองความต้านทานดินที่ฐานเสาไฟฟ้า [17]

ความต้านทานดินของฐานเสาในสภาวะคงตัวขึ้นอยู่กับรูปแบบของตัวนำที่ต่ลงดิน และคุณสมบัติของดินโดยรอบ แต่ในกรณีของกระแสฟ้าผ่านั้น ค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงก่อนจะเข้าสู่ค่าที่สภาวะคงตัว นอกจากนี้ถ้ากระแสมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดการเบรคดาวนภายในดิน ลักษณะการไหลของกระแสในดินจะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่สภาวะคงตัวเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แบบจำลองที่สร้างขึ้นจึงเป็นแบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่และขึ้นกับค่ากระแสหรือแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้น

3.3.5.1 ความต้านทานดินในกรณีกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า [9] กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาไฟฟ้าโดยตรง กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะไหลผ่านรากสายดินลงดิน ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นรอบๆ รากสายดินโดยแปรเปลี่ยนตามเวลา เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของดิน จะทำให้ดินรอบตัวนำเกิดการเบรคดาวน ซึ่งจะเปรียบเสมือนรากสายดินมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานดินในบริเวณนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 อิมพัลส์เบรคดาวนของดินรอบๆ รากสายดิน

เมื่อกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ระบบสายรากดินจะแพร่กระจายไหลในดิน แรงดันที่รากสายดินจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้มีการนำกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นความจุไฟฟ้าของดิน หาได้จากสมการ 3.3 [17,18]

$$C = \frac{\epsilon_r l}{18 \ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \times 10^{-9} \quad (3.3)$$

เมื่อ ϵ_r คือ relative permittivity ของดิน ($\epsilon_r = 10$)

กระแสที่ไหลลงดินโดยผ่านรากสายดิน จะมีผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่รากสายดิน หาได้จากสมการ 3.4

$$L = 2l \cdot \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \times 10^{-7} \quad (3.4)$$

ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ของดิน จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปทรงทางเรขาคณิตของรากสายดิน (ขนาดและความลึก) สภาพความต้านทานของดิน รูปคลื่นและขนาดของกระแสอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความถี่กำลัง หาได้จากสมการ 3.5

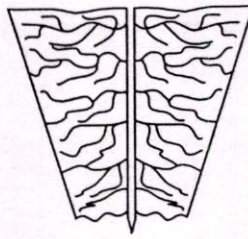
$$R_i = \alpha R_o \quad (3.5)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์อิมพีแดนซ์
 R_i คือ ความต้านทานอิมพีแดนซ์ของดิน

มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ตัวนำลงดินเป็นชนิดแท่ง ความต้านทานดินที่ฐานเสา หาได้จากสมการ 3.6

$$R_o = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (3.6)$$

เมื่อกระแสอิมพีแดนซ์ไหลผ่านรากสายดิน ดินจะเกิดการเบรกดาวน์อย่างไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือจะเกิดการเบรกดาวน์บริเวณใกล้จุดรับกระแสด้านบนมากกว่าบริเวณที่ลึกลงไปในดิน สาเหตุก็เนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำขดขวางการไหลของกระแสฟ้าผ่าลงดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 [19]



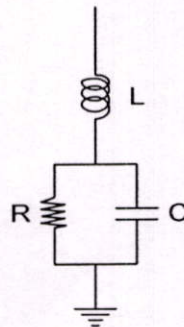
รูปที่ 3.7 การเกิดคิซซาร์จบริเวณรอบๆ รากสายดิน

ดังนั้นสัมประสิทธิ์อิมพัลส์จะมีความสัมพันธ์กับกระแสฟ้าผ่า รูปทรงทางเรขาคณิตของ รากสายดิน และสภาพความต้านทานของดิน หาได้จากสมการ 3.7

$$\alpha = 2.75 \rho^{-0.4} (1.8 + \sqrt{I}) [0.75 - \exp(-1.5 I_m^{-0.2})] \quad (3.7)$$

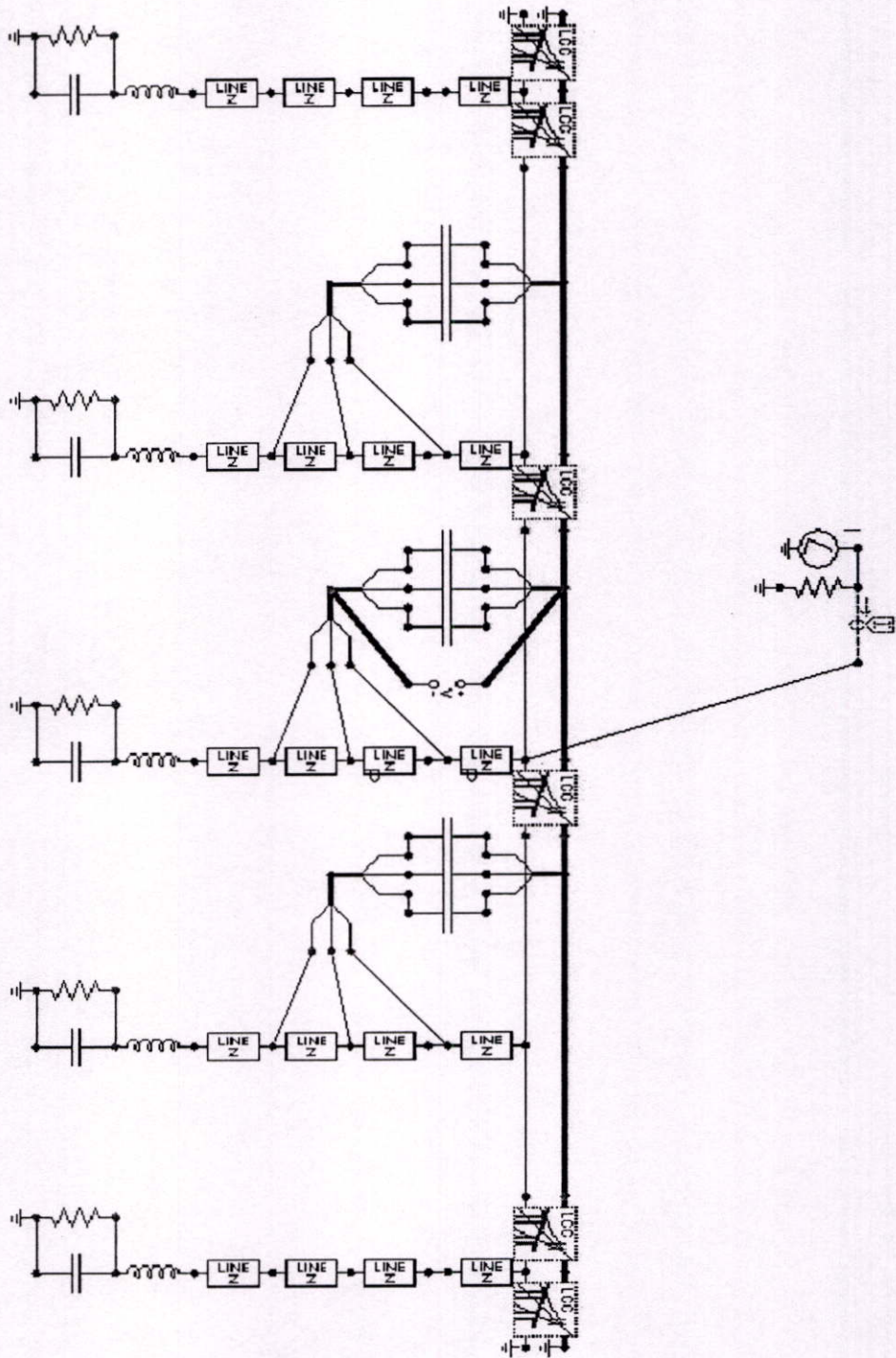
- เมื่อ ρ คือ สภาพความต้านทานดินจำเพาะ ($\Omega - m$)
 I_m คือ กระแสฟ้าผ่า (kA)
 l คือ ความยาวรากสายดิน (m)

โดยทั่วไปค่าความต้านทานดินที่ฐานเสา ได้จากการวัดในภาคสนามหรือได้จากการคำนวณโดยใช้สูตรตามมาตรฐานนั้น ขึ้นอยู่กับรูปทรงของแท่งตัวนำลงดิน ค่าเหล่านี้เป็นค่าความต้านทานที่ความถี่กำลัง แต่ในความเป็นจริงค่าความต้านทานดินที่ฐานเสาตกลงเมื่อมีกระแสฟ้าผ่า ความถี่สูงไหลผ่านและจากคุณสมบัติของดินโดยรอบ แต่ในกรณีฟ้าผ่า ค่ากระแสฟ้าผ่า ค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงก่อนจะเข้าสู่ค่าที่สภาวะคงตัว นอกจากนี้ถ้ากระแสมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาว์นภายในดิน ลักษณะการไหลของกระแสในดินจะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นแบบจำลองความต้านทานดินที่ฐานเสา ที่สร้างขึ้นจึงเป็นแบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่และกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบจำลองวงจรสมมูลของตัวนำลงดินชนิดขึ้นกับความถี่และกระแส

จากข้อมูลทฤษฎีข้างต้นสามารถนำมาทำการจำลองค่าพารามิเตอร์ ของวงจรส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP – EMTP ดังรูปที่ 3.9



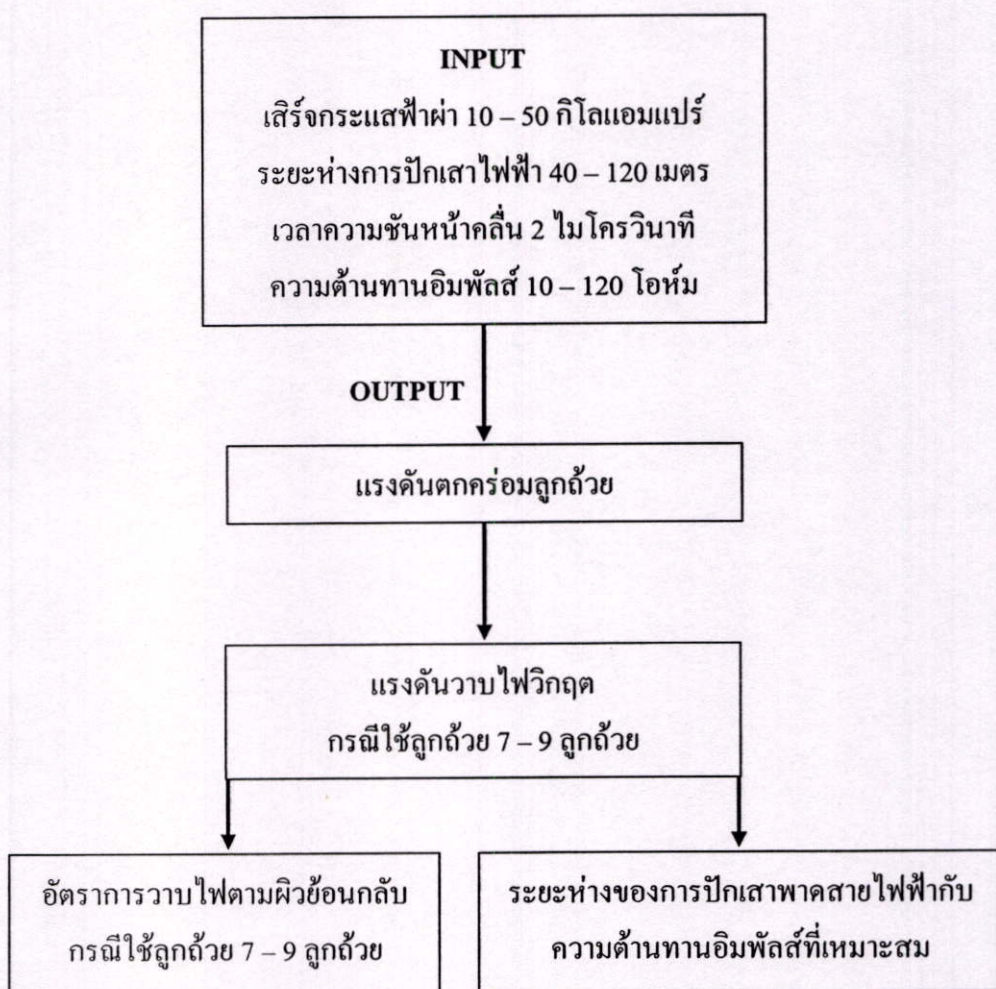
รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง

บทที่ 4

กระบวนการและผลการวิเคราะห์

4.1 กระบวนการวิเคราะห์

กระบวนการวิเคราะห์ของแบบจำลองเสิร์จฟ้าผ่า เวลาหน้าคลื่น ระยะห่างการปกเสาพาดสายไฟฟ้าและความต้านทานอิมพัลส์ที่ฐานเสา เพื่อหาผลแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วย ดังรูปที่ 4.1

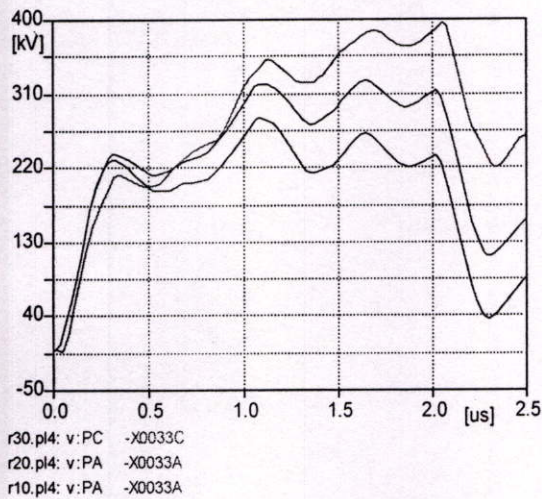


รูปที่ 4.1 ขั้นตอนของการศึกษา

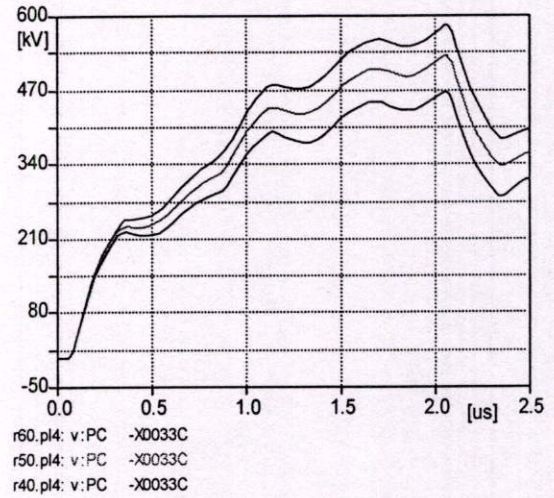
4.2 ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะเห็นว่าระหว่างระยะห่างการปักเสาพาดสาย ค่าความต้านทานอิมพัลส์และจำนวนลูกถ้วยมีผลต่อค่าแรงดันตกคร่อมบนลูกถ้วย ค่าแรงดันวิกฤตวาบไฟตามผิวลูกถ้วยและอัตราการวาบไฟตามผิวลูกถ้วย ซึ่งการหาระยะห่างการปักเสาพาดสาย ค่าความต้านทานอิมพัลส์และจำนวนลูกถ้วยที่เหมาะสม เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยแก้ปัญหาจากการใช้งานจริงที่เกิดขึ้น ในกรณีที่ไม่สามารถทำความต้านทานดินที่ฐานเสาได้ตามมาตรฐาน

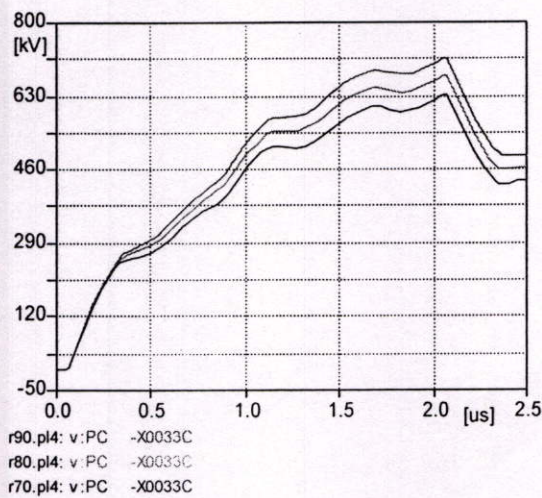
จากรูปที่ 4.2 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 40 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



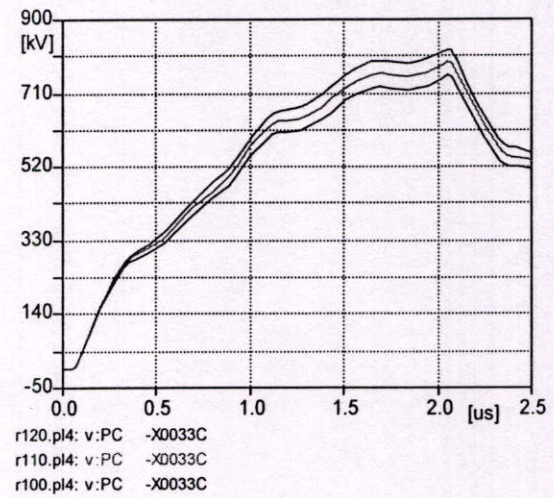
(ก)



(ข)



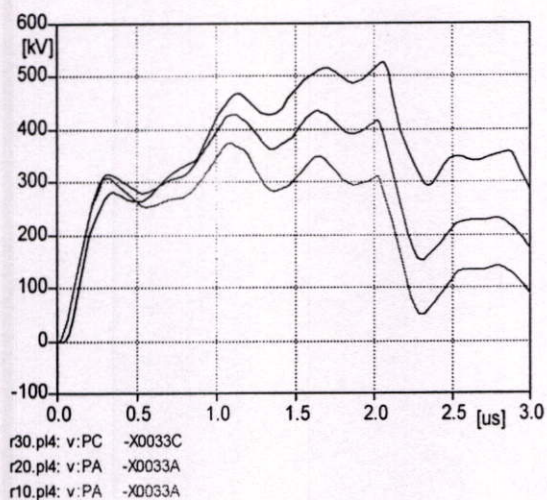
(ค)



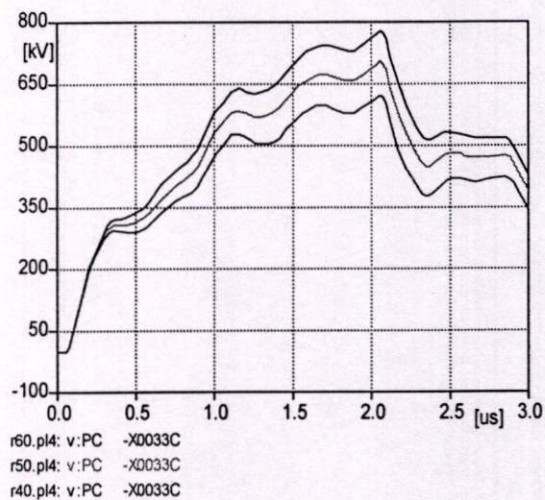
(ง)

รูปที่ 4.2 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 40 เมตร

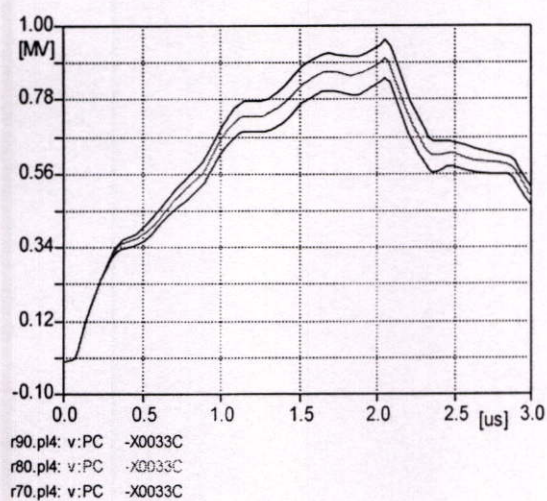
จากรูปที่ 4.3 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 40 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



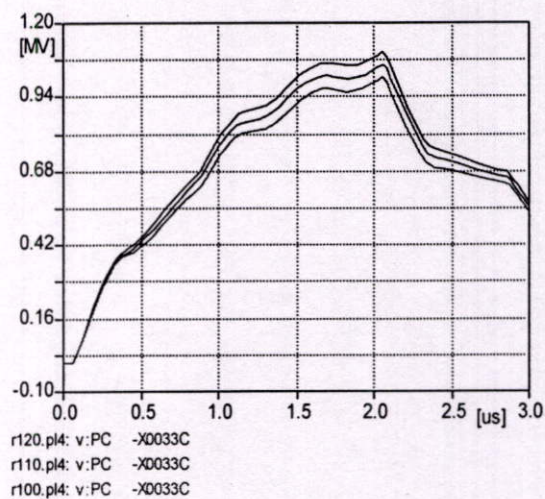
(ก)



(ข)



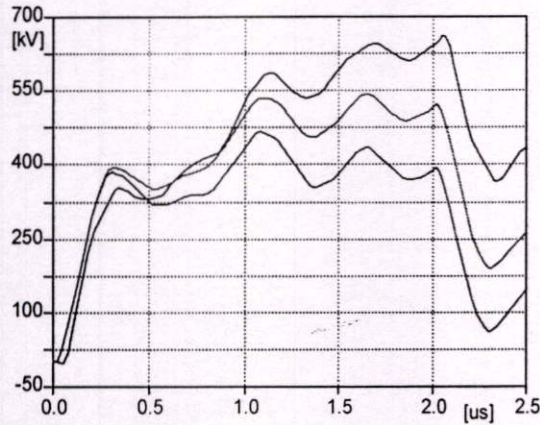
(ค)



(ง)

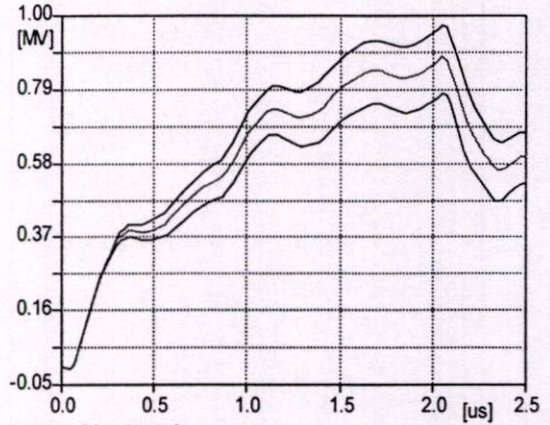
รูปที่ 4.3 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 40 เมตร

จากรูปที่ 4.4 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 40 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



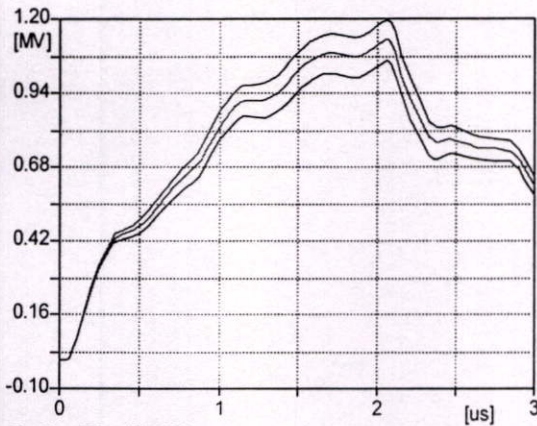
r30.pl4: v:PC -X0033C
r20.pl4: v:PA -X0033A
r10.pl4: v:PA -X0033A

(ก)



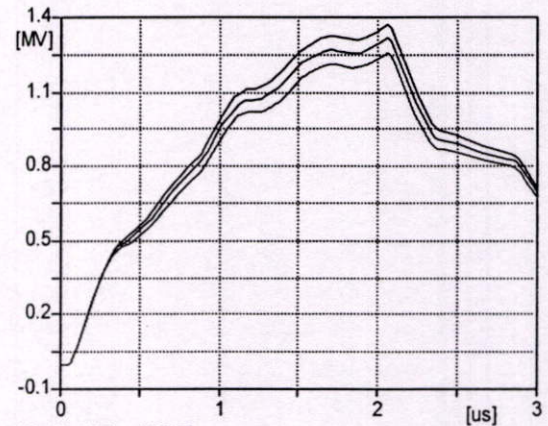
r60.pl4: v:PC -X0033C
r50.pl4: v:PC -X0033C
r40.pl4: v:PC -X0033C

(ข)



r90.pl4: v:PC -X0033C
r80.pl4: v:PC -X0033C
r70.pl4: v:PC -X0033C

(ค)



r120.pl4: v:PC -X0033C
r110.pl4: v:PC -X0033C
r100.pl4: v:PC -X0033C

(ง)

รูปที่ 4.4 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 40 เมตร

จากตารางที่ 4.1 แสดงแรงคั้นตกรวมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์ 10 – 120 โอห์ม ค่ากระแส ฟิวส์ 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ของการปิกเสापาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 40 เมตร

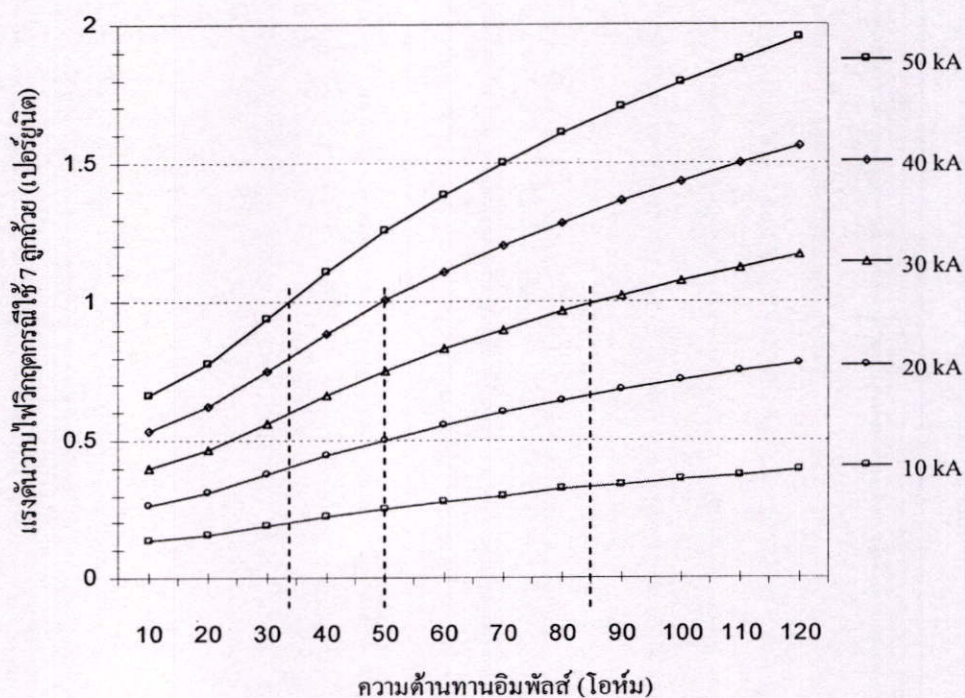
ตารางที่ 4.1 ค่าแรงคั้นตกรวมลูกถ้วย ของการปิกเสापาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 40 เมตร

ความต้านทาน อิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟิวส์ (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	93,328	186,655	279,983	373,311	466,639
20	108,803	217,606	326,409	435,212	544,015
30	131,947	263,894	395,841	527,788	659,735
40	155,532	311,064	466,597	622,129	777,661
50	176,185	352,370	528,555	704,740	880,924
60	194,499	388,998	583,497	777,996	972,495
70	210,919	421,838	632,756	843,675	1,054,590
80	225,778	451,557	677,335	903,114	1,128,890
90	239,331	478,662	717,993	957,324	1,196,650
100	251,775	503,550	755,324	1,007,100	1,258,870
110	263,266	526,532	789,799	1,053,060	1,316,330
120	273,929	547,859	821,788	1,095,720	1,369,650

จากตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.5 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปกเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 40 เมตร

ตารางที่ 4.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.13	0.27	0.40	0.53	0.66
20	0.15	0.31	0.46	0.62	0.77
30	0.19	0.38	0.56	0.75	0.94
40	0.22	0.44	0.66	0.89	1.11
50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
60	0.28	0.55	0.83	1.11	1.38
70	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50
80	0.32	0.64	0.96	1.29	1.61
90	0.34	0.68	1.02	1.36	1.70
100	0.36	0.72	1.08	1.43	1.79
110	0.37	0.75	1.12	1.50	1.87
120	0.39	0.78	1.17	1.56	1.95

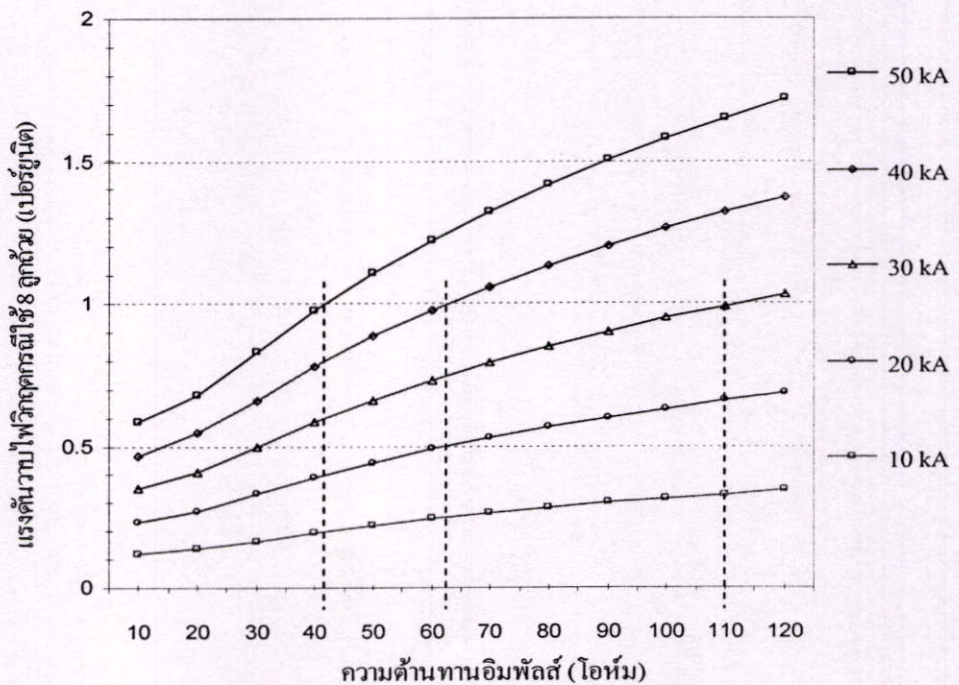


รูปที่ 4.5 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.6 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพีลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 40 เมตร

ตารางที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพีลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.12	0.23	0.35	0.47	0.59
20	0.14	0.27	0.41	0.55	0.68
30	0.17	0.33	0.50	0.66	0.83
40	0.20	0.39	0.59	0.78	0.98
50	0.22	0.44	0.66	0.88	1.10
60	0.24	0.49	0.73	0.98	1.22
70	0.26	0.53	0.79	1.06	1.32
80	0.28	0.57	0.85	1.13	1.42
90	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50
100	0.32	0.63	0.95	1.26	1.58
110	0.33	0.66	0.99	1.32	1.65
120	0.34	0.69	1.03	1.37	1.72

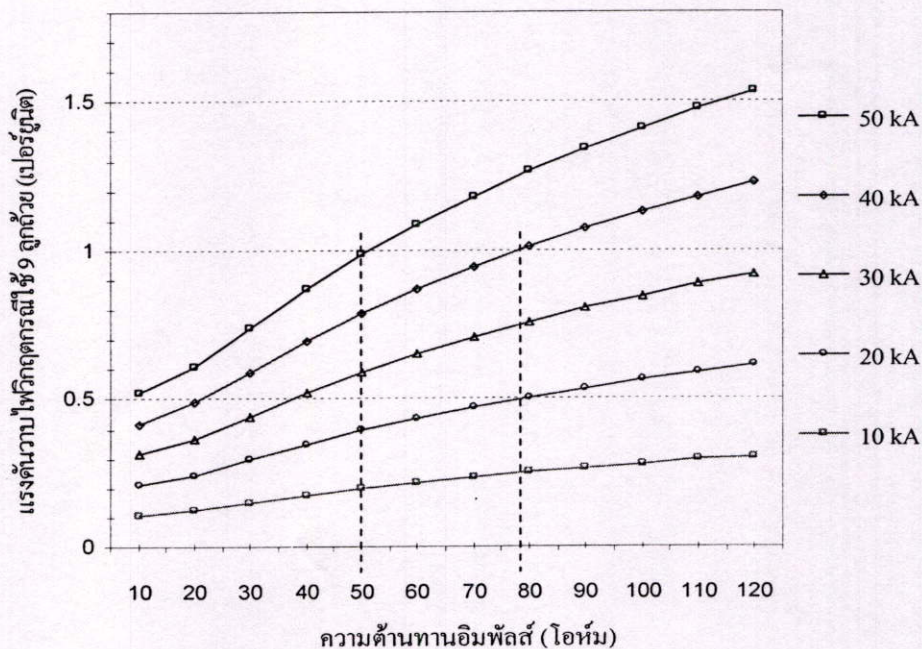


รูปที่ 4.6 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.7 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปกเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 40 เมตร

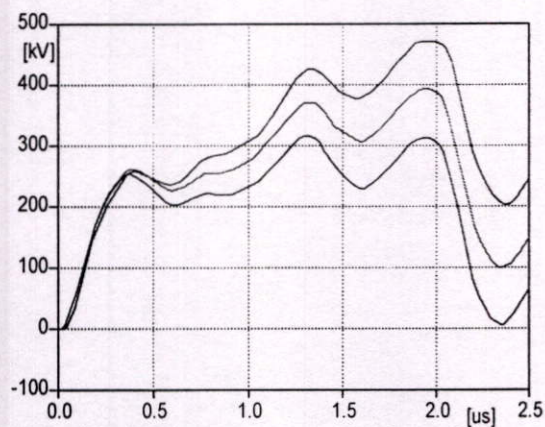
ตารางที่ 4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.10	0.21	0.31	0.42	0.52
20	0.12	0.24	0.37	0.49	0.61
30	0.15	0.30	0.44	0.59	0.74
40	0.17	0.35	0.52	0.70	0.87
50	0.20	0.39	0.59	0.79	0.99
60	0.22	0.44	0.65	0.87	1.09
70	0.24	0.47	0.71	0.95	1.18
80	0.25	0.51	0.76	1.01	1.26
90	0.27	0.54	0.80	1.07	1.34
100	0.28	0.56	0.85	1.13	1.41
110	0.29	0.59	0.88	1.18	1.47
120	0.31	0.61	0.92	1.23	1.53



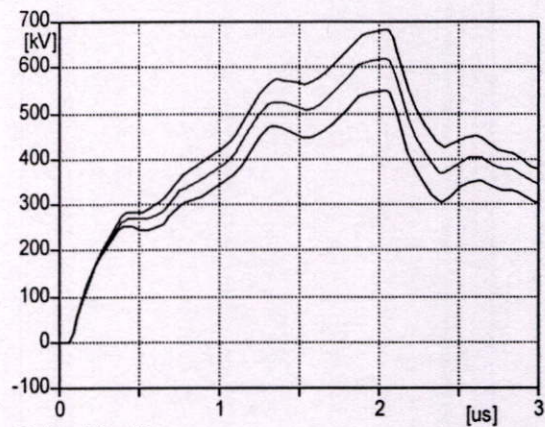
รูปที่ 4.7 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

จากรูปที่ 4.8 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 50 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



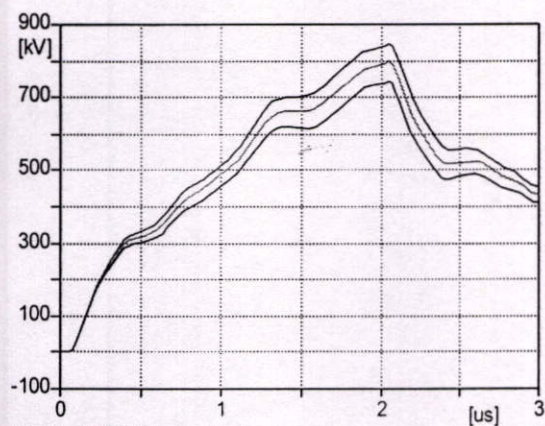
r30.pl4: v:PB -VB
r20.pl4: v:PA -VA
r10.pl4: v:PA -VA

(ก)



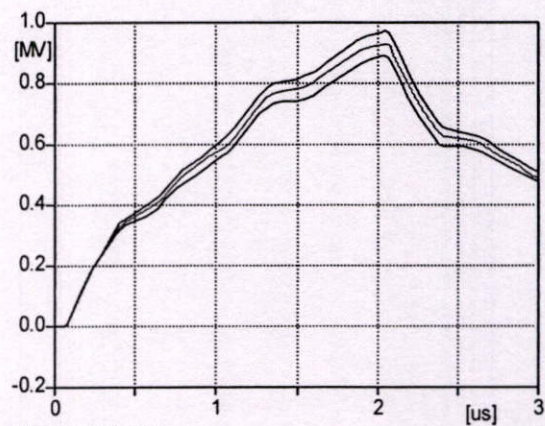
r60.pl4: v:PC -VC
r50.pl4: v:PC -VC
r40.pl4: v:PC -VC

(ข)



r90.pl4: v:PC -VC
r80.pl4: v:PC -VC
r70.pl4: v:PC -VC

(ค)

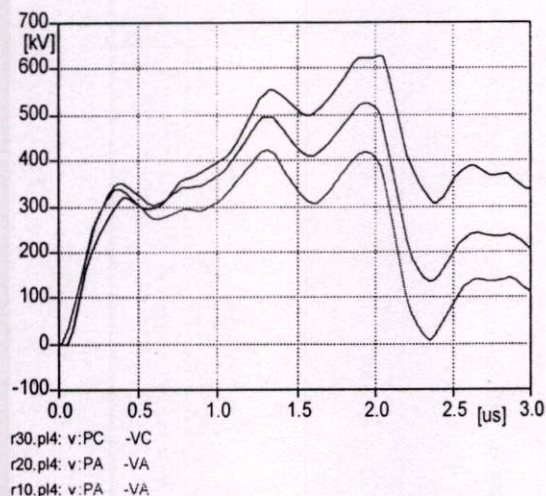


r120.pl4: v:PC -VC
r110.pl4: v:PC -VC
r100.pl4: v:PC -VC

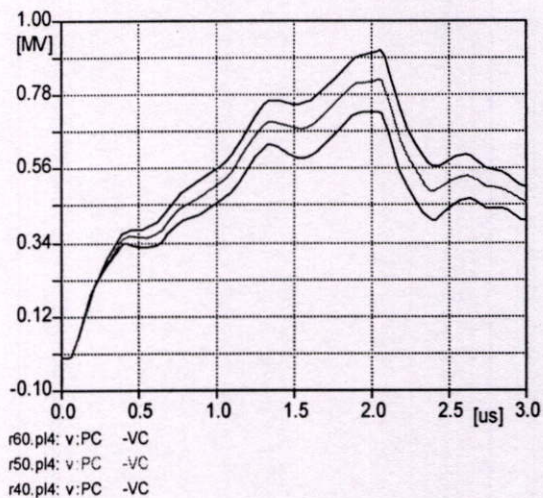
(ง)

รูปที่ 4.8 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 50 เมตร

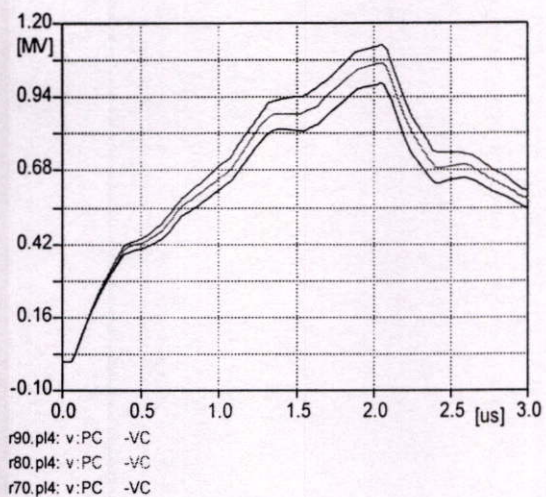
จากรูปที่ 4.9 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 50 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



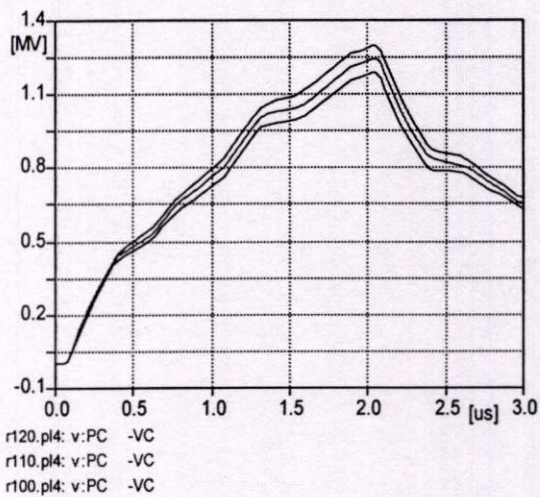
(ก)



(ข)



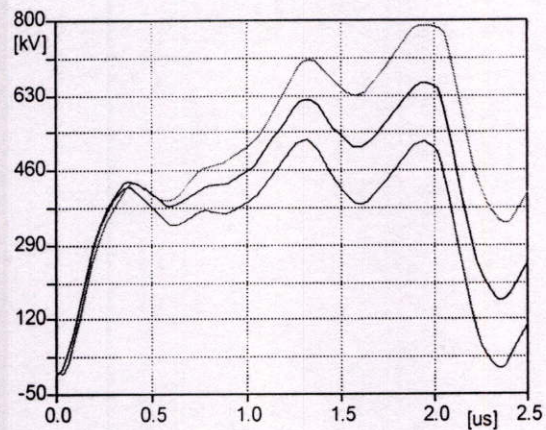
(ค)



(ง)

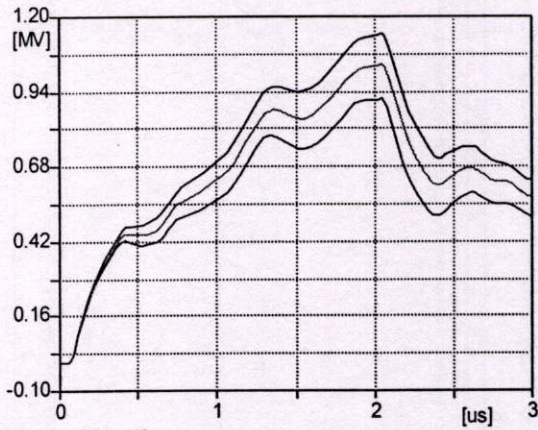
รูปที่ 4.9 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 50 เมตร

จากรูปที่ 4.10 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 50 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



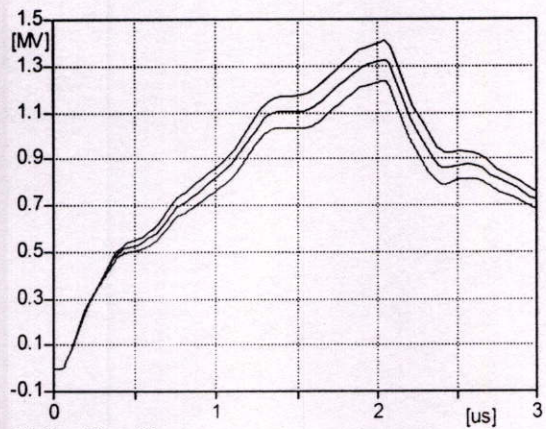
r30.pl4: v:PB -VE
r20.pl4: v:PA -VA
r10.pl4: v:PA -VA

(ก)



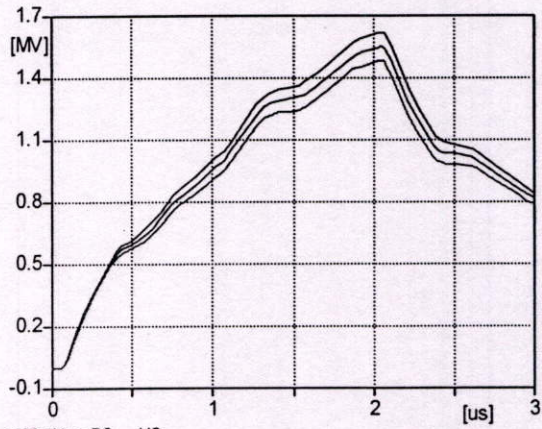
r60.pl4: v:PC -VC
r50.pl4: v:PC -VC
r40.pl4: v:PC -VC

(ข)



r90.pl4: v:PC -VC
r80.pl4: v:PC -VC
r70.pl4: v:PC -VC

(ค)



r120.pl4: v:PC -VC
r110.pl4: v:PC -VC
r100.pl4: v:PC -VC

(ง)

รูปที่ 4.10 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 50 เมตร

จากตารางที่ 4.5 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์ 10 – 120 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ของการปิกเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 50 เมตร

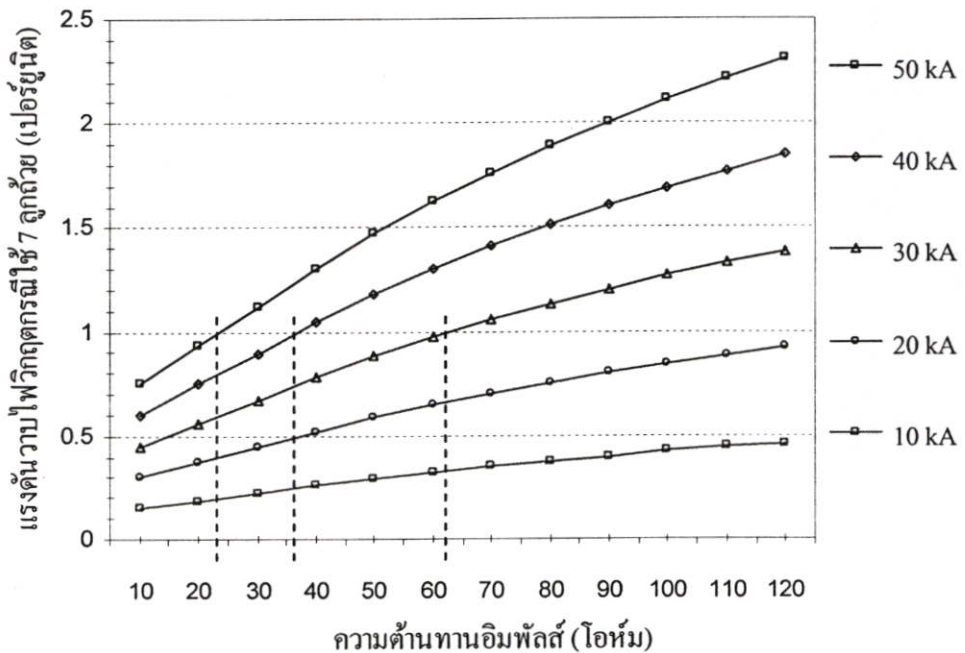
ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ของการปิกเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 50 เมตร.

ความต้านทาน อิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	105,501	211,001	316,502	422,003	527,504
20	131,571	263,143	394,714	526,285	657,857
30	157,465	314,931	472,396	629,861	787,327
40	183,051	366,101	549,152	732,202	915,253
50	206,695	413,389	620,084	826,779	1,033,470
60	228,003	456,005	684,008	912,010	1,140,010
70	247,382	494,765	742,147	989,529	1,236,910
80	265,156	530,312	795,468	1,060,620	1,325,780
90	281,582	563,163	844,745	1,126,330	1,407,910
100	296,844	593,688	890,532	1,187,380	1,484,220
110	311,100	622,199	933,299	1,244,400	1,555,500
120	324,474	648,948	973,422	1,297,900	1,622,370

จากตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.11 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 50 เมตร

ตารางที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75
20	0.19	0.37	0.56	0.75	0.94
30	0.22	0.45	0.67	0.90	1.12
40	0.26	0.52	0.78	1.04	1.30
50	0.29	0.59	0.88	1.18	1.47
60	0.32	0.65	0.97	1.30	1.62
70	0.35	0.70	1.06	1.41	1.76
80	0.38	0.76	1.13	1.51	1.89
90	0.40	0.80	1.20	1.60	2.00
100	0.42	0.85	1.27	1.69	2.11
110	0.44	0.89	1.33	1.77	2.21
120	0.46	0.92	1.39	1.85	2.31

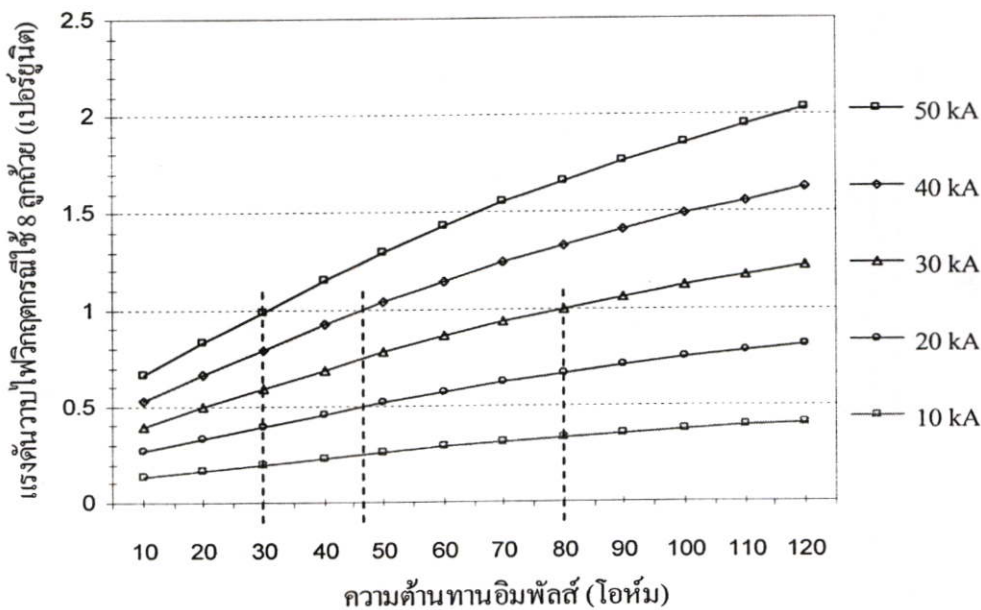


รูปที่ 4.11 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.12 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 50 เมตร

ตารางที่ 4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.13	0.26	0.40	0.53	0.66
20	0.16	0.33	0.49	0.66	0.82
30	0.20	0.39	0.59	0.79	0.99
40	0.23	0.46	0.69	0.92	1.15
50	0.26	0.52	0.78	1.04	1.30
60	0.29	0.57	0.86	1.14	1.43
70	0.31	0.62	0.93	1.24	1.55
80	0.33	0.66	1.00	1.33	1.66
90	0.35	0.71	1.06	1.41	1.77
100	0.37	0.74	1.12	1.49	1.86
110	0.39	0.78	1.17	1.56	1.95
120	0.41	0.81	1.22	1.63	2.03

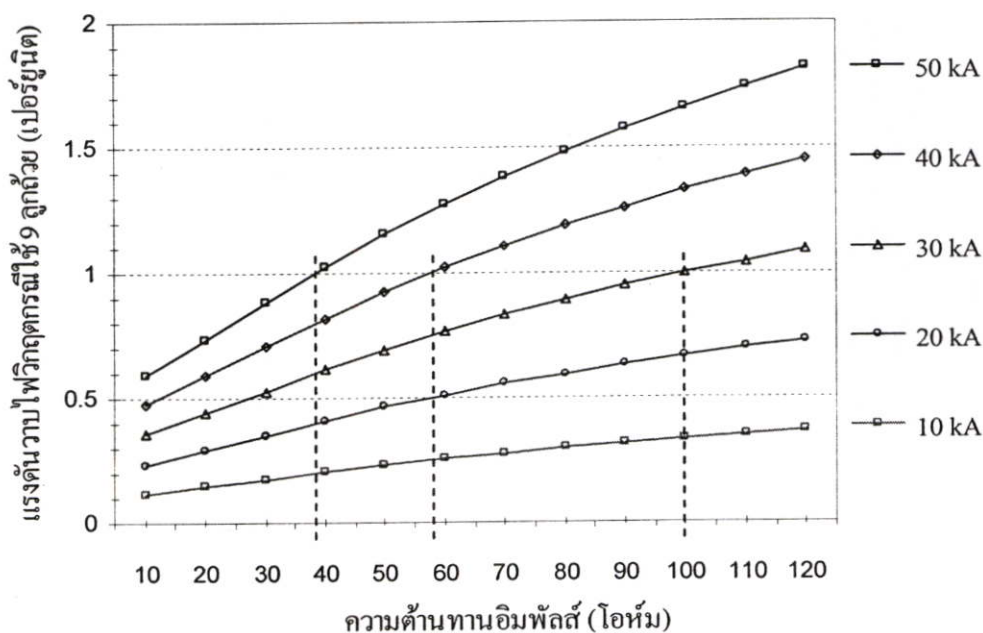


รูปที่ 4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.13 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 50 เมตร

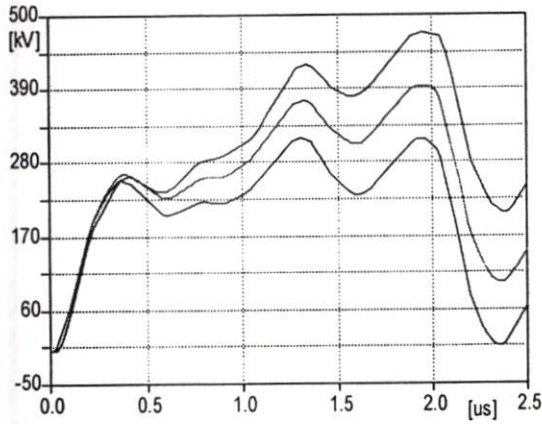
ตารางที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.12	0.24	0.35	0.47	0.59
20	0.15	0.29	0.44	0.59	0.74
30	0.18	0.35	0.53	0.71	0.88
40	0.21	0.41	0.62	0.82	1.03
50	0.23	0.46	0.69	0.93	1.16
60	0.26	0.51	0.77	1.02	1.28
70	0.28	0.55	0.83	1.11	1.39
80	0.30	0.59	0.89	1.19	1.49
90	0.32	0.63	0.95	1.26	1.58
100	0.33	0.66	1.00	1.33	1.66
110	0.35	0.70	1.05	1.39	1.74
120	0.36	0.73	1.09	1.45	1.82



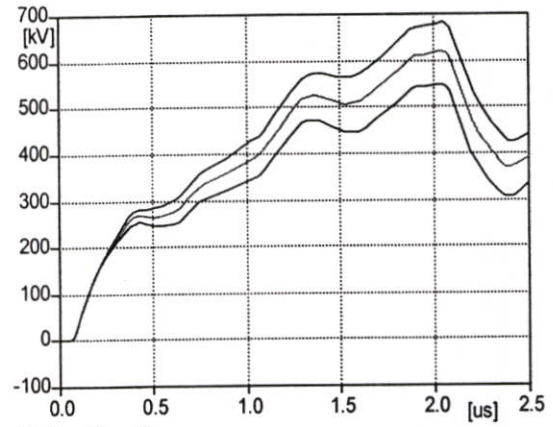
รูปที่ 4.13 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

จากรูปที่ 4.14 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 60 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



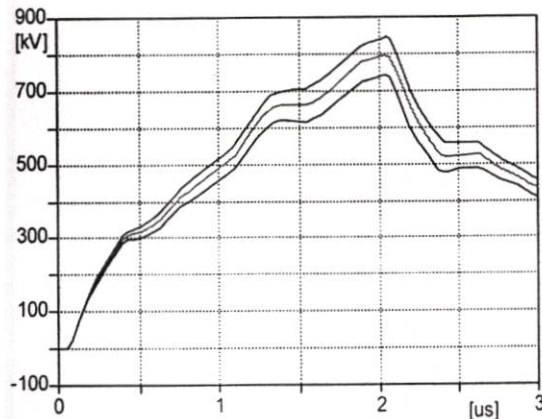
r30.pl4: v:PB -VB
r20.pl4: v:PA -VA
r10.pl4: v:PA -VA

(ก)



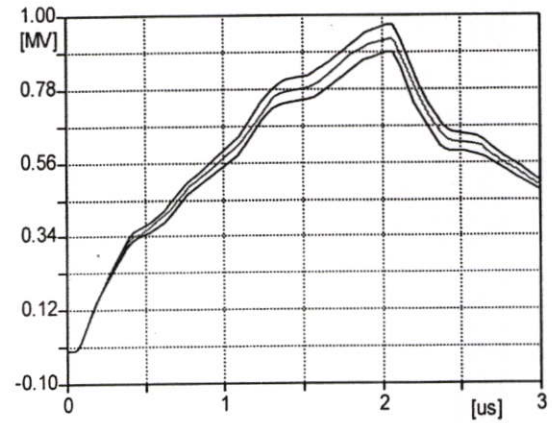
r60.pl4: v:PC -VC
r50.pl4: v:PC -VC
r40.pl4: v:PC -VC

(ข)



r90.pl4: v:PC -VC
r80.pl4: v:PC -VC
r70.pl4: v:PC -VC

(ค)

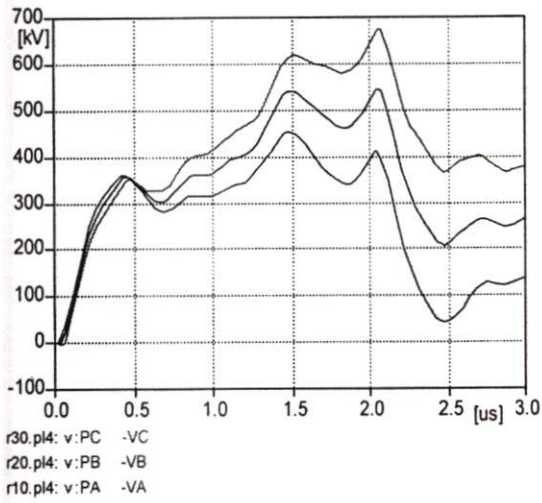


r120.pl4: v:PC -VC
r110.pl4: v:PC -VC
r100.pl4: v:PC -VC

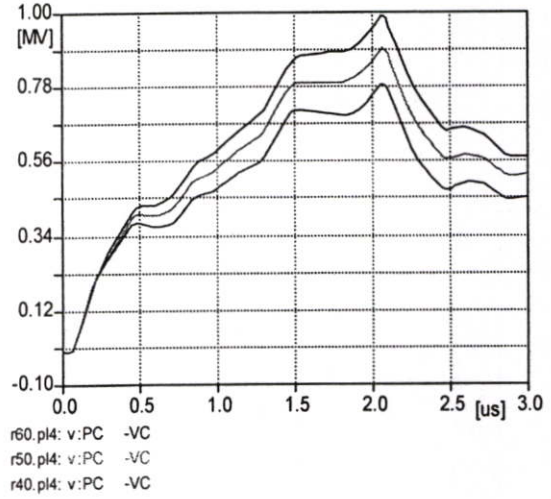
(ง)

รูปที่ 4.14 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 60 เมตร

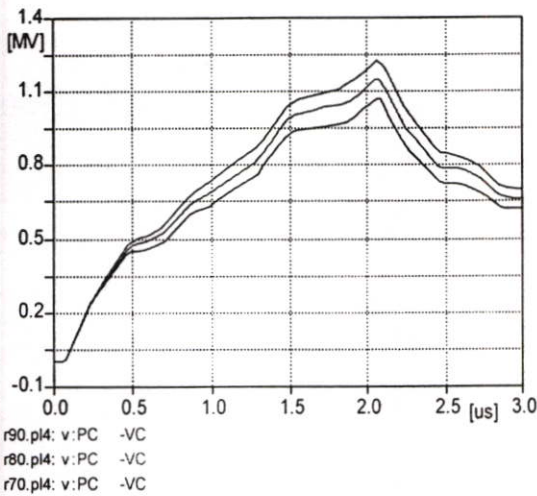
จากรูปที่ 4.15 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปด้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 60 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 – 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



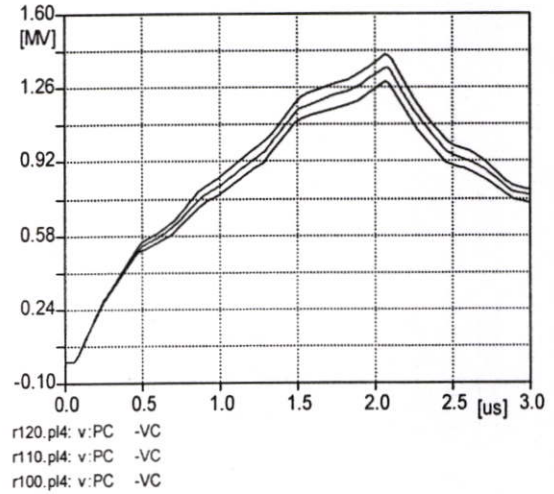
(ก)



(ข)



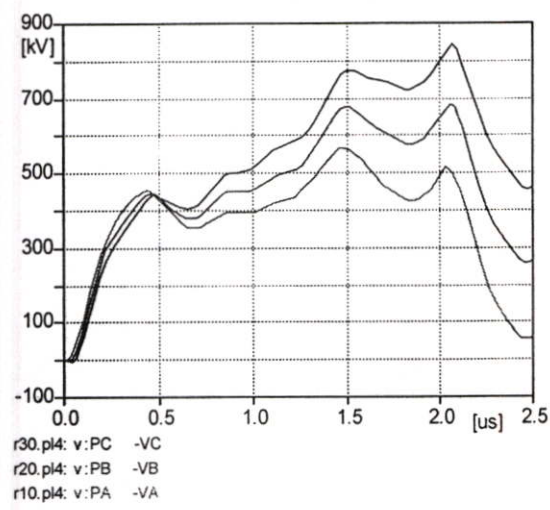
(ค)



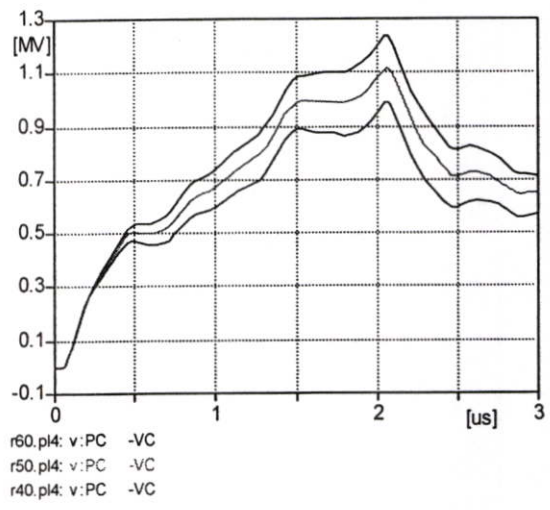
(ง)

รูปที่ 4.15 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 60 เมตร

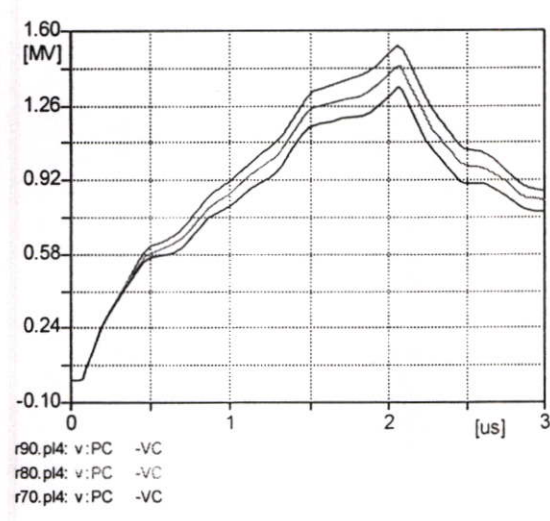
จากรูปที่ 4.16 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 60 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



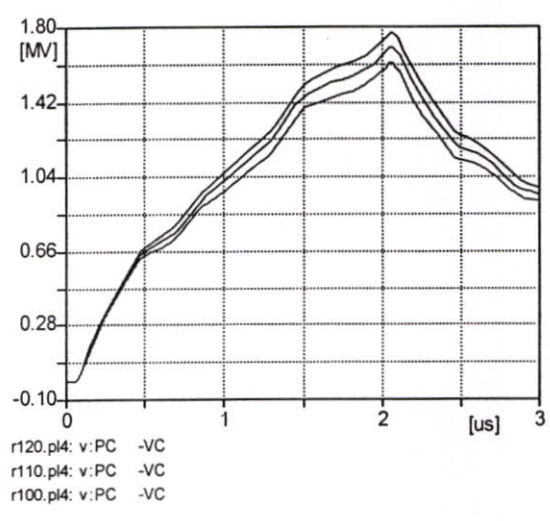
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.16 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 60 เมตร

จากตารางที่ 4.9 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์ 10 – 120 โอห์ม ค่ากระแส ฟิวส์ 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ของการปิกเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 60 เมตร

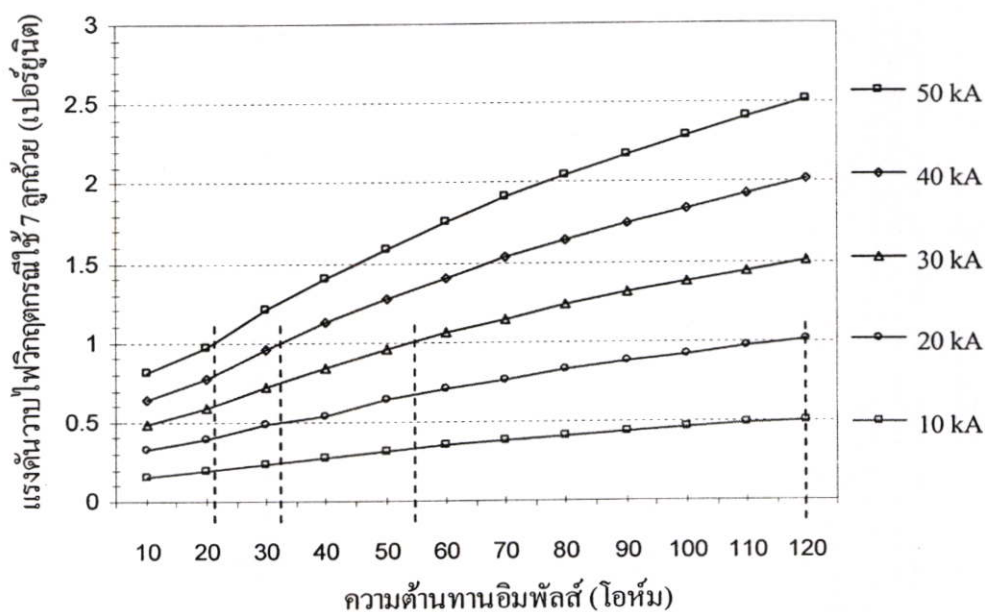
ตารางที่ 4.9 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ของการปิกเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 60 เมตร.

ความต้านทาน อิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟิวส์ (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	113,372	226,745	340,117	453,490	566,862
20	136,521	273,042	409,563	546,084	682,605
30	168,488	336,977	505,465	668,064	842,442
40	197,560	373,038	592,681	790,241	987,801
50	223,530	447,060	670,590	894,120	1,117,650
60	246,971	493,941	740,912	987,883	1,234,850
70	268,321	536,643	804,964	1,073,290	1,341,610
80	287,922	575,845	863,767	1,151,690	1,439,610
90	306,040	612,081	918,121	1,224,160	1,530,200
100	322,887	645,775	968,662	1,291,550	1,614,440
110	338,633	677,265	1,015,900	1,354,530	1,693,160
120	353,413	706,827	1,060,240	1,413,650	1,767,070

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.17 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 60 เมตร

ตารางที่ 4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.16	0.32	0.48	0.65	0.81
20	0.19	0.39	0.58	0.78	0.97
30	0.24	0.48	0.72	0.95	1.20
40	0.28	0.53	0.84	1.13	1.41
50	0.32	0.64	0.95	1.27	1.59
60	0.35	0.70	1.06	1.41	1.76
70	0.38	0.76	1.15	1.53	1.91
80	0.41	0.82	1.23	1.64	2.05
90	0.44	0.87	1.31	1.74	2.18
100	0.46	0.92	1.38	1.84	2.30
110	0.48	0.96	1.45	1.93	2.41
120	0.50	1.01	1.51	2.01	2.52

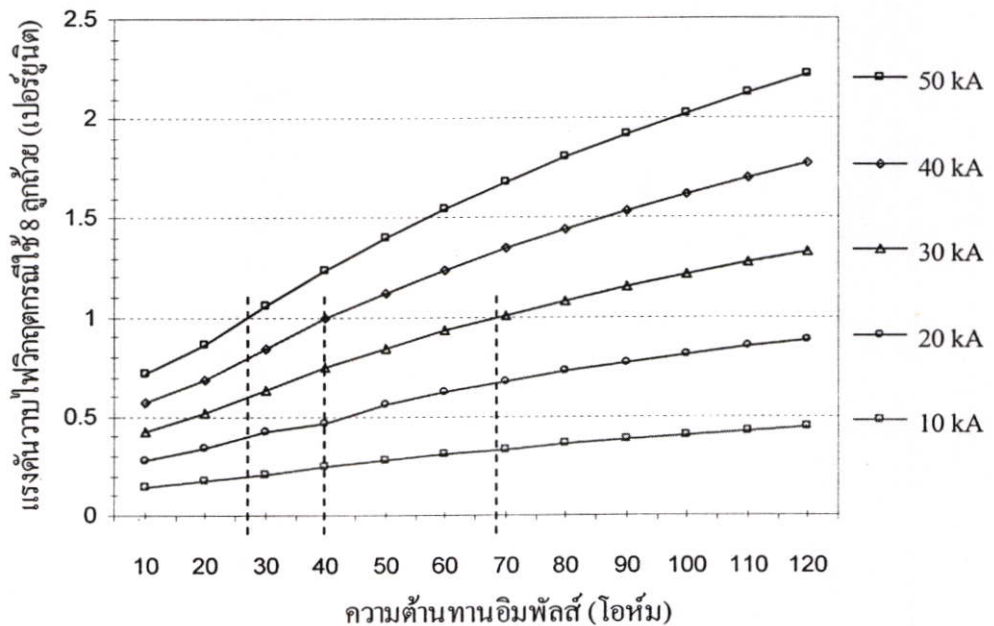


รูปที่ 4.17 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.18 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปกเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 60 เมตร

ตารางที่ 4.11 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.14	0.28	0.43	0.57	0.71
20	0.17	0.34	0.51	0.68	0.86
30	0.21	0.42	0.63	0.84	1.06
40	0.25	0.47	0.74	0.99	1.24
50	0.28	0.56	0.84	1.12	1.40
60	0.31	0.62	0.93	1.24	1.55
70	0.34	0.67	1.01	1.35	1.68
80	0.36	0.72	1.08	1.44	1.81
90	0.38	0.77	1.15	1.53	1.92
100	0.40	0.81	1.21	1.62	2.02
110	0.42	0.85	1.27	1.70	2.12
120	0.44	0.89	1.33	1.77	2.22

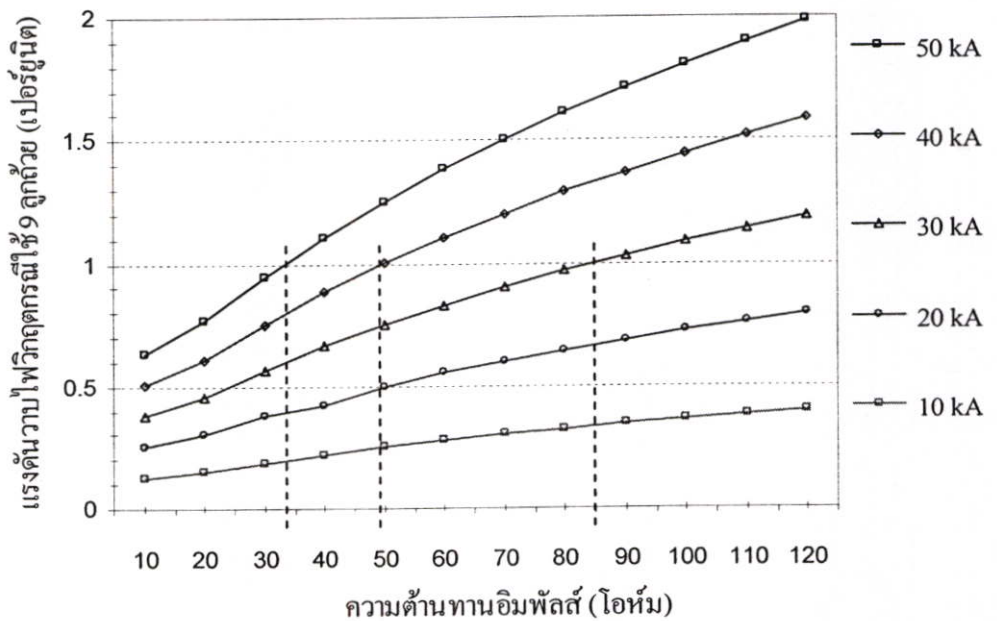


รูปที่ 4.18 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.19 แสดงค่าเปอร์ยูนิตของแรงดันวาบไฟวิกฤต กรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสา พาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 60 เมตร

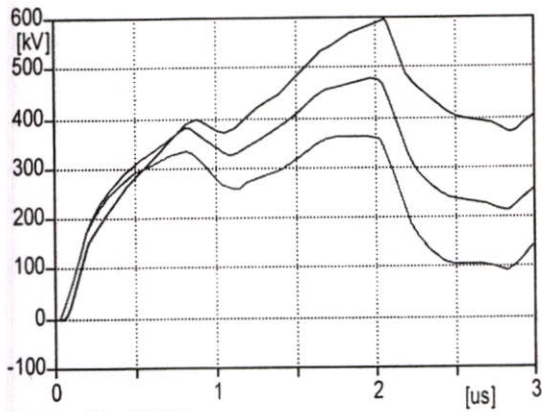
ตารางที่ 4.12 ค่าเปอร์ยูนิตของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.13	0.25	0.38	0.51	0.63
20	0.15	0.31	0.46	0.61	0.76
30	0.19	0.38	0.57	0.75	0.94
40	0.22	0.42	0.66	0.89	1.11
50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
60	0.28	0.55	0.83	1.11	1.38
70	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50
80	0.32	0.65	0.97	1.29	1.61
90	0.34	0.69	1.03	1.37	1.71
100	0.36	0.72	1.09	1.45	1.81
110	0.38	0.76	1.14	1.52	1.90
120	0.40	0.79	1.19	1.58	1.98



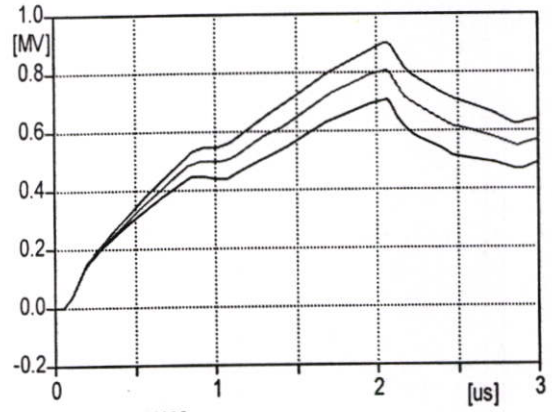
รูปที่ 4.19 กราฟเปอร์ยูนิตของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

จากรูปที่ 4.20 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 70 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



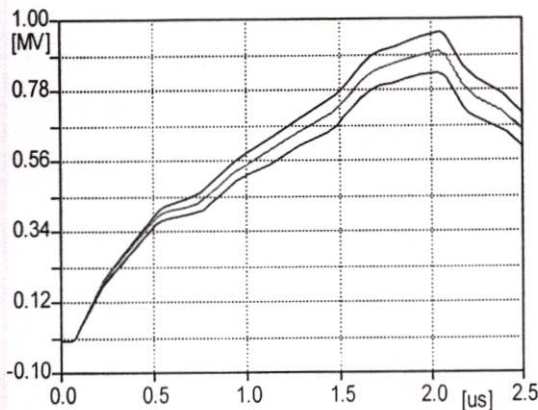
r30.pl4: v:PC -X0033C
r20.pl4: v:PA -X0033A
r10.pl4: v:PA -X0033A

(ก)



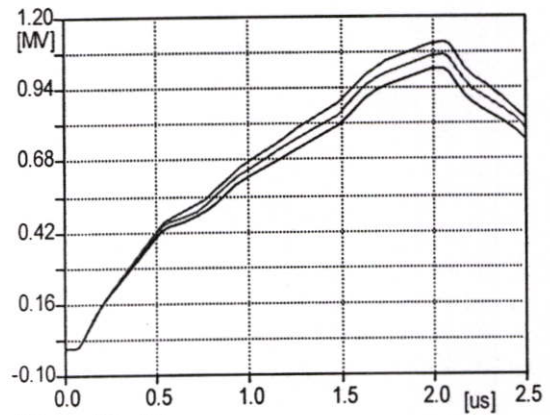
r60.pl4: v:PC -X0033C
r50.pl4: v:PC -X0033C
r40.pl4: v:PC -X0033C

(ข)



r90.pl4: v:PC -VC
r80.pl4: v:PC -VC
r70.pl4: v:PC -VC

(ค)

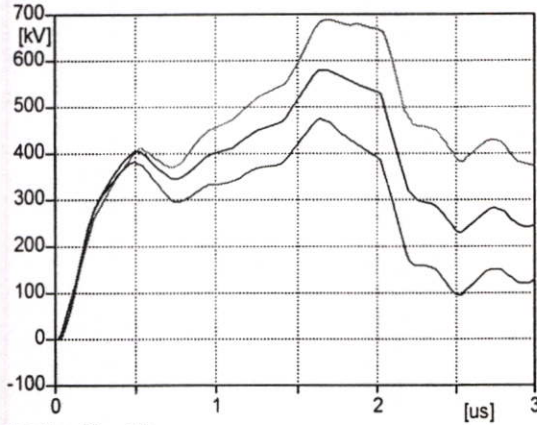


r120.pl4: v:PC -VC
r110.pl4: v:PC -VC
r100.pl4: v:PC -VC

(ง)

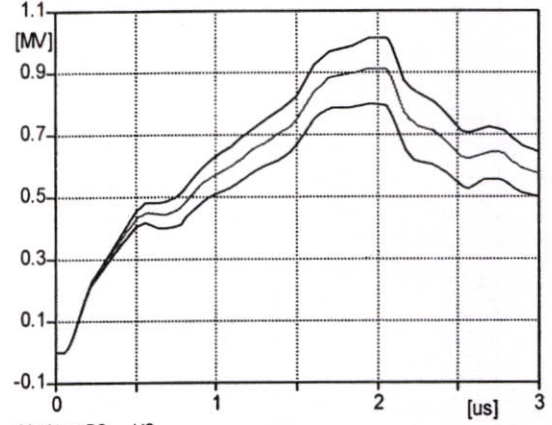
รูปที่ 4.20 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 70 เมตร

จากรูปที่ 4.21 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 70 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



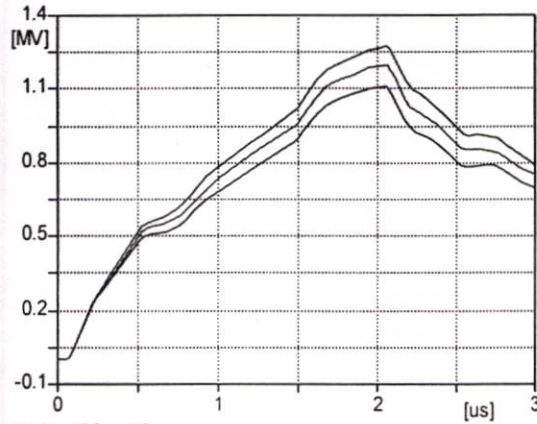
r30.pl4: v:PB -VB
r20.pl4: v:PA -VA
r10.pl4: v:PA -VA

(ก)



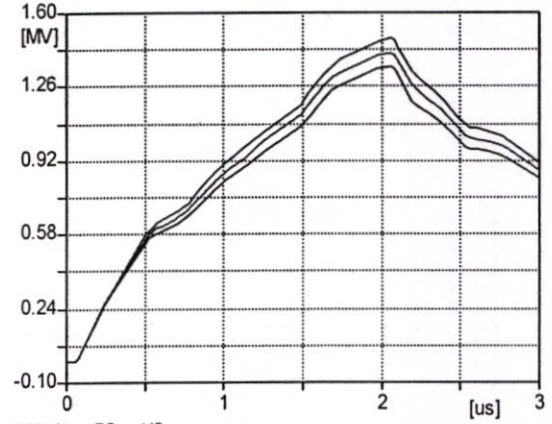
r60.pl4: v:PC -VC
r50.pl4: v:PC -VC
r40.pl4: v:PC -VC

(ข)



r90.pl4: v:PC -VC
r80.pl4: v:PC -VC
r70.pl4: v:PC -VC

(ค)

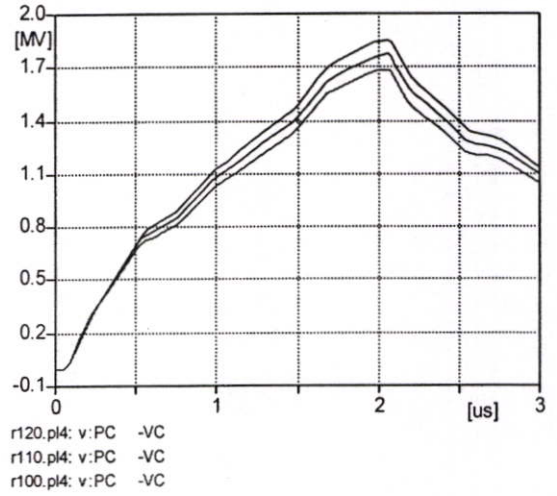
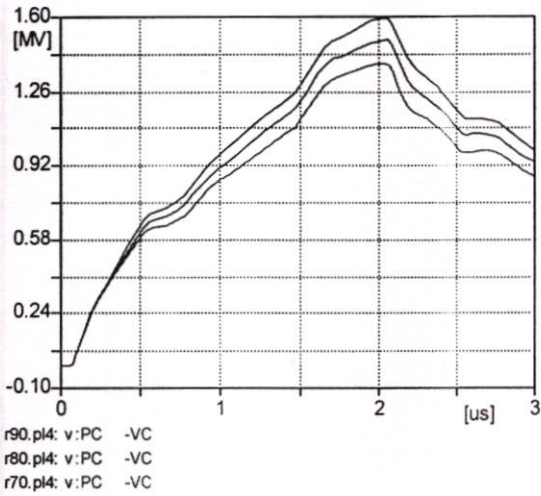
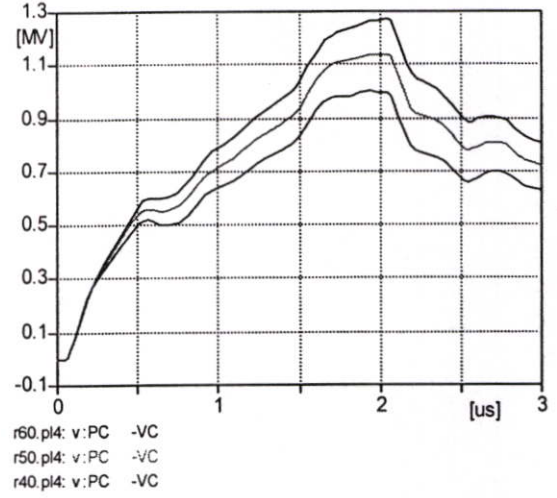
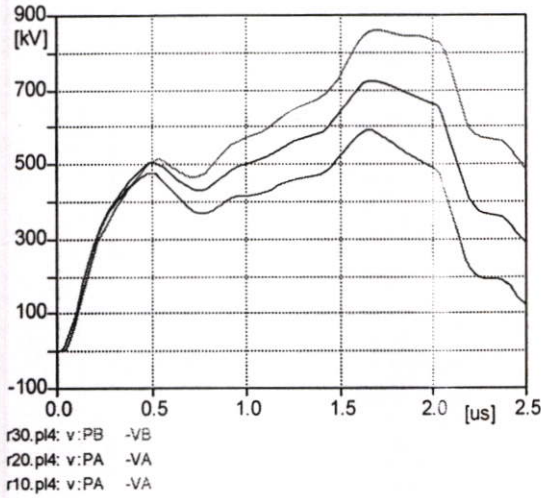


r120.pl4: v:PC -VC
r110.pl4: v:PC -VC
r100.pl4: v:PC -VC

(ง)

รูปที่ 4.21 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 70 เมตร

จากรูปที่ 4.22 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 70 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



รูปที่ 4.22 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 70 เมตร

จากตารางที่ 4.13 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์ 10 – 120 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 70 เมตร

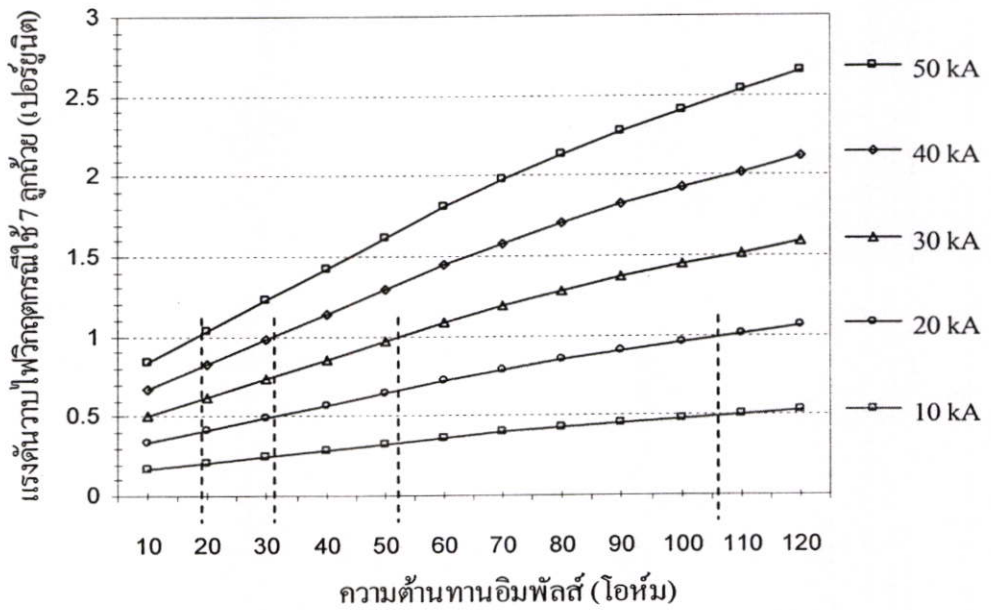
ตารางที่ 4.13 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 70 เมตร.

ความต้านทาน อิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	118,204	236,407	354,611	472,814	591,018
20	145,197	290,394	435,591	580,788	725,985
30	172,140	344,279	516,419	688,559	860,699
40	199,985	395,120	599,955	799,940	999,924
50	227,874	455,748	683,622	911,496	1,139,370
60	253,952	507,905	761,857	1,015,810	1,269,760
70	277,658	555,316	832,975	1,110,630	1,388,290
80	299,374	598,749	898,123	1,197,500	1,496,870
90	319,392	638,784	958,175	1,277,570	1,596,960
100	337,964	675,928	1,013,890	1,351,860	1,689,820
110	355,274	710,548	1,065,820	1,421,100	1,776,370
120	371,489	742,977	1,114,470	1,485,950	1,857,440

จากตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.23 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จาก ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพีลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 70 เมตร

ตารางที่ 4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพีลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.17	0.34	0.50	0.67	0.84
20	0.21	0.41	0.62	0.83	1.03
30	0.25	0.49	0.74	0.98	1.23
40	0.28	0.56	0.85	1.14	1.42
50	0.32	0.65	0.97	1.30	1.62
60	0.36	0.72	1.08	1.45	1.81
70	0.40	0.79	1.19	1.58	1.98
80	0.43	0.85	1.28	1.71	2.13
90	0.45	0.91	1.36	1.82	2.27
100	0.48	0.96	1.44	1.92	2.41
110	0.51	1.01	1.52	2.02	2.53
120	0.53	1.06	1.59	2.12	2.64

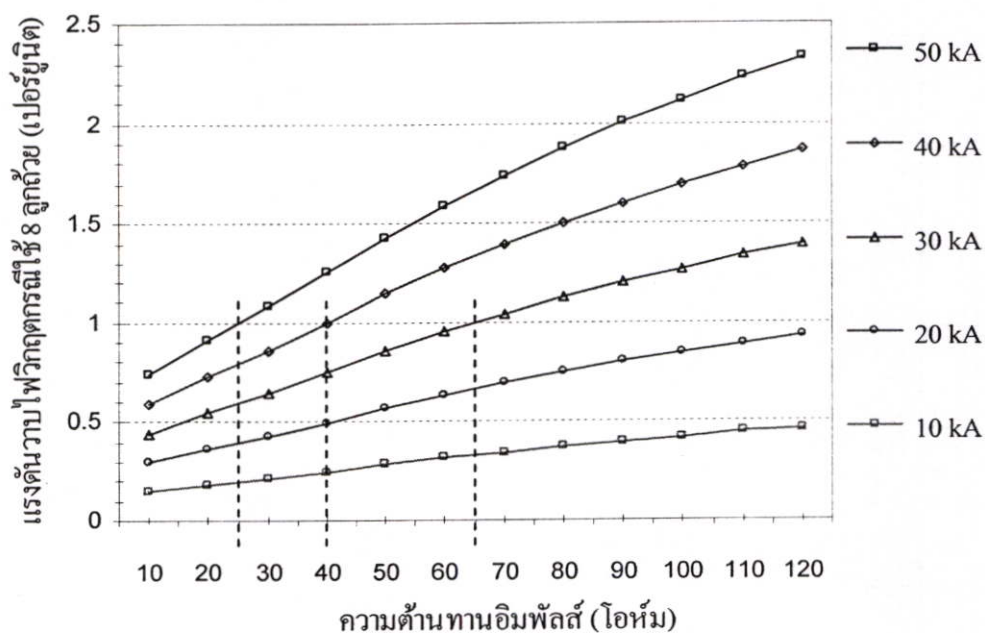


รูปที่ 4.23 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.24 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จาก ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพีลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 70 เมตร

ตารางที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพีลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.15	0.30	0.44	0.59	0.74
20	0.18	0.36	0.55	0.73	0.91
30	0.22	0.43	0.65	0.86	1.08
40	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
50	0.29	0.57	0.86	1.14	1.43
60	0.32	0.64	0.96	1.27	1.59
70	0.35	0.70	1.04	1.39	1.74
80	0.38	0.75	1.13	1.50	1.88
90	0.40	0.80	1.20	1.60	2.00
100	0.42	0.85	1.27	1.70	2.12
110	0.45	0.89	1.34	1.78	2.23
120	0.47	0.93	1.40	1.86	2.33

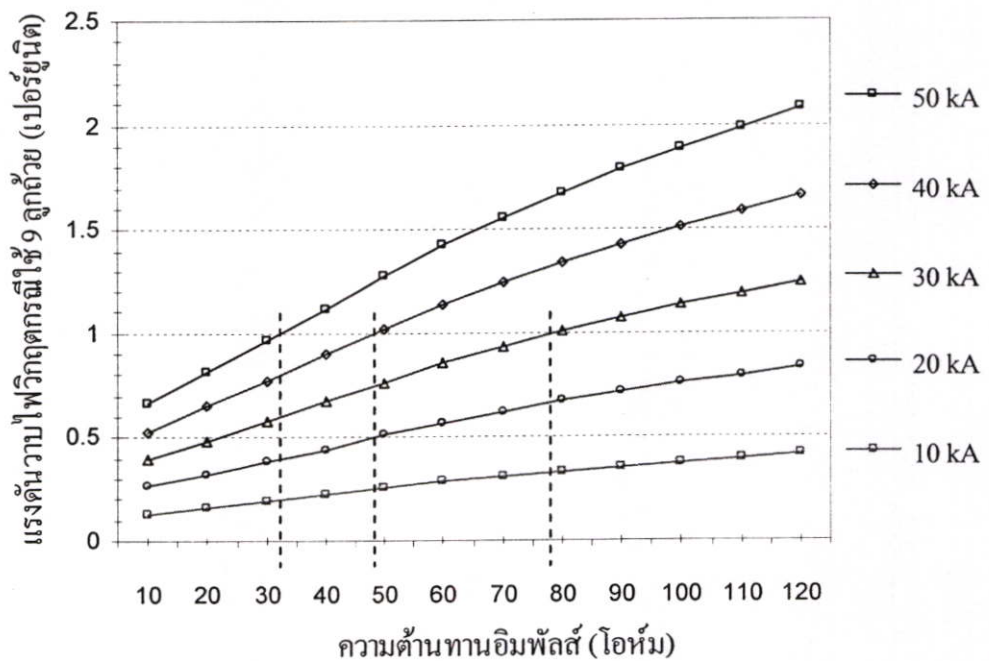


รูปที่ 4.24 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.25 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพีลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 70 เมตร

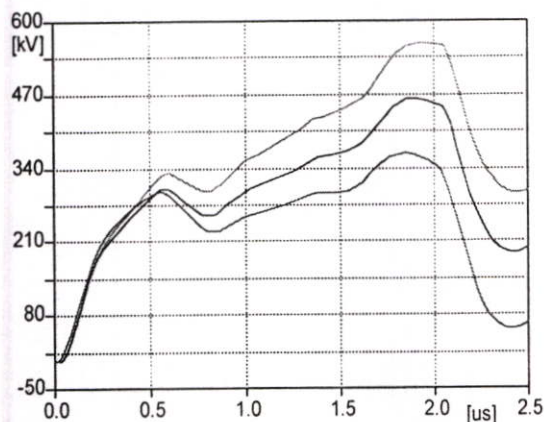
ตารางที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพีลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.13	0.26	0.40	0.53	0.66
20	0.16	0.33	0.49	0.65	0.81
30	0.19	0.39	0.58	0.77	0.96
40	0.22	0.44	0.67	0.90	1.12
50	0.26	0.51	0.77	1.02	1.28
60	0.28	0.57	0.85	1.14	1.42
70	0.31	0.62	0.93	1.24	1.56
80	0.34	0.67	1.01	1.34	1.68
90	0.36	0.72	1.07	1.43	1.79
100	0.38	0.76	1.14	1.51	1.89
110	0.40	0.80	1.19	1.59	1.99
120	0.42	0.83	1.25	1.66	2.08



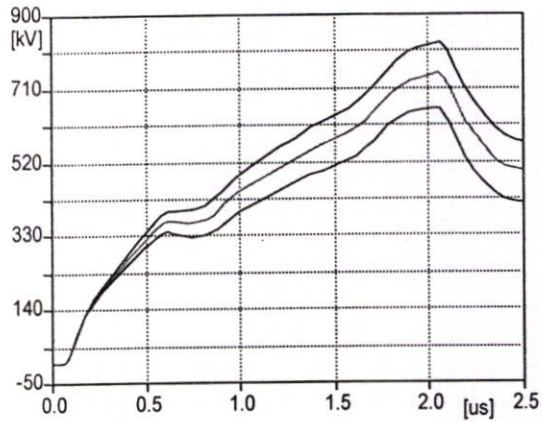
รูปที่ 4.25 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

จากรูปที่ 4.26 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 80 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



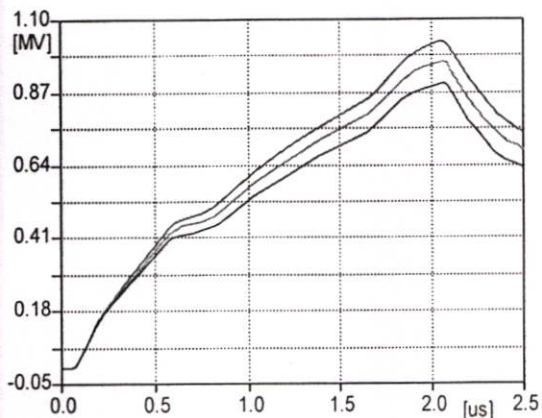
r30.pl4: v:PB -VB
r20.pl4: v:PB -VB
r10.pl4: v:PA -VA

(ก)



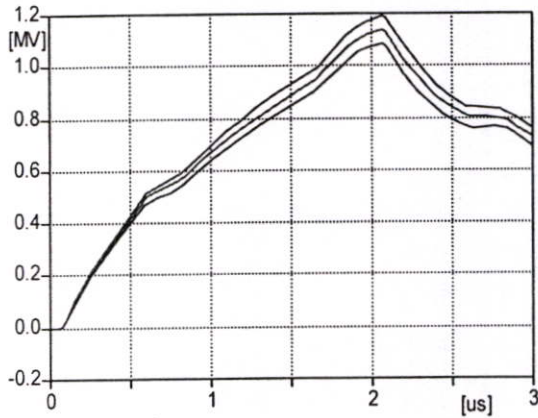
r60.pl4: v:PC -VC
r50.pl4: v:PC -VC
r40.pl4: v:PC -VC

(ข)



r90.pl4: v:PC -VC
r80.pl4: v:PC -VC
r70.pl4: v:PC -VC

(ค)

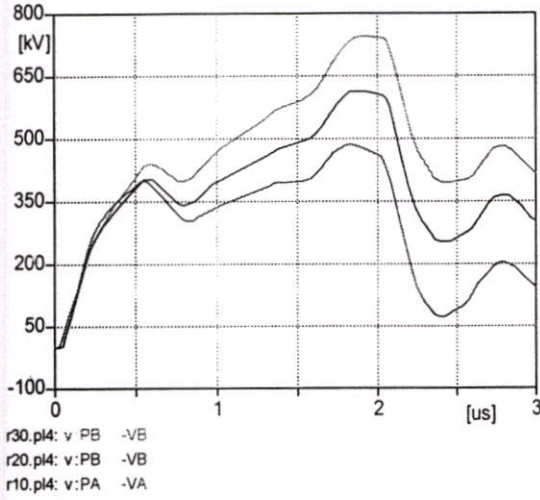


r120.pl4: v:PC -VC
r110.pl4: v:PC -VC
r100.pl4: v:PC -VC

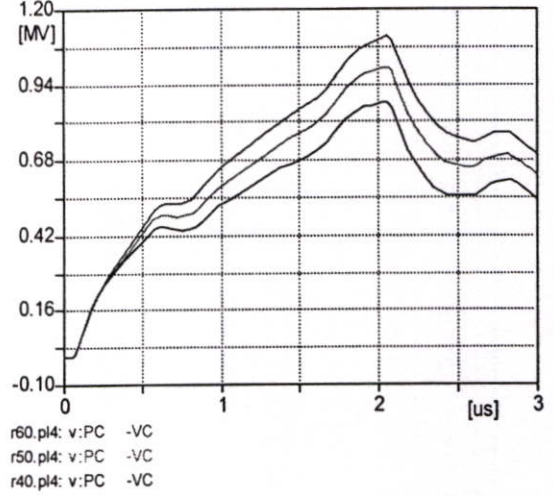
(ง)

รูปที่ 4.26 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 80 เมตร

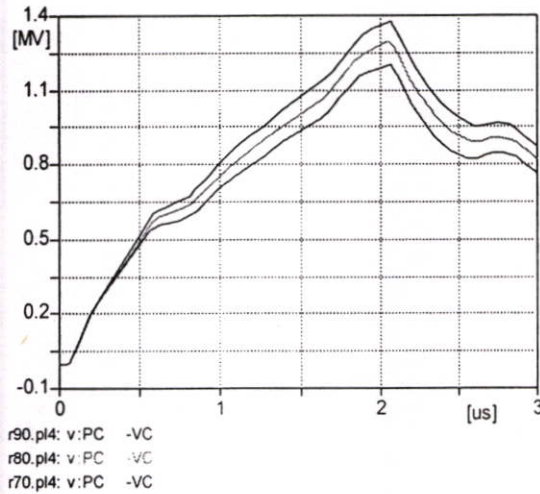
จากรูปที่ 4.27 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 80 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



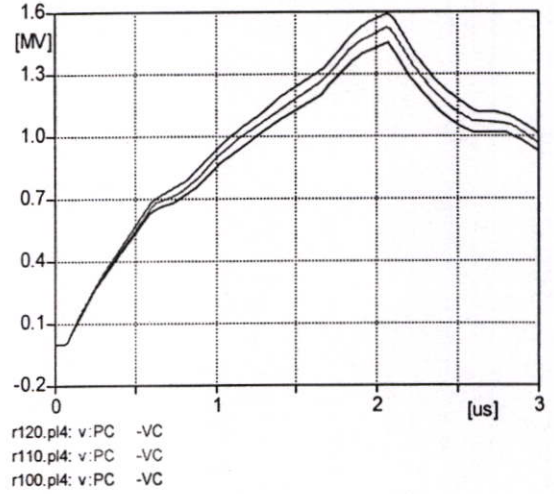
(ก)



(ข)



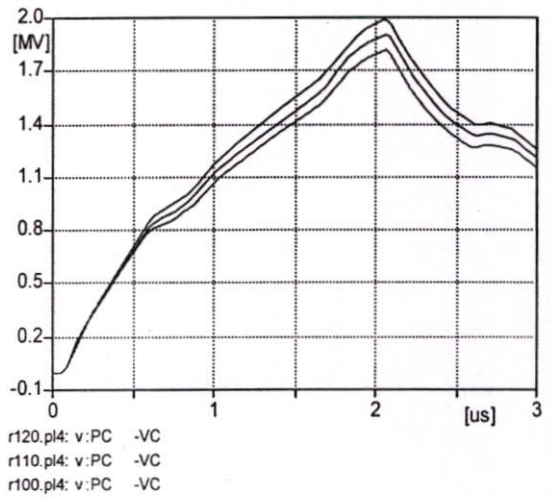
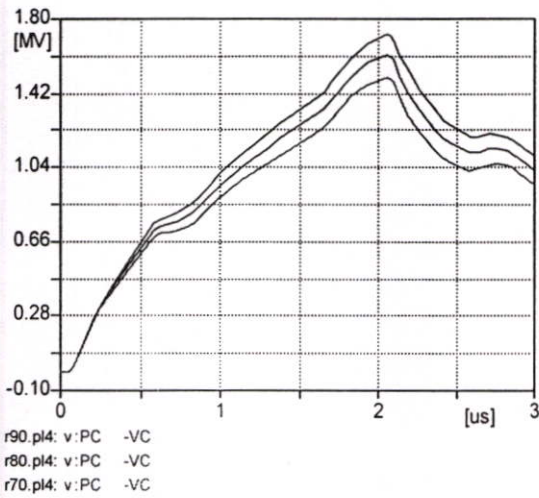
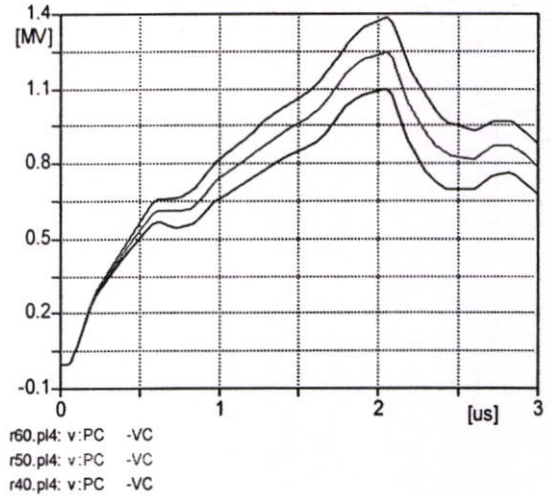
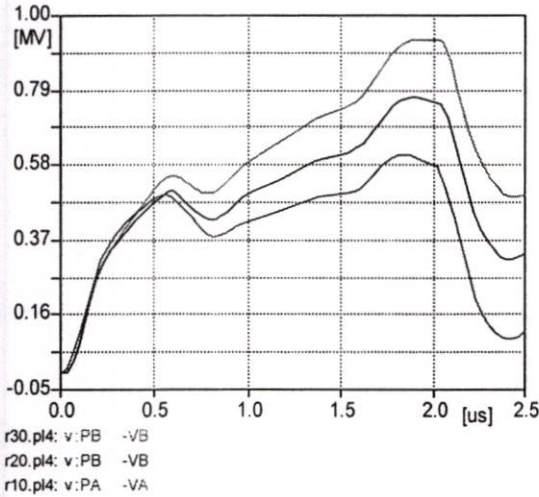
(ค)



(ง)

รูปที่ 4.27 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 80 เมตร

จากรูปที่ 4.28 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 80 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



รูปที่ 4.28 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 80 เมตร

จากตารางที่ 4.17 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์ 10 – 120 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 80 เมตร

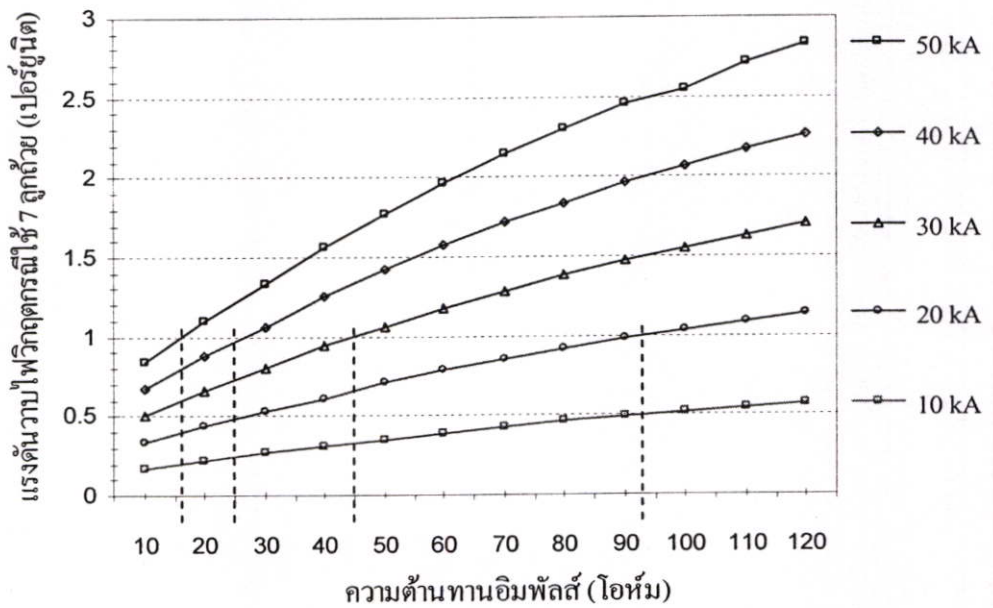
ตารางที่ 4.17 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 80 เมตร.

ความต้านทาน อิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	118,374	236,749	355,123	473,497	591,872
20	153,968	307,937	461,905	615,873	769,842
30	186,519	373,038	559,557	746,077	932,596
40	219,682	426,885	659,047	878,730	1,098,410
50	249,559	499,117	748,676	998,235	1,247,790
60	276,517	553,033	829,550	1,106,070	1,382,580
70	301,017	602,033	903,050	1,204,070	1,505,080
80	323,479	646,958	970,438	1,293,920	1,617,400
90	344,191	688,383	1,032,570	1,376,770	1,720,960
100	363,410	726,820	1,090,230	1,453,640	1,792,200
110	381,353	762,707	1,144,060	1,525,410	1,906,770
120	398,172	796,344	1,194,520	1,592,690	1,990,860

จากตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.29 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 80 เมตร

ตารางที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.17	0.34	0.51	0.67	0.84
20	0.22	0.44	0.66	0.88	1.10
30	0.27	0.53	0.80	1.06	1.33
40	0.31	0.61	0.94	1.25	1.56
50	0.36	0.71	1.07	1.42	1.78
60	0.39	0.79	1.18	1.57	1.97
70	0.43	0.86	1.29	1.71	2.14
80	0.46	0.92	1.38	1.84	2.30
90	0.49	0.98	1.47	1.96	2.45
100	0.52	1.03	1.55	2.07	2.55
110	0.54	1.09	1.63	2.17	2.72
120	0.57	1.13	1.70	2.27	2.83

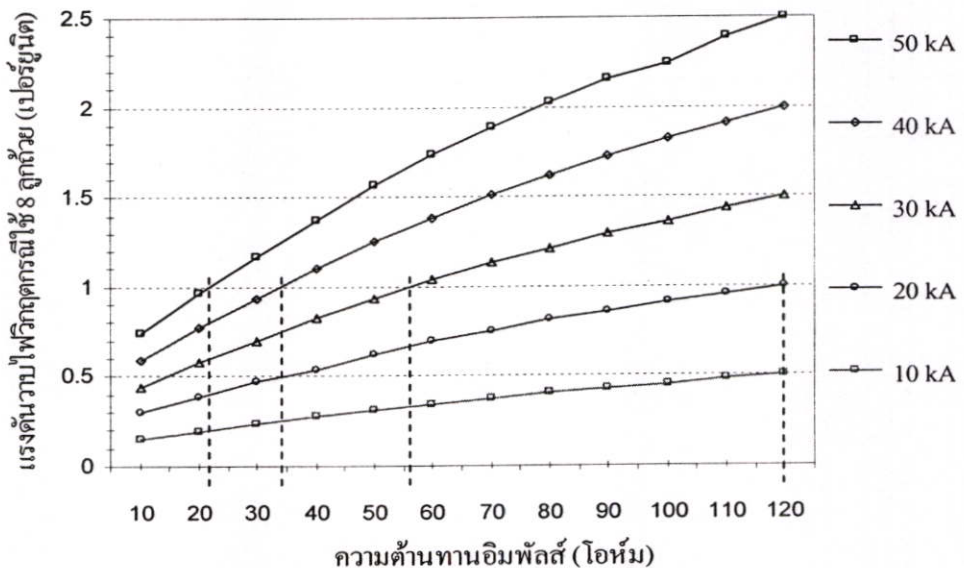


รูปที่ 4.29 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.30 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จาก ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 80 เมตร

ตารางที่ 4.19 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.15	0.30	0.45	0.59	0.74
20	0.19	0.39	0.58	0.77	0.97
30	0.23	0.47	0.70	0.94	1.17
40	0.28	0.54	0.83	1.10	1.38
50	0.31	0.63	0.94	1.25	1.56
60	0.35	0.69	1.04	1.39	1.73
70	0.38	0.75	1.13	1.51	1.89
80	0.41	0.81	1.22	1.62	2.03
90	0.43	0.86	1.29	1.73	2.16
100	0.46	0.91	1.37	1.82	2.25
110	0.48	0.96	1.43	1.91	2.39
120	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50

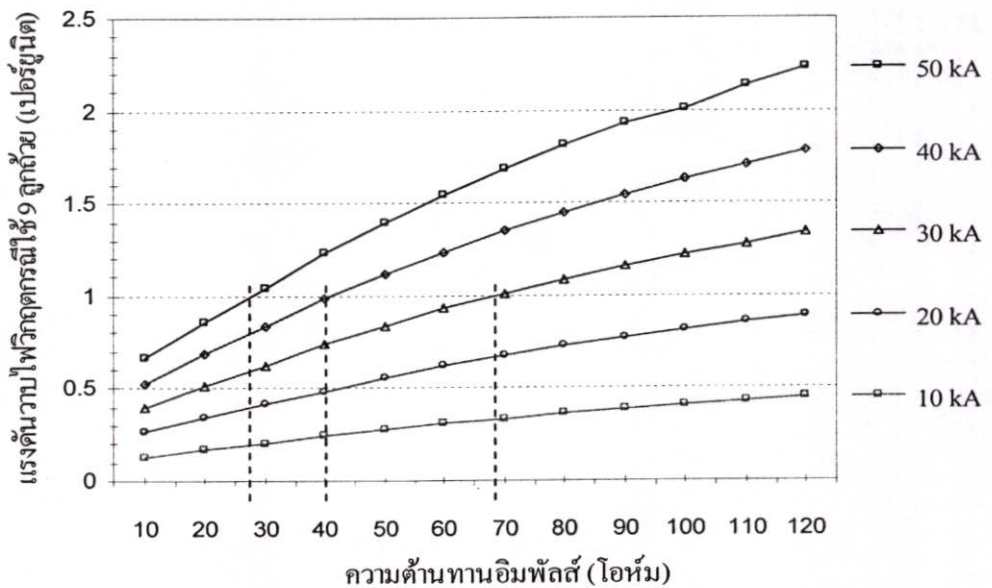


รูปที่ 4.30 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.31 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปกเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 80 เมตร

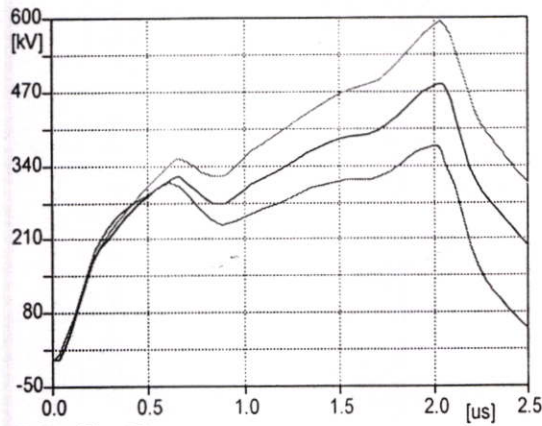
ตารางที่ 4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.13	0.27	0.40	0.53	0.66
20	0.17	0.34	0.52	0.69	0.86
30	0.21	0.42	0.63	0.84	1.04
40	0.25	0.48	0.74	0.98	1.23
50	0.28	0.56	0.84	1.12	1.40
60	0.31	0.62	0.93	1.24	1.55
70	0.34	0.67	1.01	1.35	1.69
80	0.36	0.72	1.09	1.45	1.81
90	0.39	0.77	1.16	1.54	1.93
100	0.41	0.81	1.22	1.63	2.01
110	0.43	0.85	1.28	1.71	2.14
120	0.45	0.89	1.34	1.78	2.23



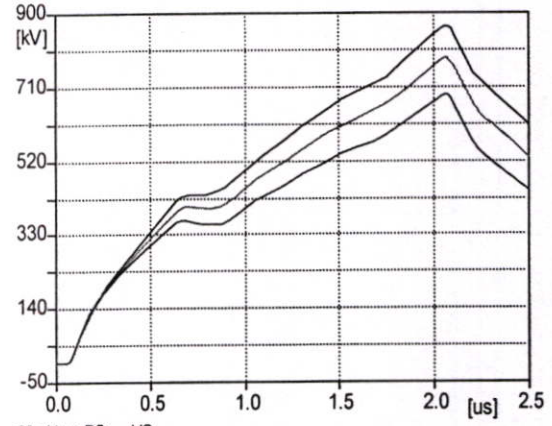
รูปที่ 4.31 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

จากรูปที่ 4.32 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสไฟฟ้า 30 kA ในระยะห่างเสา 90 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



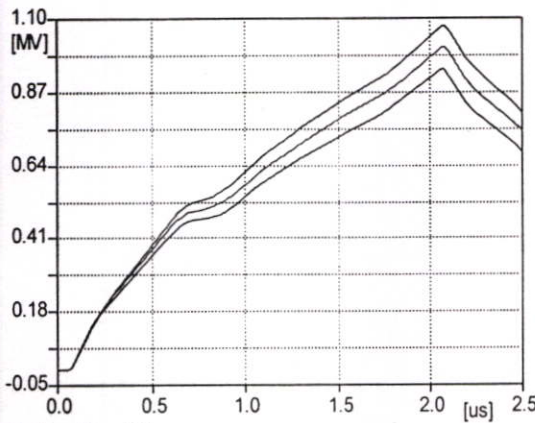
r30.pl4: v:PB -VB
r20.pl4: v:PB -VB
r10.pl4: v:PA -VA

(ก)



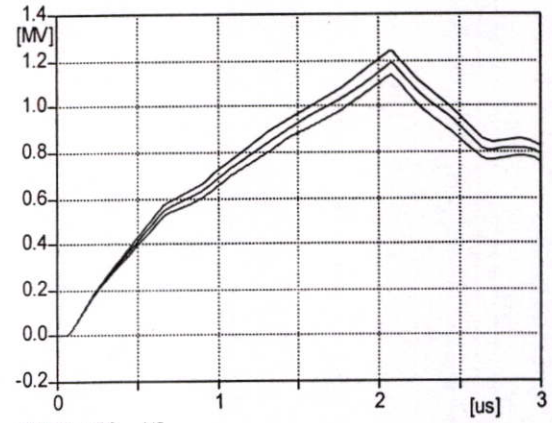
r60.pl4: v:PC -VC
r50.pl4: v:PC -VC
r40.pl4: v:PC -VC

(ข)



r90.pl4: v:PC -VC
r80.pl4: v:PC -VC
r70.pl4: v:PC -VC

(ค)

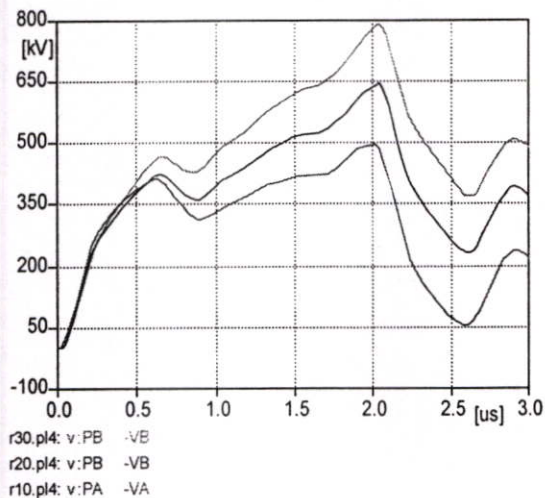


r120.pl4: v:PC -VC
r110.pl4: v:PC -VC
r100.pl4: v:PC -VC

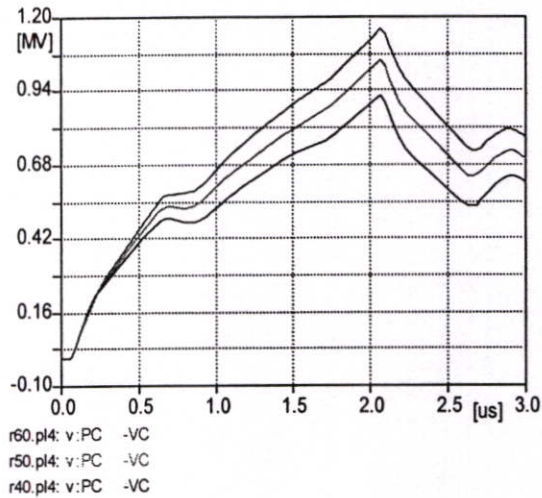
(ง)

รูปที่ 4.32 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสไฟฟ้า 30 kA ในระยะห่างเสา 90 เมตร

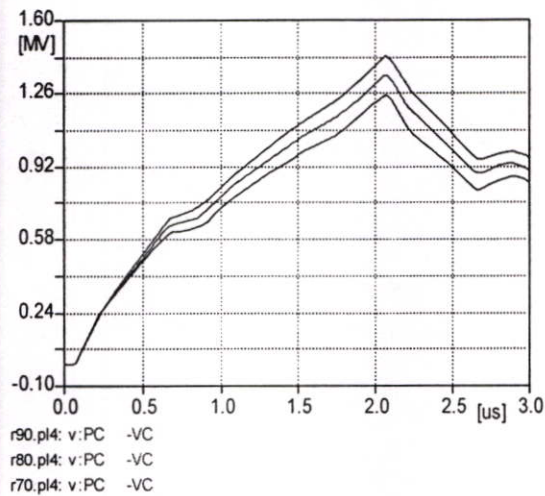
จากรูปที่ 4.33 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 90 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



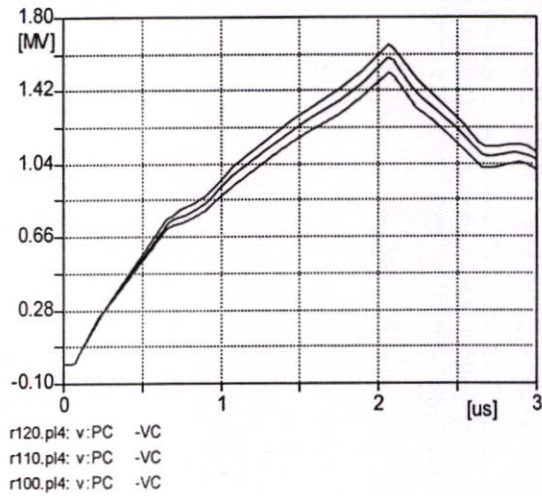
(ก)



(ข)



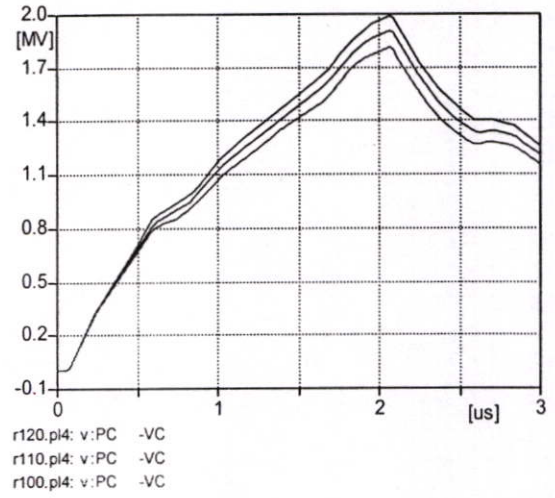
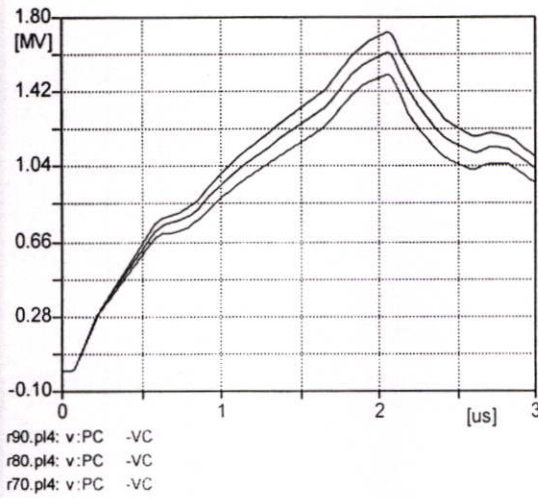
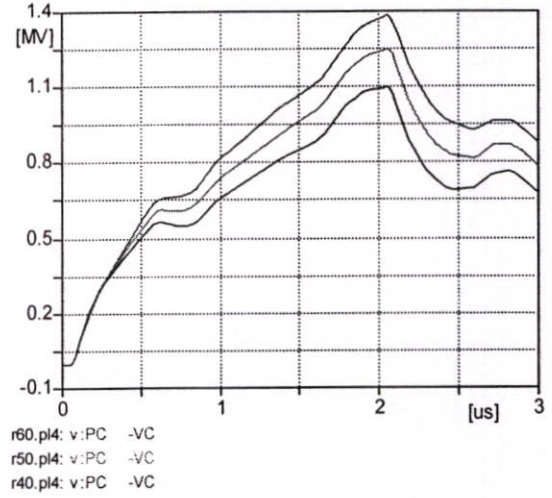
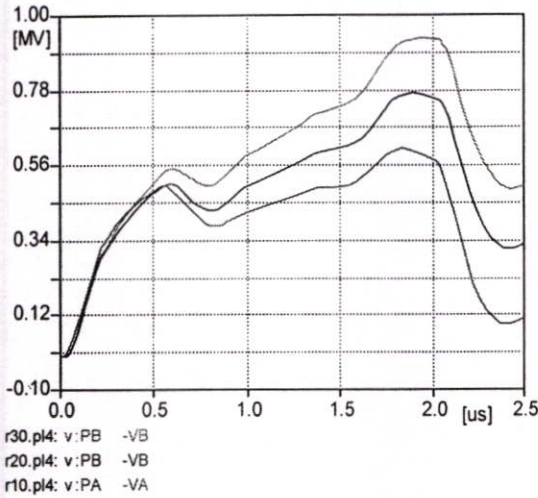
(ค)



(ง)

รูปที่ 4.33 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 90 เมตร

จากรูปที่ 4.34 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 90 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



รูปที่ 4.34 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 90 เมตร

จากตารางที่ 4.21 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์ 10 – 120 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 90 เมตร

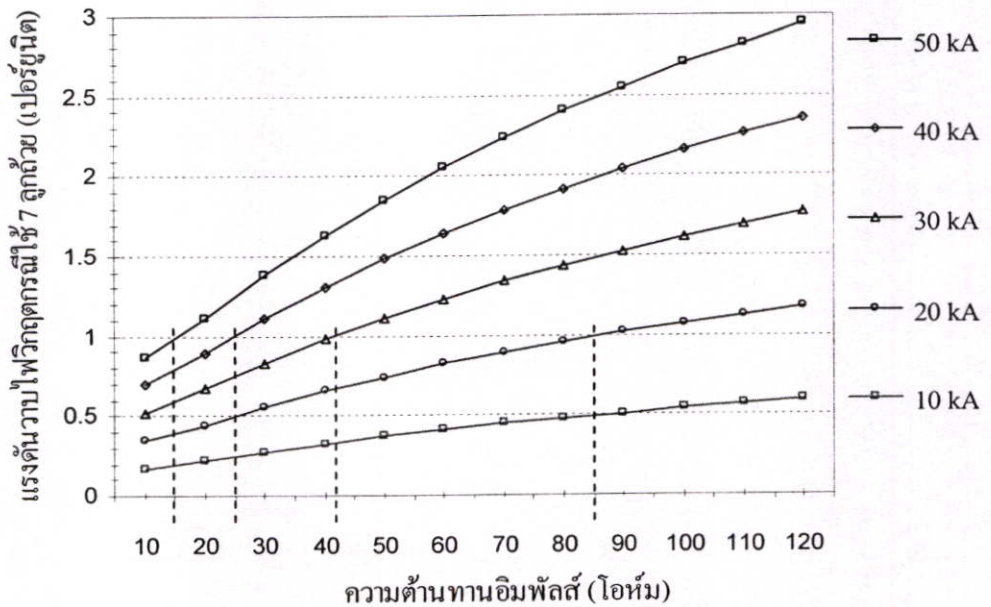
ตารางที่ 4.21 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 90 เมตร.

ความต้านทาน อิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	121,631	243,263	364,894	486,525	608,157
20	156,441	312,881	469,322	625,763	782,204
30	194,612	389,223	583,835	778,447	973,059
40	229,338	458,677	688,015	917,353	1,146,690
50	260,612	521,225	781,837	1,042,450	1,303,060
60	288,772	577,544	866,316	1,155,090	1,443,860
70	313,992	627,983	941,975	1,255,970	1,569,960
80	337,116	674,231	1,011,350	1,348,460	1,685,580
90	358,440	716,881	1,075,320	1,433,760	1,792,200
100	378,235	756,469	1,134,700	1,512,940	1,898,050
110	396,711	793,421	1,190,130	1,586,840	1,983,550
120	414,028	828,055	1,242,080	1,656,110	2,070,140

จากตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.35 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 90 เมตร

ตารางที่ 4.22 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.17	0.35	0.52	0.69	0.87
20	0.22	0.45	0.67	0.89	1.11
30	0.28	0.55	0.83	1.11	1.39
40	0.33	0.65	0.98	1.31	1.63
50	0.37	0.74	1.11	1.48	1.86
60	0.41	0.82	1.23	1.64	2.06
70	0.45	0.89	1.34	1.79	2.24
80	0.48	0.96	1.44	1.92	2.40
90	0.51	1.02	1.53	2.04	2.55
100	0.54	1.08	1.62	2.15	2.70
110	0.56	1.13	1.69	2.26	2.82
120	0.59	1.18	1.77	2.36	2.95

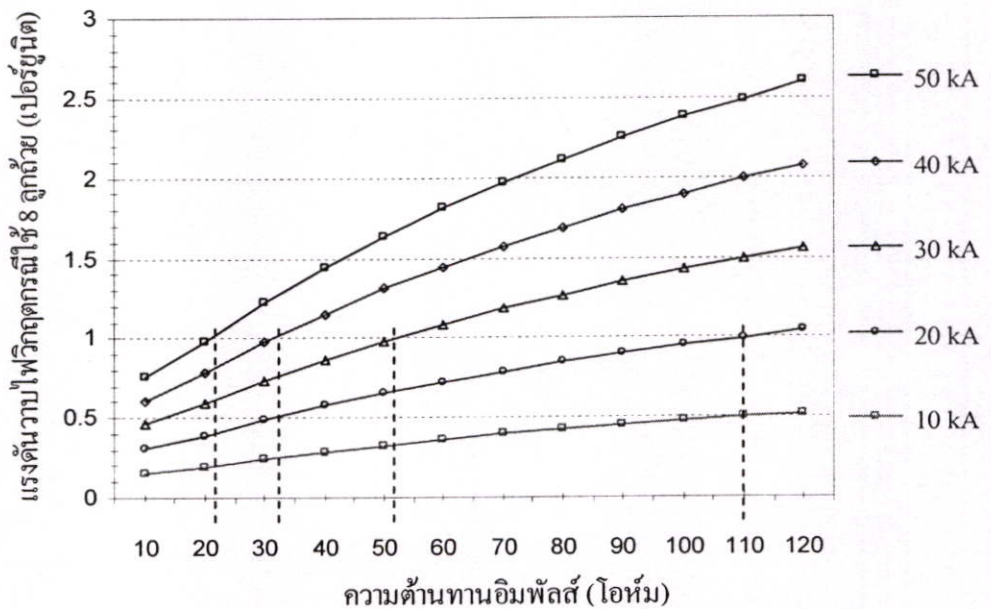


รูปที่ 4.35 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.36 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 90 เมตร

ตารางที่ 4.23 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.15	0.31	0.46	0.61	0.76
20	0.20	0.39	0.59	0.78	0.98
30	0.24	0.49	0.73	0.98	1.22
40	0.29	0.58	0.86	1.15	1.44
50	0.33	0.65	0.98	1.31	1.63
60	0.36	0.72	1.09	1.45	1.81
70	0.39	0.79	1.18	1.57	1.97
80	0.42	0.85	1.27	1.69	2.11
90	0.45	0.90	1.35	1.80	2.25
100	0.47	0.95	1.42	1.90	2.38
110	0.50	0.99	1.49	1.99	2.49
120	0.52	1.04	1.56	2.08	2.60

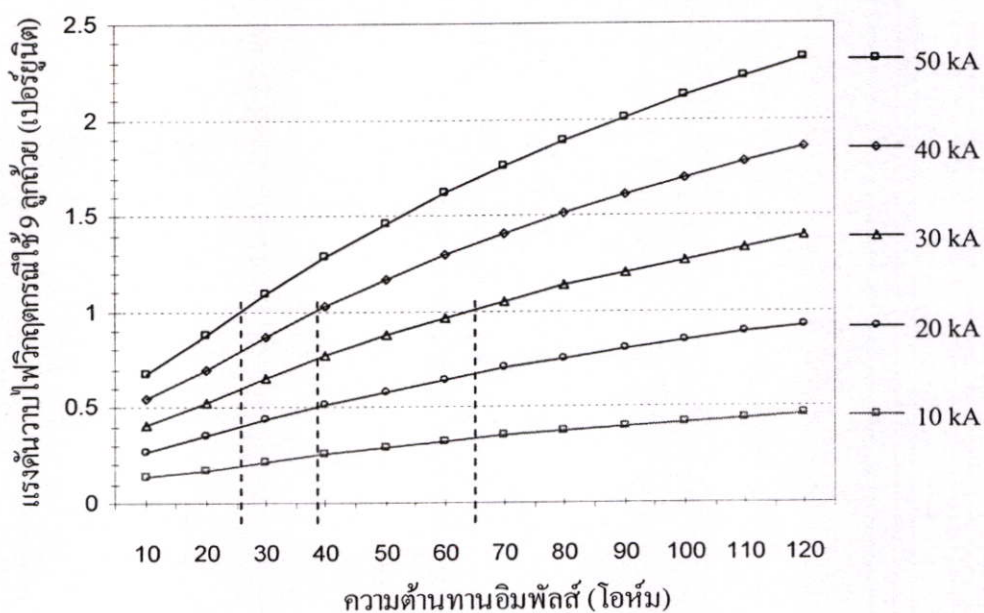


รูปที่ 4.36 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.37 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จาก ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 90 เมตร

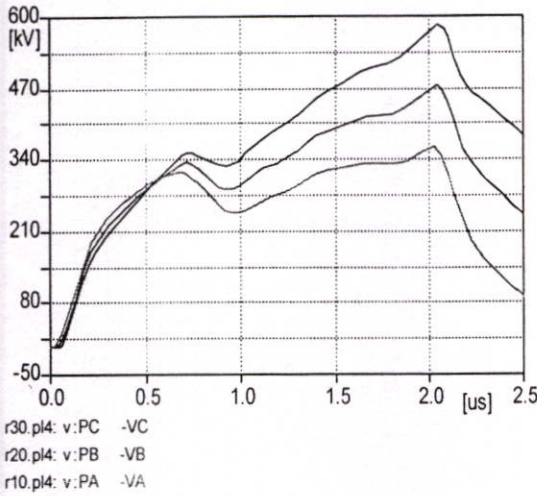
ตารางที่ 4.24 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.14	0.27	0.41	0.54	0.68
20	0.18	0.35	0.53	0.70	0.88
30	0.22	0.44	0.65	0.87	1.09
40	0.26	0.51	0.77	1.03	1.28
50	0.29	0.58	0.88	1.17	1.46
60	0.32	0.65	0.97	1.29	1.62
70	0.35	0.70	1.06	1.41	1.76
80	0.38	0.76	1.13	1.51	1.89
90	0.40	0.80	1.20	1.61	2.01
100	0.42	0.85	1.27	1.69	2.13
110	0.44	0.89	1.33	1.78	2.22
120	0.46	0.93	1.39	1.86	2.32

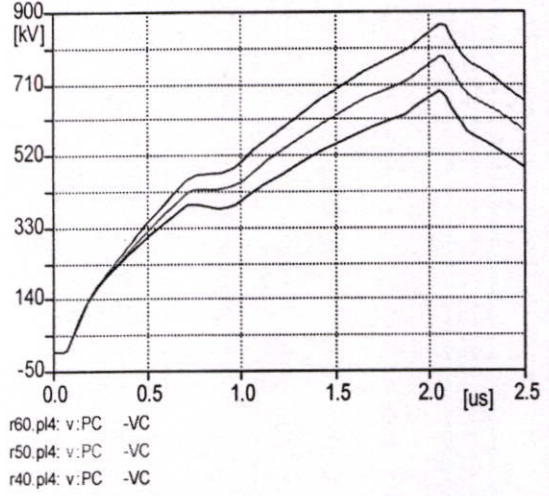


รูปที่ 4.37 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

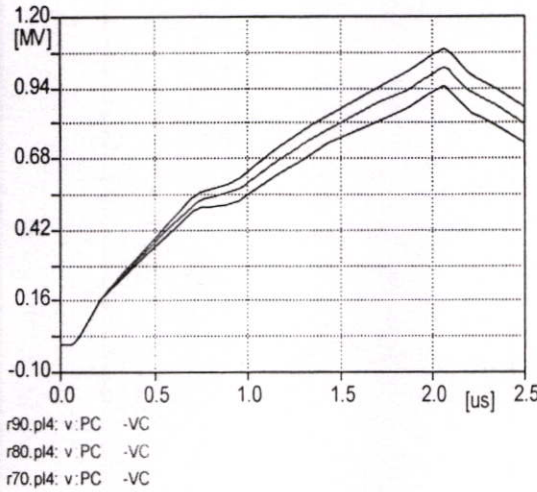
จากรูปที่ 4.38 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 100 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



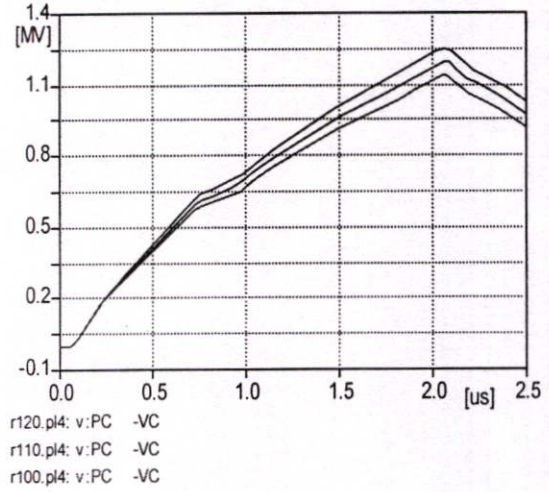
(ก)



(ข)



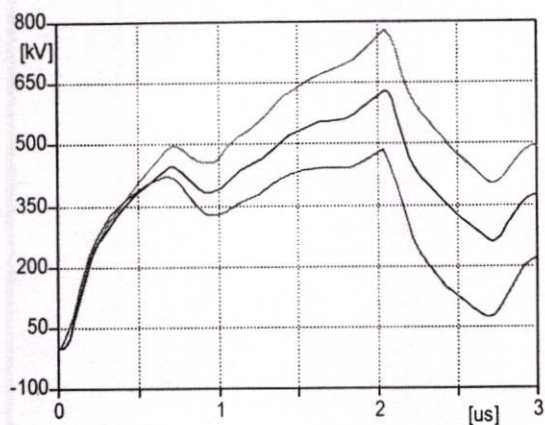
(ค)



(ง)

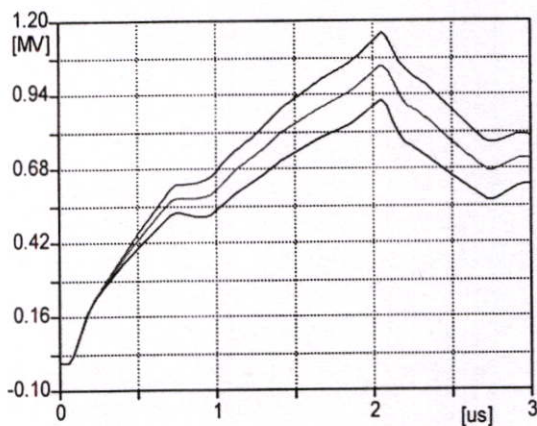
รูปที่ 4.38 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 100 เมตร

จากรูปที่ 4.39 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 100 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



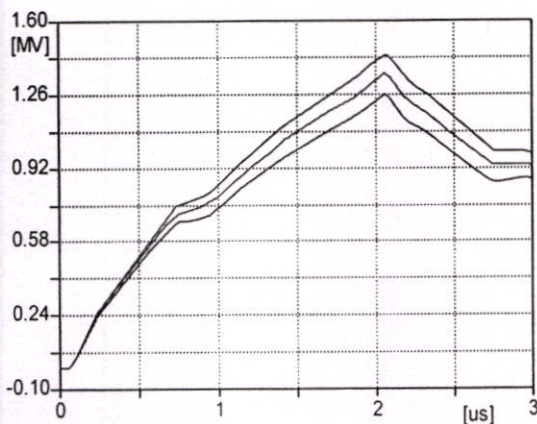
r30.pl4: v:PB -VB
r20.pl4: v:PB -VB
r10.pl4: v:PA -VA

(ก)



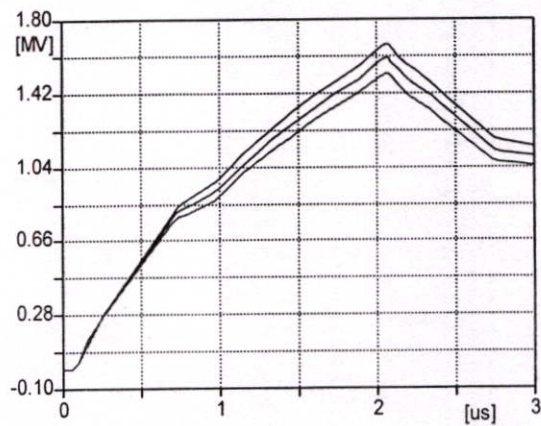
r60.pl4: v:PC -VC
r50.pl4: v:PC -VC
r40.pl4: v:PC -VC

(ข)



r90.pl4: v:PC -VC
r80.pl4: v:PC -VC
r70.pl4: v:PC -VC

(ค)

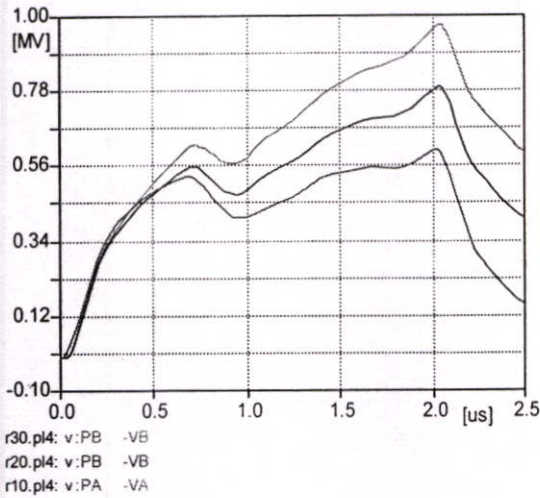


r120.pl4: v:PC -VC
r110.pl4: v:PC -VC
r100.pl4: v:PC -VC

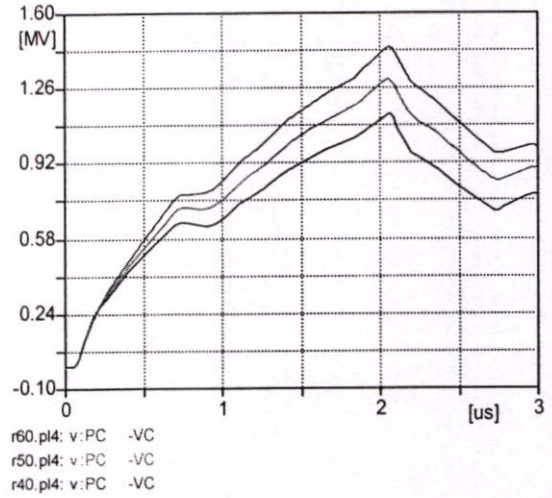
(ง)

รูปที่ 4.39 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 100 เมตร

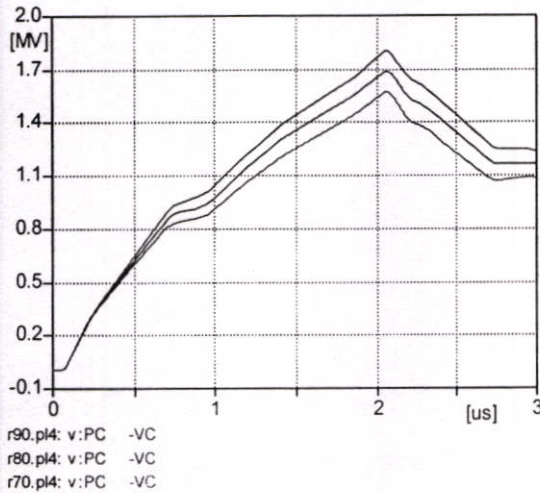
จากรูปที่ 4.40 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 100 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 – 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



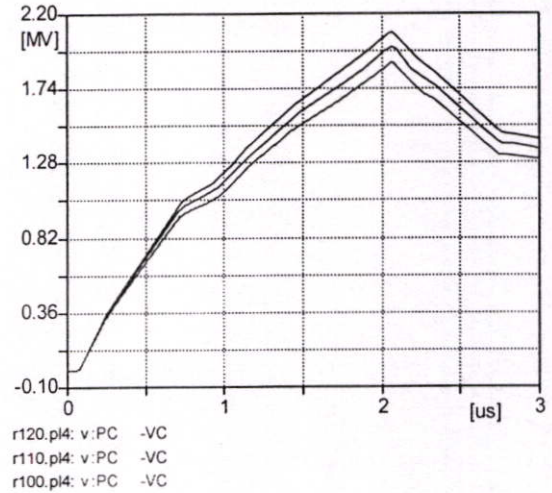
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.40 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 100 เมตร

จากตารางที่ 4.25 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพีดส์ 10 – 120 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ของการปิกเสาวาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 100 เมตร

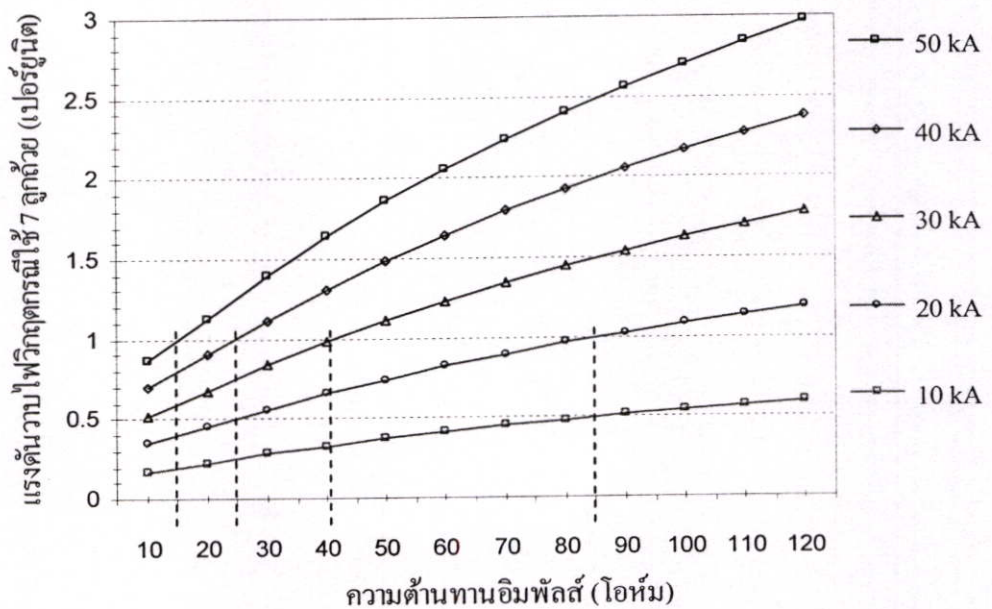
ตารางที่ 4.25 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ของการปิกเสาวาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 100 เมตร.

ความต้านทาน อิมพีดส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	121,837	243,674	365,511	487,348	609,185
20	158,500	317,001	475,501	634,001	792,502
30	195,569	391,138	586,708	782,277	977,846
40	230,325	460,651	690,976	921,301	1,151,630
50	261,043	522,086	783,130	1,044,170	1,305,220
60	288,907	577,814	866,721	1,155,630	1,444,540
70	314,681	629,361	944,042	1,258,720	1,573,400
80	338,347	676,693	1,015,040	1,353,390	1,691,730
90	360,190	720,380	1,080,570	1,440,760	1,800,950
100	380,479	760,957	1,141,440	1,521,910	1,902,390
110	399,419	798,838	1,198,260	1,597,680	1,997,090
120	417,172	834,344	1,251,520	1,668,690	2,085,860

จากตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.41 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จาก ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 100 เมตร

ตารางที่ 4.26 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.17	0.35	0.52	0.69	0.87
20	0.23	0.45	0.68	0.90	1.13
30	0.28	0.56	0.84	1.11	1.39
40	0.33	0.66	0.98	1.31	1.64
50	0.37	0.74	1.12	1.49	1.86
60	0.41	0.82	1.23	1.65	2.06
70	0.45	0.90	1.34	1.79	2.24
80	0.48	0.96	1.45	1.93	2.41
90	0.51	1.03	1.54	2.05	2.56
100	0.54	1.08	1.63	2.17	2.71
110	0.57	1.14	1.71	2.28	2.84
120	0.59	1.19	1.78	2.38	2.97

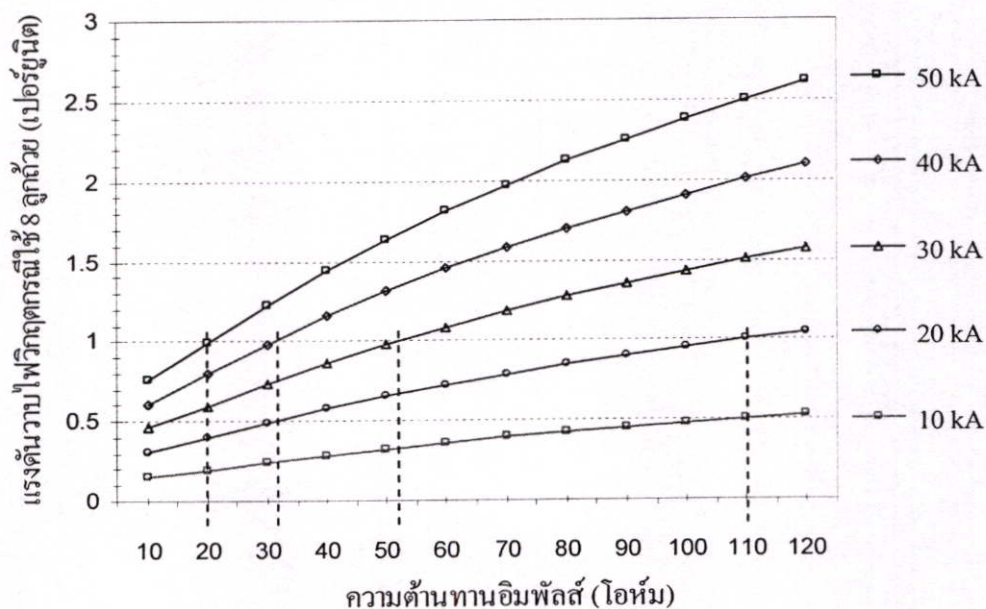


รูปที่ 4.41 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.27 และรูปที่ 4.42 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤต (จาก ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความ ด้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 100 เมตร

ตารางที่ 4.27 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

ความต้านทาน อิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.15	0.31	0.46	0.61	0.76
20	0.20	0.40	0.60	0.79	0.99
30	0.25	0.49	0.74	0.98	1.23
40	0.29	0.58	0.87	1.16	1.44
50	0.33	0.65	0.98	1.31	1.64
60	0.36	0.72	1.09	1.45	1.81
70	0.39	0.79	1.18	1.58	1.97
80	0.42	0.85	1.27	1.70	2.12
90	0.45	0.90	1.35	1.81	2.26
100	0.48	0.95	1.43	1.91	2.39
110	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
120	0.52	1.05	1.57	2.09	2.62

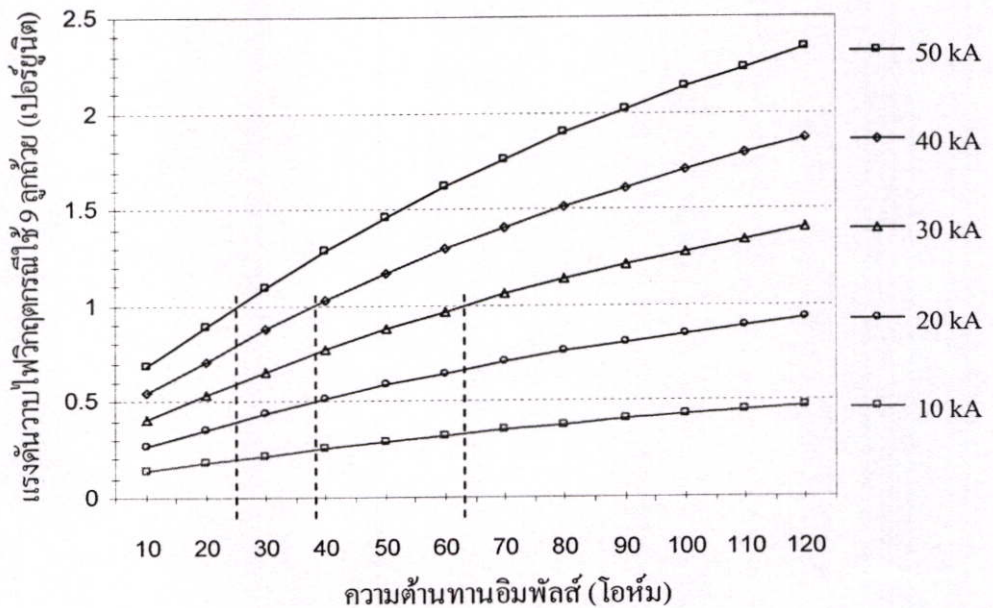


รูปที่ 4.42 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.28 และรูปที่ 4.43 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จาก ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 100 เมตร

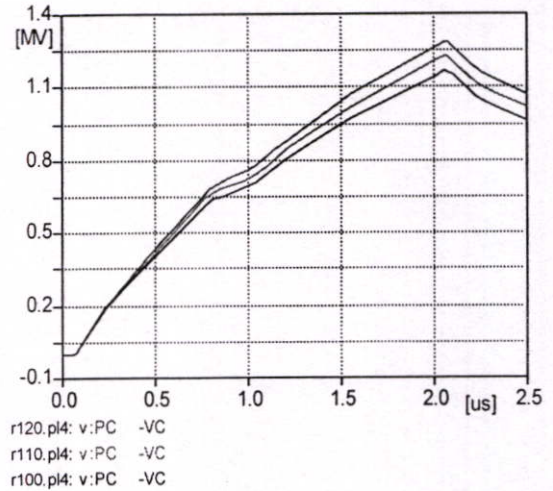
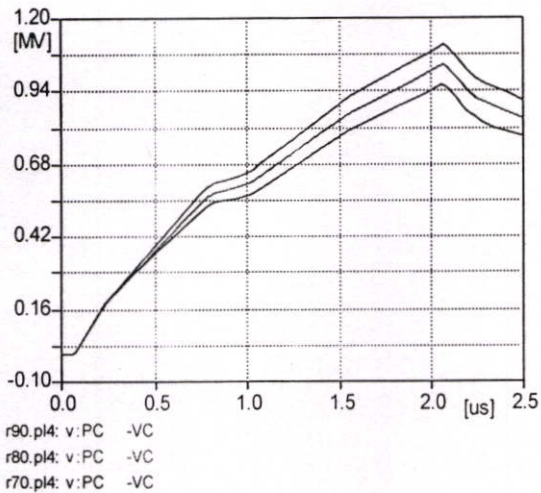
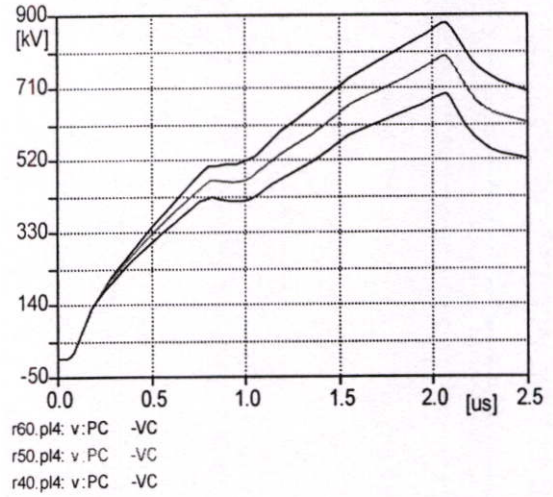
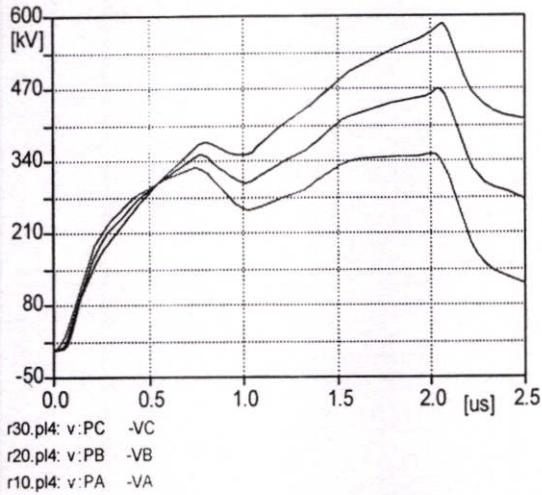
ตารางที่ 4.28 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.14	0.27	0.41	0.55	0.68
20	0.18	0.36	0.53	0.71	0.89
30	0.22	0.44	0.66	0.88	1.10
40	0.26	0.52	0.77	1.03	1.29
50	0.29	0.58	0.88	1.17	1.46
60	0.32	0.65	0.97	1.29	1.62
70	0.35	0.70	1.06	1.41	1.76
80	0.38	0.76	1.14	1.52	1.89
90	0.40	0.81	1.21	1.61	2.02
100	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13
110	0.45	0.89	1.34	1.79	2.24
120	0.47	0.93	1.40	1.87	2.34



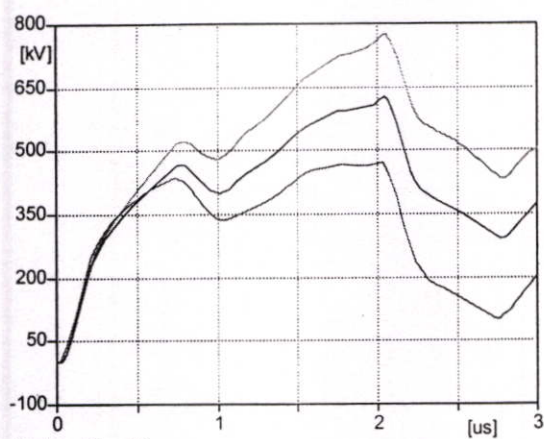
รูปที่ 4.43 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

จากรูปที่ 4.44 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 110 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



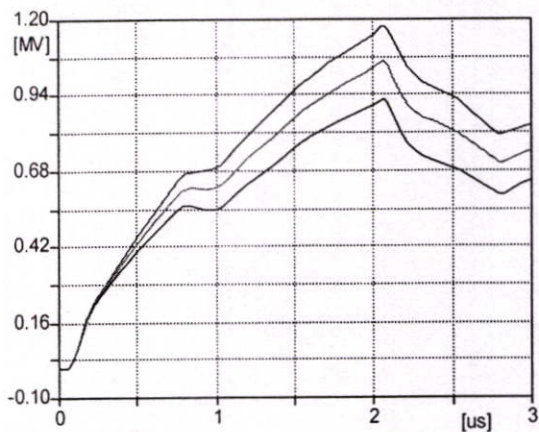
รูปที่ 4.44 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 110 เมตร

จากรูปที่ 4.45 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 110 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



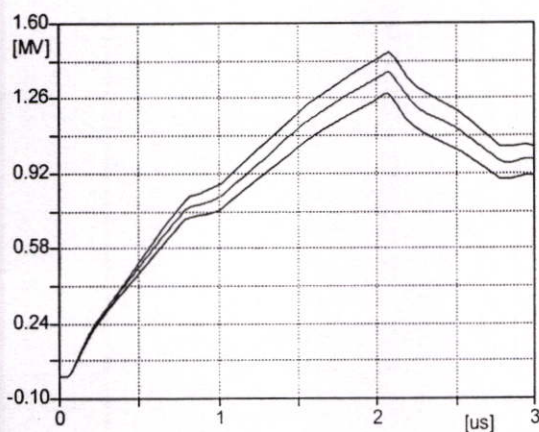
r30.pl4: v:PB -VB
r20.pl4: v:PB -VB
r10.pl4: v:PA -VA

(ก)



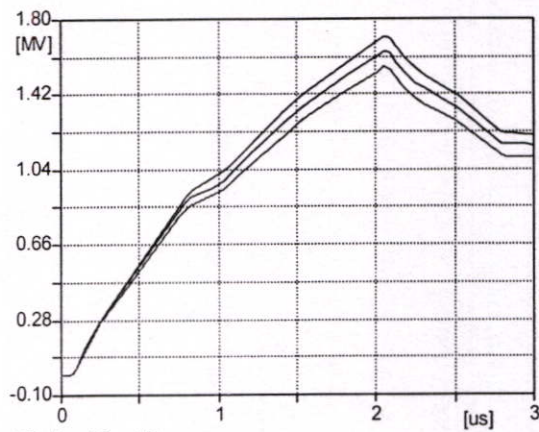
r60.pl4: v:PC -VC
r50.pl4: v:PC -VC
r40.pl4: v:PC -VC

(ข)



r90.pl4: v:PC -VC
r80.pl4: v:PC -VC
r70.pl4: v:PC -VC

(ค)

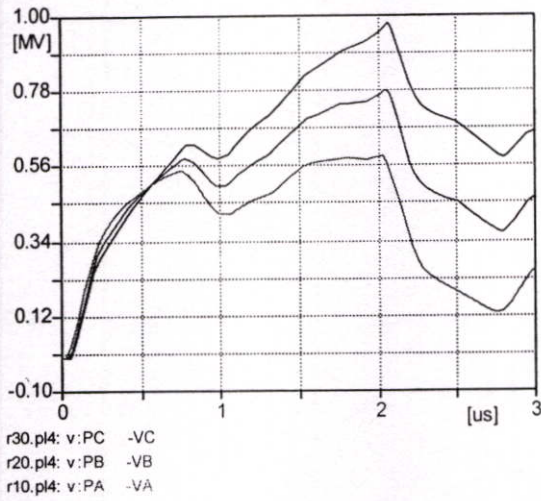


r120.pl4: v:PC -VC
r110.pl4: v:PC -VC
r100.pl4: v:PC -VC

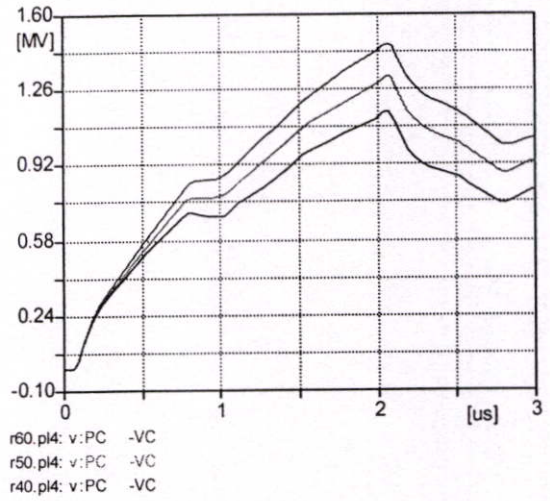
(ง)

รูปที่ 4.45 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 110 เมตร

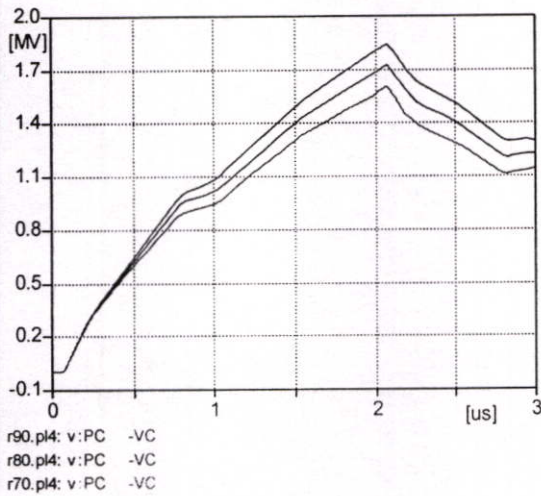
จากรูปที่ 4.46 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 110 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



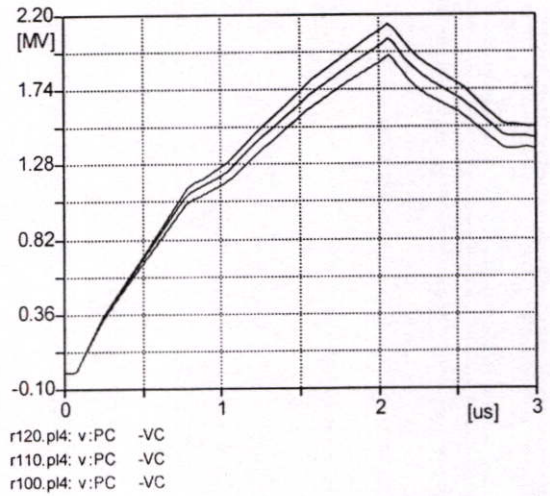
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.46 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 110 เมตร

จากตารางที่ 4.29 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์ 10 – 120 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ของการปกเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 110 เมตร

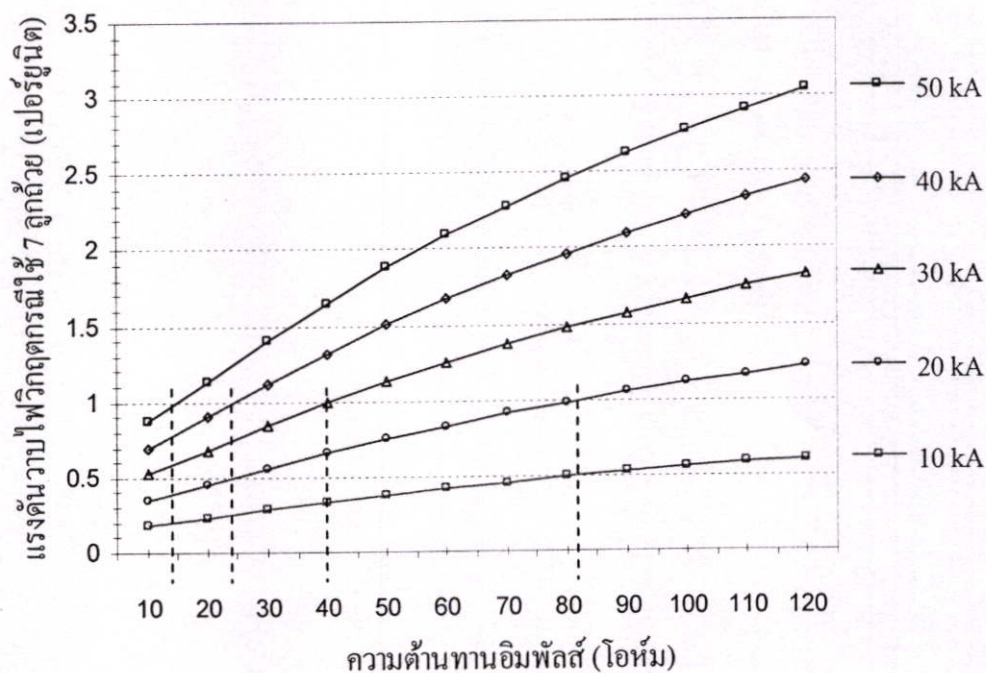
ตารางที่ 4.29 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ของการปกเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 110 เมตร.

ความต้านทาน อิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	122,058	244,116	366,174	488,232	610,290
20	159,543	319,085	478,628	638,170	797,713
30	197,224	394,448	591,672	788,896	986,120
40	231,726	463,451	695,177	926,903	1,158,630
50	264,259	528,518	792,776	1,057,040	1,321,290
60	293,738	587,475	881,213	1,174,950	1,468,690
70	320,641	641,282	961,922	1,282,560	1,603,200
80	345,370	690,739	1,036,110	1,381,480	1,726,850
90	368,219	736,438	1,104,660	1,472,880	1,841,090
100	389,444	778,888	1,168,330	1,557,780	1,947,220
110	409,255	818,511	1,227,770	1,637,020	2,046,280
120	427,827	855,654	1,283,480	1,711,310	2,139,140

จากตารางที่ 4.30 และรูปที่ 4.47 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จาก ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 110 เมตร

ตารางที่ 4.30 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.17	0.35	0.52	0.70	0.87
20	0.23	0.45	0.68	0.91	1.14
30	0.28	0.56	0.84	1.12	1.40
40	0.33	0.66	0.99	1.32	1.65
50	0.38	0.75	1.13	1.51	1.88
60	0.42	0.84	1.25	1.67	2.09
70	0.46	0.91	1.37	1.83	2.28
80	0.49	0.98	1.48	1.97	2.46
90	0.52	1.05	1.57	2.10	2.62
100	0.55	1.11	1.66	2.22	2.77
110	0.58	1.17	1.75	2.33	2.91
120	0.61	1.22	1.83	2.44	3.05

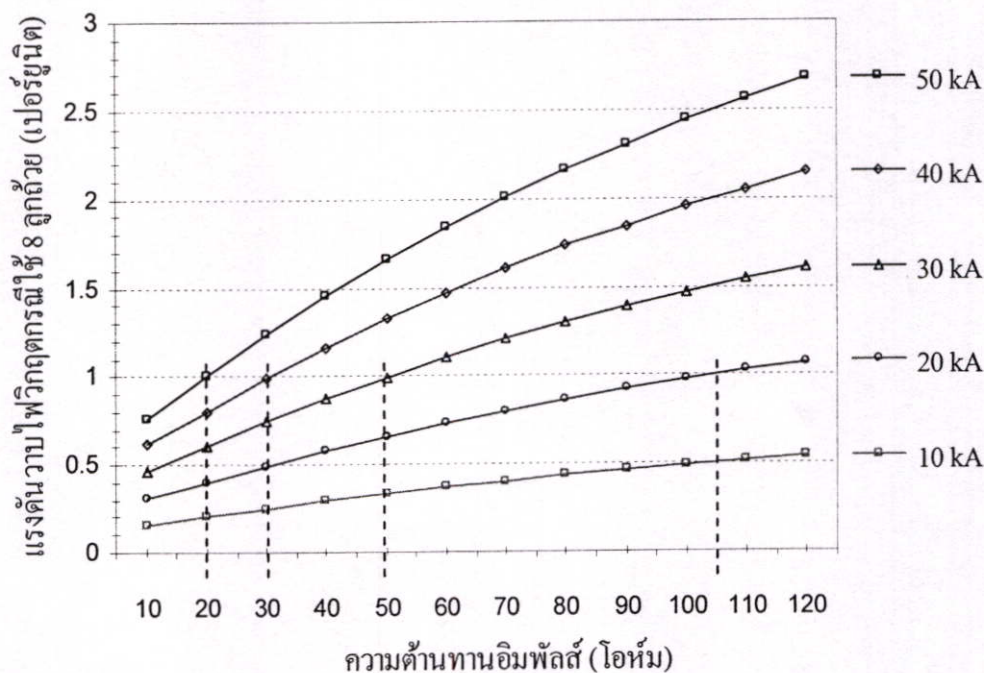


รูปที่ 4.47 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.31 และรูปที่ 4.48 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวบบไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 110 เมตร

ตารางที่ 4.31 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวบบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.15	0.31	0.46	0.61	0.77
20	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
30	0.25	0.49	0.74	0.99	1.24
40	0.29	0.58	0.87	1.16	1.45
50	0.33	0.66	0.99	1.33	1.66
60	0.37	0.74	1.10	1.47	1.84
70	0.40	0.80	1.21	1.61	2.01
80	0.43	0.87	1.30	1.73	2.17
90	0.46	0.92	1.39	1.85	2.31
100	0.49	0.98	1.46	1.95	2.44
110	0.51	1.03	1.54	2.05	2.57
120	0.54	1.07	1.61	2.15	2.68

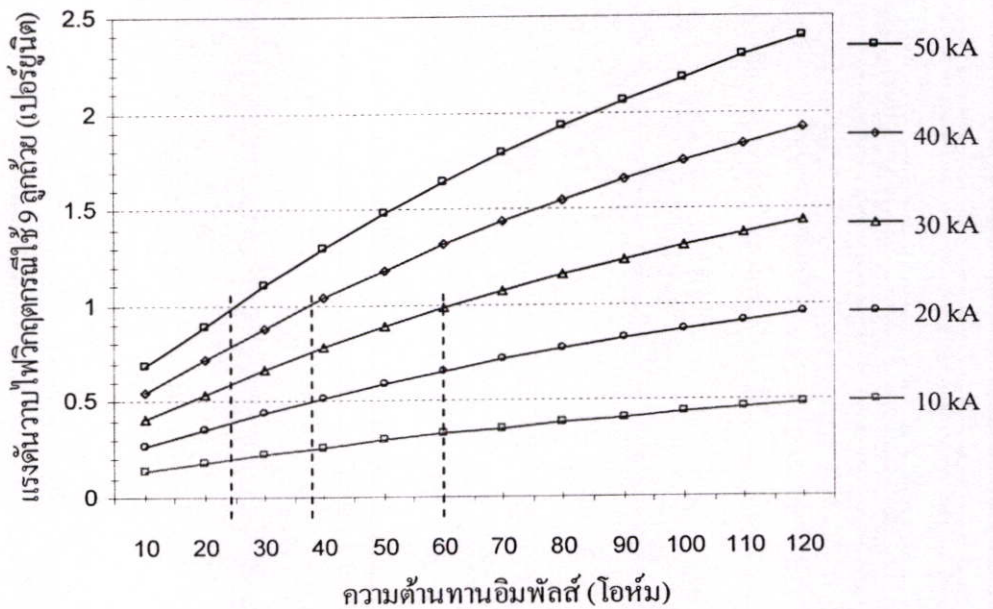


รูปที่ 4.48 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวบบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.32 และรูปที่ 4.49 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤต (จาก ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 110 เมตร

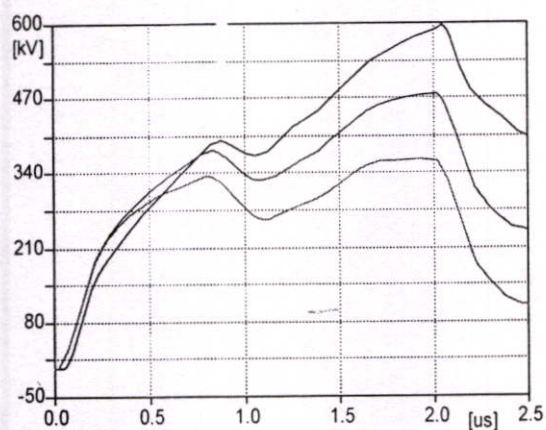
ตารางที่ 4.32 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.14	0.27	0.41	0.55	0.68
20	0.18	0.36	0.54	0.71	0.89
30	0.22	0.44	0.66	0.88	1.10
40	0.26	0.52	0.78	1.04	1.30
50	0.30	0.59	0.89	1.18	1.48
60	0.33	0.66	0.99	1.32	1.65
70	0.36	0.72	1.08	1.44	1.80
80	0.39	0.77	1.16	1.55	1.93
90	0.41	0.82	1.24	1.65	2.06
100	0.44	0.87	1.31	1.74	2.18
110	0.46	0.92	1.38	1.83	2.29
120	0.48	0.96	1.44	1.92	2.40



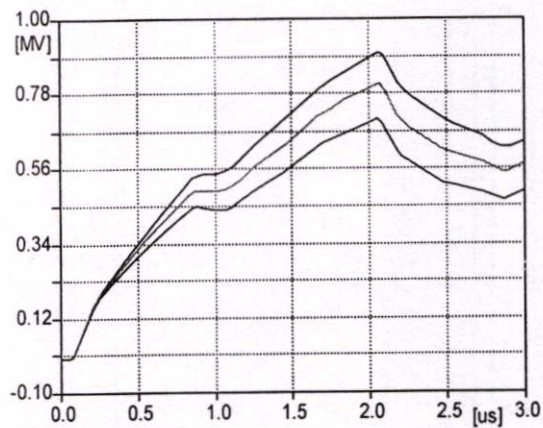
รูปที่ 4.49 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาวไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

จากรูปที่ 4.50 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปด้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 120 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



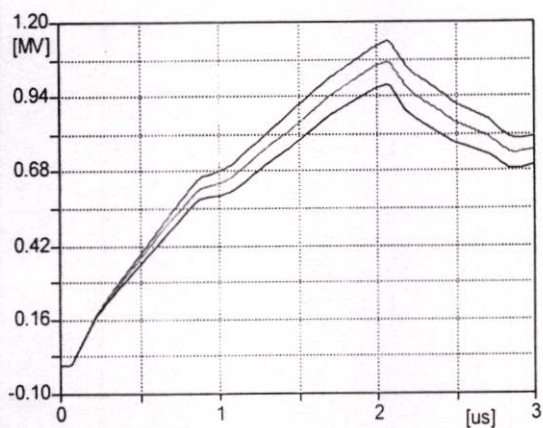
r30.pl4: v:PC -X0033C
r20.pl4: v:PA -X0033A
r10.pl4: v:PA -X0033A

(ก)



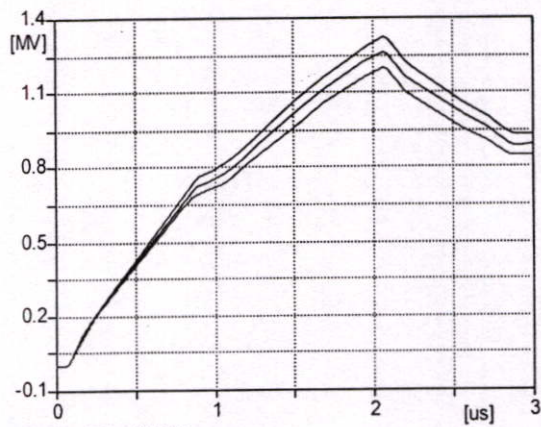
r60.pl4: v:PC -X0033C
r50.pl4: v:PC -X0033C
r40.pl4: v:PC -X0033C

(ข)



r90.pl4: v:PC -X0033C
r80.pl4: v:PC -X0033C
r70.pl4: v:PC -X0033C

(ค)

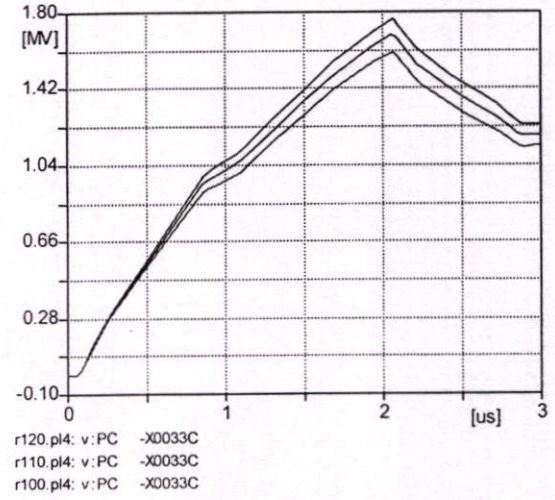
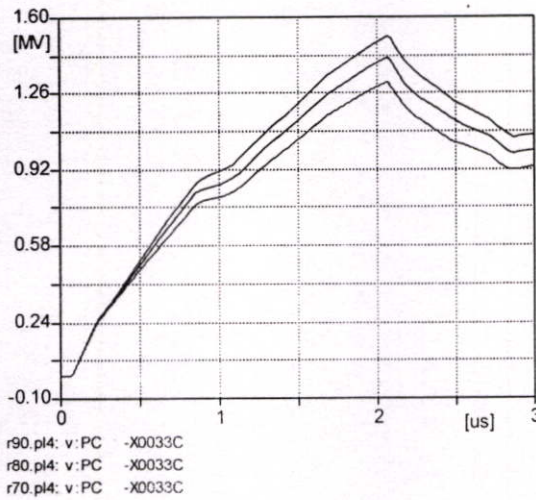
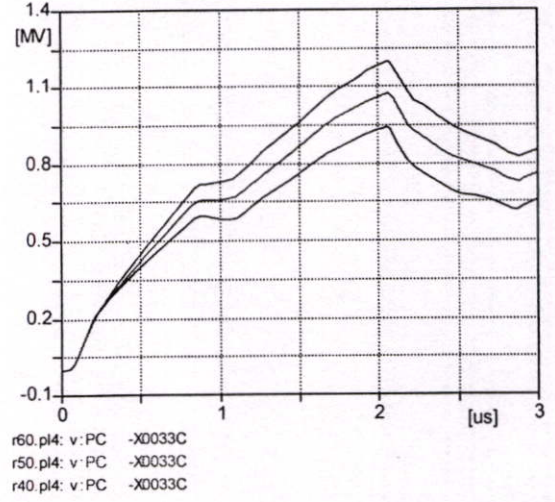
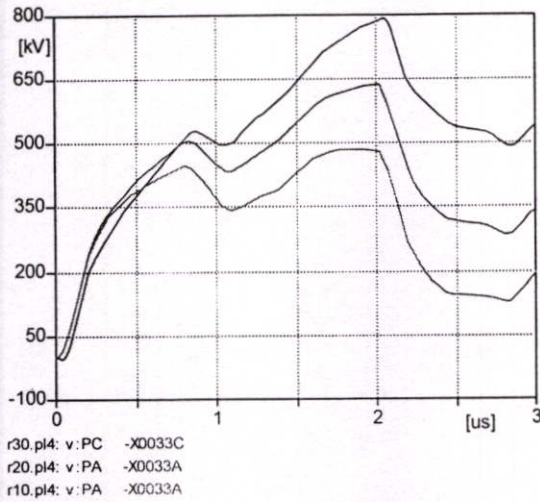


r120.pl4: v:PC -X0033C
r110.pl4: v:PC -X0033C
r100.pl4: v:PC -X0033C

(ง)

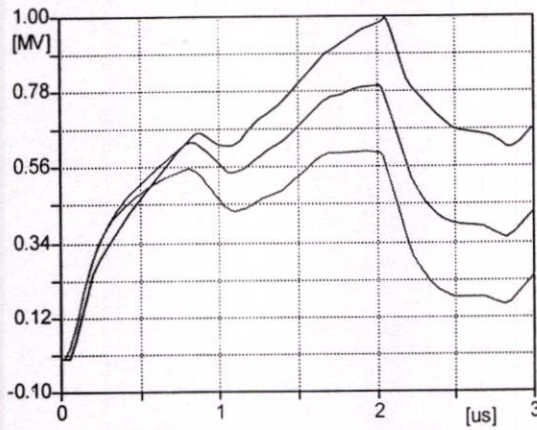
รูปที่ 4.50 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 30 kA ในระยะห่างเสา 120 เมตร

จากรูปที่ 4.51 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 120 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



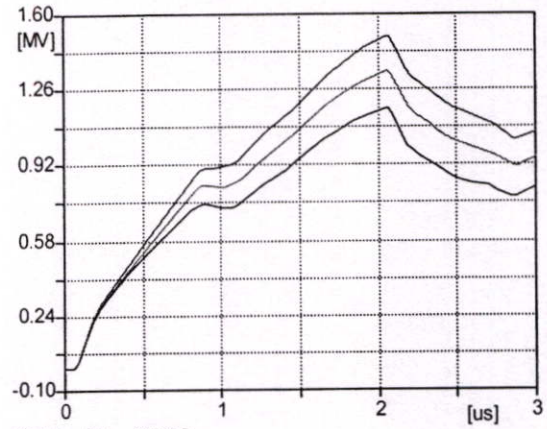
รูปที่ 4.51 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 40 kA ในระยะห่างเสา 120 เมตร

จากรูปที่ 4.52 (ก - ง) แสดงค่าแรงดันตกคร่อมรูปถ้วย ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 120 เมตร ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 - 120 โอห์ม จากการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม ATP-EMTP



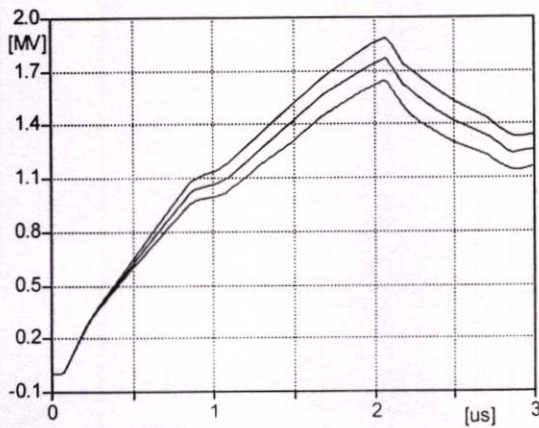
r30.pl4: v:PC -X0033C
r20.pl4: v:PA -X0033A
r10.pl4: v:PA -X0033A

(ก)



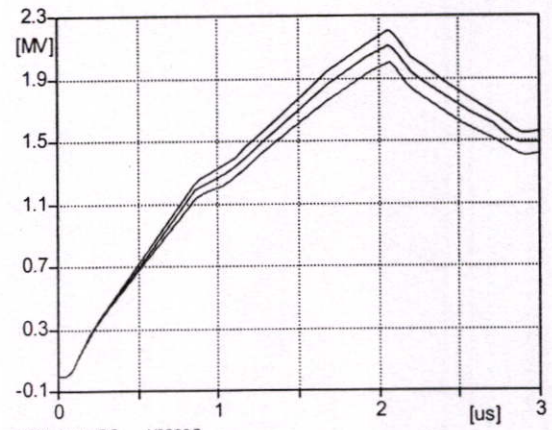
r60.pl4: v:PC -X0033C
r50.pl4: v:PC -X0033C
r40.pl4: v:PC -X0033C

(ข)



r90.pl4: v:PC -X0033C
r80.pl4: v:PC -X0033C
r70.pl4: v:PC -X0033C

(ค)



r120.pl4: v:PC -X0033C
r110.pl4: v:PC -X0033C
r100.pl4: v:PC -X0033C

(ง)

รูปที่ 4.52 กราฟแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยสูงสุด ที่กระแสฟ้าผ่า 50 kA ในระยะห่างเสา 120 เมตร

จากตารางที่ 4.33 แสดงแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์ 10 – 120 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10 – 50 กิโลแอมแปร์ ของการปิกเสาวาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 120 เมตร

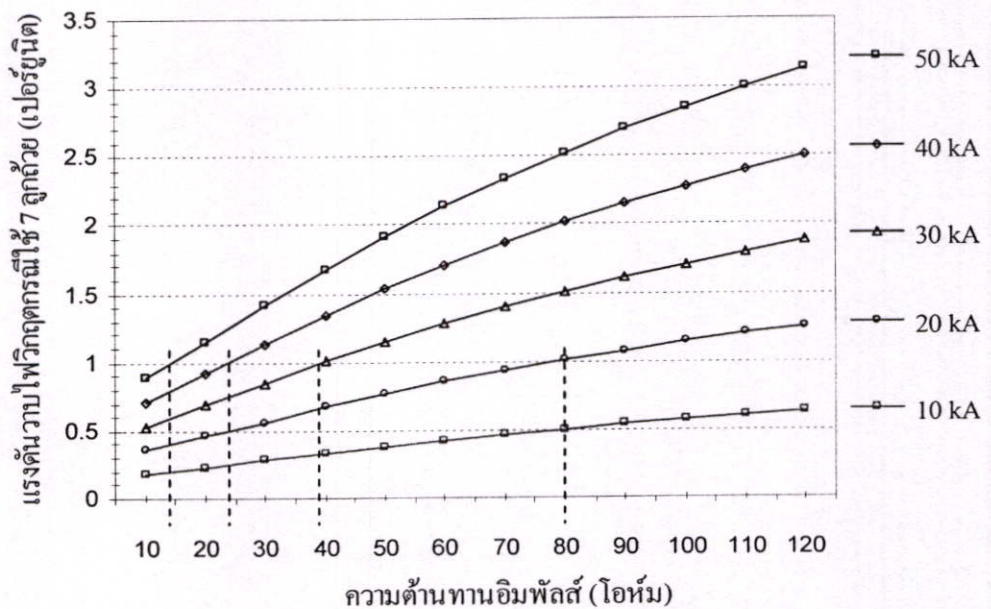
ตารางที่ 4.33 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ของการปิกเสาวาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 120 เมตร.

ความต้านทาน อิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	124,655	249,309	373,964	498,619	623,274
20	161,605	323,211	484,816	646,421	808,027
30	198,409	396,818	595,227	793,636	992,046
40	235,873	471,746	707,619	943,492	1,179,360
50	269,680	539,360	809,040	1,078,720	1,348,400
60	300,417	600,833	901,250	1,201,670	1,502,080
70	328,516	657,032	985,547	1,314,060	1,642,580
80	354,377	708,753	1,063,130	1,417,510	1,771,880
90	378,289	756,578	1,134,870	1,513,160	1,891,450
100	400,505	801,010	1,201,510	1,602,020	2,002,520
110	421,248	842,496	1,263,740	1,684,990	2,106,240
120	440,687	881,374	1,322,060	1,762,750	2,203,440

จากตารางที่ 4.34 และรูปที่ 4.53 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวบไฟวิกฤต (จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปกเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 120 เมตร

ตารางที่ 4.34 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.18	0.36	0.53	0.71	0.89
20	0.23	0.46	0.69	0.92	1.15
30	0.28	0.57	0.85	1.13	1.41
40	0.34	0.67	1.01	1.34	1.68
50	0.38	0.77	1.15	1.54	1.92
60	0.43	0.86	1.28	1.71	2.14
70	0.47	0.94	1.40	1.87	2.34
80	0.50	1.01	1.51	2.02	2.52
90	0.54	1.08	1.62	2.15	2.69
100	0.57	1.14	1.71	2.28	2.85
110	0.60	1.20	1.80	2.40	3.00
120	0.63	1.26	1.88	2.51	3.14

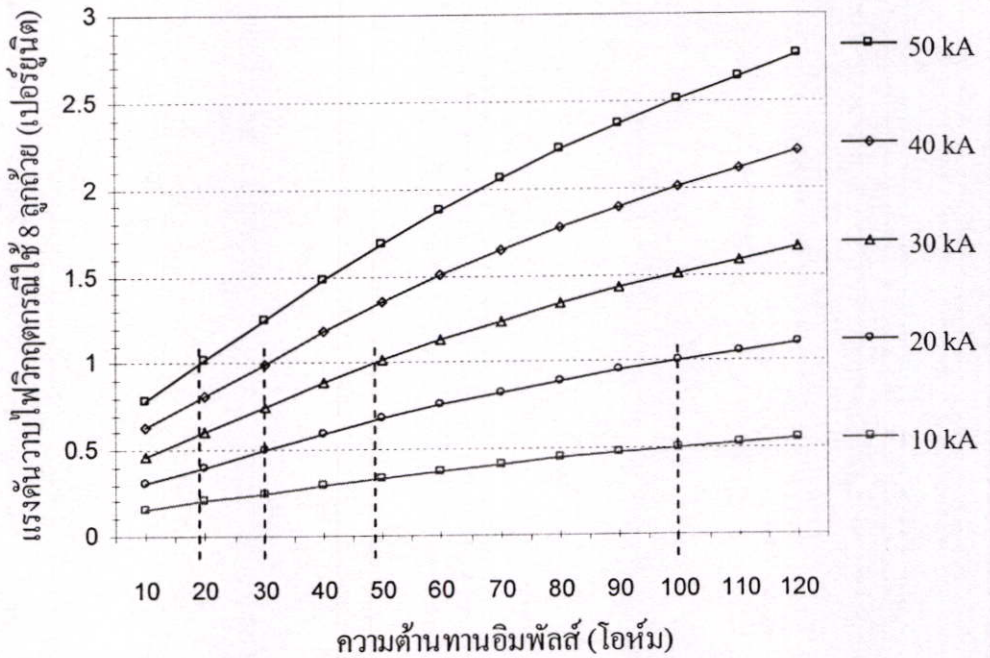


รูปที่ 4.53 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.35 และรูปที่ 4.54 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤต (จาก ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 120 เมตร

ตารางที่ 4.35 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.16	0.31	0.47	0.63	0.78
20	0.20	0.41	0.61	0.81	1.01
30	0.25	0.50	0.75	1.00	1.24
40	0.30	0.59	0.89	1.18	1.48
50	0.34	0.68	1.01	1.35	1.69
60	0.38	0.75	1.13	1.51	1.88
70	0.41	0.82	1.24	1.65	2.06
80	0.44	0.89	1.33	1.78	2.22
90	0.47	0.95	1.42	1.90	2.37
100	0.50	1.00	1.51	2.01	2.51
110	0.53	1.06	1.58	2.11	2.64
120	0.55	1.11	1.66	2.21	2.76

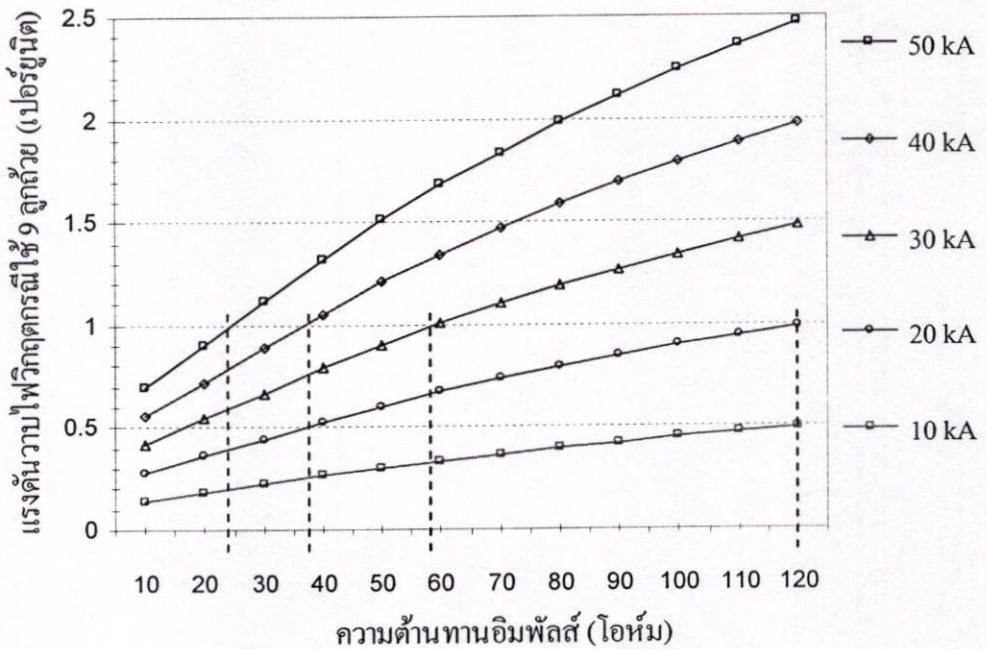


รูปที่ 4.54 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาบไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

จากตารางที่ 4.36 และรูปที่ 4.55 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤต (จาก ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 3.1) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความ ด้านทานอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า ของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าที่ระยะห่าง 120 เมตร

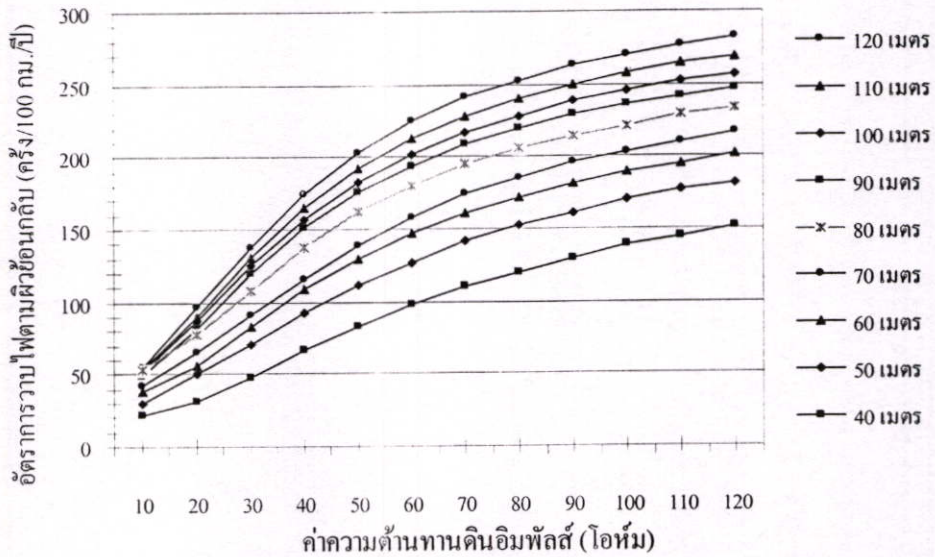
ตารางที่ 4.36 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

ความต้านทาน อิมพัลส์ (โอห์ม)	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)				
	10	20	30	40	50
10	0.14	0.28	0.42	0.56	0.70
20	0.18	0.36	0.54	0.72	0.91
30	0.22	0.44	0.67	0.89	1.11
40	0.26	0.53	0.79	1.06	1.32
50	0.30	0.60	0.91	1.21	1.51
60	0.34	0.67	1.01	1.35	1.68
70	0.37	0.74	1.10	1.47	1.84
80	0.40	0.79	1.19	1.59	1.98
90	0.42	0.85	1.27	1.69	2.12
100	0.45	0.90	1.35	1.79	2.24
110	0.47	0.94	1.42	1.89	2.36
120	0.49	0.99	1.48	1.97	2.47

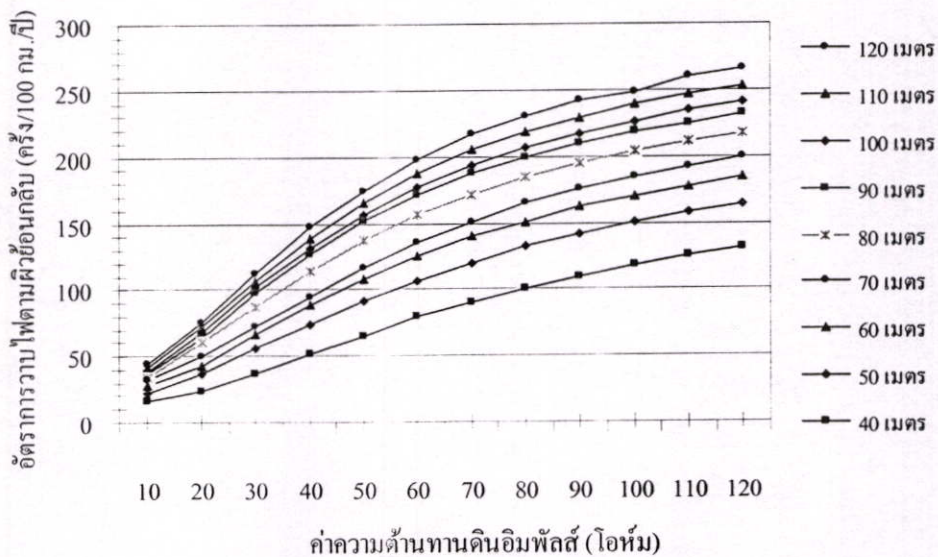


รูปที่ 4.55 กราฟเปอร์เซ็นต์ของแรงดันวาทไฟวิกฤตกรณีใช้ลูกถ้วย 9 ลูกถ้วย

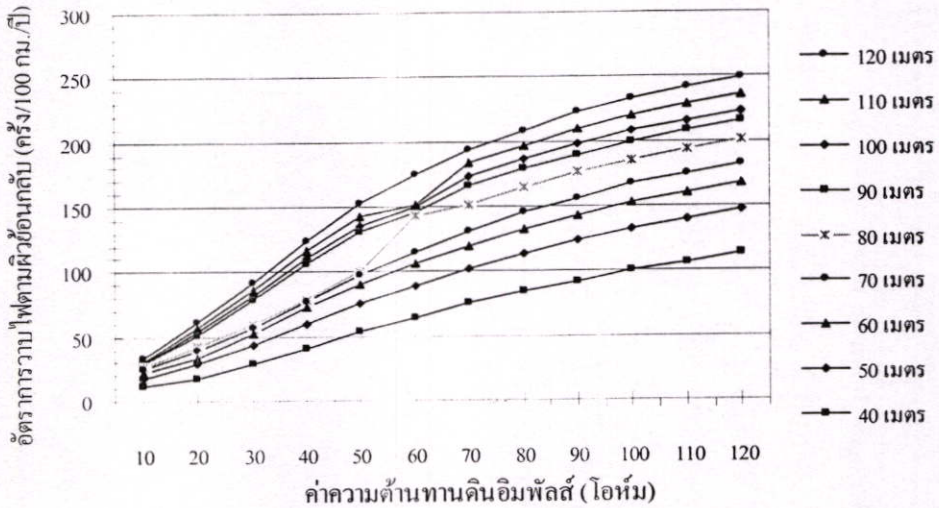
จากรูปที่ 4.56 – 4.58 แสดงค่าอัตราการเกิดการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี) จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าและค่าความต้านทานดินอิมพัลส์กับกระแสฟ้าผ่า กรณีใช้ลูกถ้วย 7 - 9 ลูกถ้วย



รูปที่ 4.56 กราฟอัตราการเกิดการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ 7 ลูกถ้วย (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี)



รูปที่ 4.57 กราฟอัตราการเกิดการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ 8 ลูกถ้วย (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี)



รูปที่ 4.58 กราฟอัตราการเกิดการรวบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีใช้ 9 ลูกถ้วย (ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี)

จากตารางที่ 4.37 – 4.39 และรูปที่ 59 – 61 แสดงค่าระหว่าง ระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้ากับความต้านทานอิมพัลส์ที่เหมาะสม ที่ค่ากระแสฟ้าผ่า 30–50 กิโลแอมแปร์ ในกรณีใช้ลูกถ้วย 7 - 9 ลูกถ้วย

ตารางที่ 4.37 แสดงค่าความต้านทานอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ต่อระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า กรณีใช้ลูกถ้วย 7 ลูกถ้วย

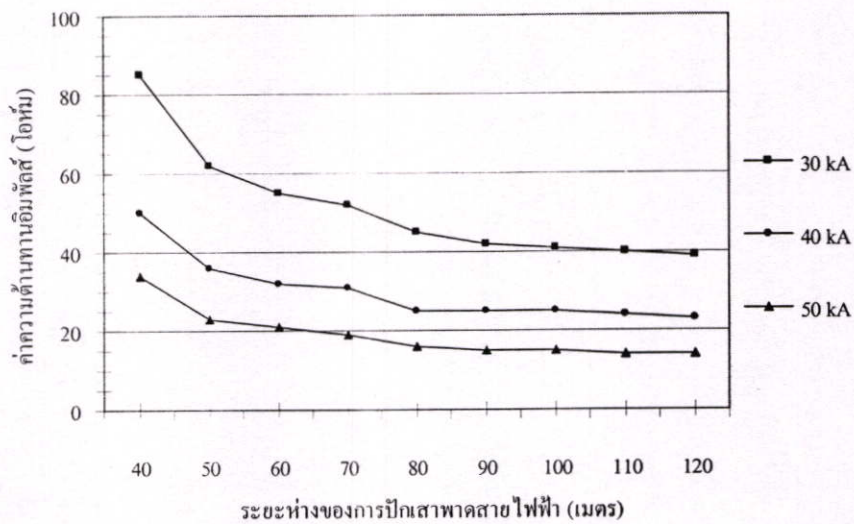
กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	ระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
30	85	62	55	52	45	42	41	40	39
40	50	36	32	31	25	25	25	24	23
50	34	23	21	19	16	15	15	14	14

ตารางที่ 4.38 แสดงค่าความต้านทานอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ต่อระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า กรณีใช้ลูกถ้วย 8 ลูกถ้วย

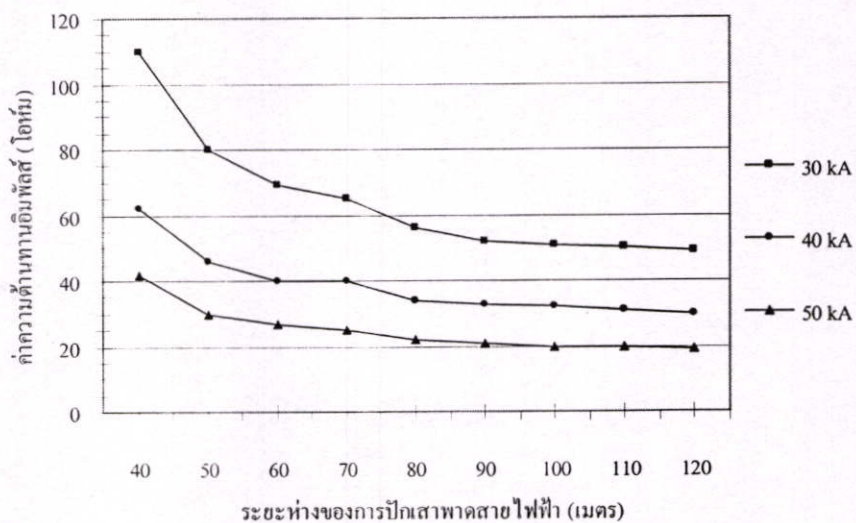
กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	ระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
30	110	80	69	65	56	52	51	50	49
40	62	46	40	40	34	33	32	31	30
50	42	30	27	25	22	21	20	20	19

ตารางที่ 4.39 แสดงค่าความต้านทานอิมพัลส์สูงสุดที่รับได้ต่อระยะห่างของการปักเสาพาดสาย
ไฟฟ้า กรณีใช้ลวดด้วย 9 ลูกถ้วย

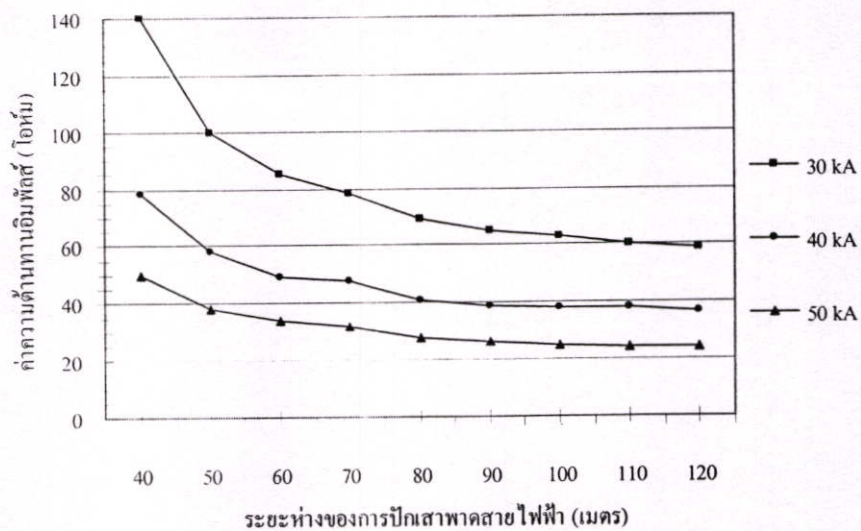
กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)	ระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
30	140	100	85	78	69	65	63	60	59
40	78	58	49	48	41	39	38	38	37
50	50	38	34	32	28	26	25	24	24



รูปที่ 4.59 กราฟระยะห่างเสาไฟฟ้ากับความต้านทานอิมพัลส์ที่เหมาะสม กรณีใช้ 7 ลูกถ้วย



รูปที่ 4.60 กราฟระยะห่างเสาไฟฟ้ากับความต้านทานอิมพัลส์ที่เหมาะสม กรณีใช้ 8 ลูกถ้วย



รูปที่ 4.61 กราฟระยะห่างเสาไฟฟ้ากับความต้านทานอิมพัลส์ที่เหมาะสม กรณีใช้ 9 ลูกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าและค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์กับค่ากระแสฟ้าผ่า กรณีใช้ลูกถ้วย 7 - 9 ลูกถ้วย เพื่อหาอัตราการเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ค่าระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าและค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสม ในกรณีที่ไม่สามารถวัดค่าความต้านทานดินที่ฐานเสาแต่ละต้นมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม (ความต้านทานอิมพีแดนซ์เท่ากับ 12.5 โอห์ม) ได้ตามมาตรฐานการไฟฟ้าภูมิภาค การวิเคราะห์ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามวัตถุประสงค์ของกรณีศึกษา

ส่วนที่ 1 การจำลองระบบสายส่ง 115 กิโลโวลต์ โดยใช้โปรแกรม ATP – EMTD เพื่อหาค่าแรงตกคร่อมลูกถ้วย ที่ระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า 40 – 120 เมตร ความต้านทานอิมพีแดนซ์ 10 – 120 โอห์ม ค่ากระแสฟ้าผ่า 10–50 กิโลแอมแปร์ (ขณะที่ประเทศไทยค่ายอดกระแสฟ้าผ่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 40 กิโลแอมแปร์) ในกรณีใช้ลูกถ้วย 7 - 9 ลูกถ้วย

ส่วนที่ 2 ผลการจำลองที่ได้เพื่อหาค่าแรงดันวาบไฟวิกฤตของลูกถ้วย 7 - 9 ลูกถ้วย

ส่วนที่ 3 ผลลัพธ์ที่ได้จาก ส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2 เพื่อหาอัตราการเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ค่าระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าและค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสม

กระแสฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEEE มีค่ายอดเฉลี่ยเท่ากับ 20 กิโลแอมแปร์ ขณะที่ประเทศไทยค่ายอดเฉลี่ยเท่ากับ 40 กิโลแอมแปร์ และระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า ส่วนใหญ่ของการไฟฟ้าภูมิภาคอยู่ที่ระยะ 80 เมตร ความต้านทานดินที่ฐานเสาแต่ละต้นตามมาตรฐานมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม แต่ความจริงบางพื้นที่ไม่สามารถจัดการค่าความต้านทานดินที่ฐานเสาได้ตามมาตรฐานหรือถ้าทำได้ก็อาจจะใช้การลงทุนที่สูง

ดังนั้นผลการวิเคราะห์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอแนะนำให้ทำการลดระยะห่างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้า หรือทำการเพิ่มจำนวนลูกถ้วยจากปกติ 7 ลูกถ้วย เป็น 8 – 9 ลูกถ้วย ตามความเหมาะสมของค่าความต้านทานดินในบริเวณนั้น ตามตาราง 4.37 – 4.39 ซึ่งเป็นค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ที่รับได้ (ไม่เกินค่าในตารางดังกล่าว) เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงจะทำให้เกิดการแรงดันวาบไฟที่พวงฉนวนลูกถ้วย น้อยที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] ส้ารวย สั้งค์สะอาด เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง กรุงเทพมหานคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [2] สุรพล ดำรงกิตติกุล และ ประดิษฐ์พงษ์ สุขศิริถาวรกุล. Application of Electromagnetic Transients Program for Electrical Transients in Power System. เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการ. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [3] IEC 60-1. High Voltage Test Techniques – Past 2 : Measuring System, 1994 – 11.
- [4] ส้ารวย สั้งค์สะอาด วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง กรุงเทพมหานคร สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ 2528.
- [5] Armstrong, H.R., and Whitehead, E.R. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding. IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS – 104, No.1, pp. 270-281 , 1968
- [6] IEEE Working Group. A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS – 104, No.4, pp. 919-932 , 1985
- [7] Anderson, R. B., and Eriksson, A. J. Lightning Parameters for Engineering Applications. ELECTRA No.69 , pp. 65-102 , 1980
- [8] Eriksson, A. J. The Incidence of Lightning Strikes to Transmission Line. IEEE Trans. On Power Delivery (July 1987) : 859-870
- [9] A.R.Hileman “Impulse Resistance of Ground Electrodes” Chapter 10(Appendix 2) of Insulation Coordination for Power Systems, Marcel Dekker, Inc., New York, P.438, 1999.
- [10] IEEE Working Group. Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II Updates to Analytical Models. IEEE Trans. On Power Delivery Vol. 8, No.3(July 1993): 1254-1267
- [11] Golde, R. H. (ed.). Lightning. London: Academic Press, 1977.
- [12] IEEE Std. C62.22. “IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, 1997
- [13] R. Alberto, V. Moreno, V. Naredo and Z. Guardado “Non Unitform Line Tower

Model for Lighting Transient Studies" International Conference on Power System Transients, 2001.

- [14] T. Hara, O.Yamamoto : "Modeling of a Transmission Tower for Lighting sure analysis" IEE Proceeding. Generation Transmission Distribution Vol.143, No.3 May 1996.
- [15] IEEE PES Special Publication edited by A.M. Gole, J. Martinez Valesco, A.J.F. Keri, "Modeling and Analysis of System Transients" IEEE Working Group 15.08.09, IEEE Publication No.99TP133-0.
- [16] IEEE Standard 1243-1997. "IEEE Guide for Improving the Lighting Performance of Transmission Line". 1997.
- [17] A.EI-Morshedy "Grounding System" Chapter 13 of High Voltage Engineering, Marcel Dekker, Inc., New York, P.427-428, 2000.
- [18] M. Jambak and H. Ahmad "Measurement of Grounding System Resistance Based on Ground High Frequency Behavior for Different Soil Type" IEEE Transaction on Power Delivery, P.207-211, 2000.
- [19] H. Jinliang, Z. Rong, C. shuiming, L. Siyun and W. Weihang "Impulse Characteristics of Grounding System of Transmission Line Towers in the Regions with High Soil Resistivity" IEEE Transaction on Power Delivery, P.156-162, 1998.
- [20] Yamamoto, Y., et al. A New Application Concept of Transmission Line Arresters to 500 kV Lines, IEEE Transmission and Distribution Conference, Vol. 2 (April 1999): 681-686.

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ศุภชัย แซ่เจียม มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ และสมชาติ จิรวินาทร “อัตราการวาบไฟตามผิวเนื่องจากผลต่างของความต้านทานดินระหว่างเสา กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 115 กิโลโวลต์” Electrical Engineering Conference (EECON27), Khonkaen, Thailand, November 2004.

อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวเนื่องจากผลต่างของความต้านทานดินระหว่างเสา กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 115 กิโลโวลต์

Flashover Rates due to Effects of the Different Pole Footing Resistance between Adjacent Poles From Direct Lightning Strikes on 115 kV Pole

ศุภชัย แซ่เจียม มณฑล ฉิดาจินดา ไกรฤกษ์ และสมชาติ จิววิภากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ

โทร : 0-2326-4550 โทรสาร 0-2326-4550 E-mail: ssc2514@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ เป็นการวิเคราะห์อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวตามลูกถ้วย อันเนื่องมาจากผลต่างของความต้านทานดินที่ฐานเสาข้างเคียง กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 115 kV ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมและจากการวิเคราะห์พบว่า ความแตกต่างของความต้านทานอิมพีแดนซ์ของดินที่ฐานเสา กับเสาข้างเคียง เมื่อมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม จะไม่ทำให้อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวมีค่าเปลี่ยนแปลง

คำสำคัญ: ฟ้าผ่าลงโดยตรง, ผลต่างของความต้านทานดินที่ฐานเสา, อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิว

Abstract

This paper analyzes the effects of the different pole footing resistances between adjacent poles on lightning flashover rate from direct stroke on 115 kV pole with ATP-EMTP program. The simulated and analyzed results show that the different pole footing resistance between adjacent poles which is lower than 5 ohms does not affect the flashover rate.

Keywords: direct lightning stroke, different pole footing resistance, flashover rate.

1. คำนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนชื้นที่มีอัตราวาเกิดฟ้าผ่าค่อนข้างสูง การเกิดฟ้าผ่าลงโดยตรงหรือลงในบริเวณข้างเคียงจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟดับ และที่ผ่านมาก็ได้มีการพัฒนาวิธีการป้องกันความเสียหายจากฟ้าผ่าหลายวิธีด้วยกัน เช่น การจัดการฉนวนแบบไม่สมมาตรหรือเพิ่มจำนวนฉนวนลูกถ้วยให้มากกว่าปกติ การเพิ่มค่าปลิงของสายดิน การลดมุมป้องกัน การลดความต้านทานดิน และการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า เป็นต้น

การป้องกันแรงดันเกินจากการเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงนั้น วิธีการพื้นฐานหนึ่งก็คือการออกแบบความต้านทานดินที่ฐานเสาและระยะห่างเสาให้เหมาะสมกับระบบ แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบความต้านทานดินที่ฐานเสาให้มีความเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดนั้น สามารถทำได้ค่อนข้างยากในพื้นที่ที่เป็นภูเขา เป็นต้น

ดังนั้นในบทความนี้จะทำการวิเคราะห์อัตราการเกิดวาไฟฟ้าตามผิวตามลูกถ้วย อันเนื่องมาจากผลต่างของความต้านทานดินที่ฐานเสาไฟฟ้ากับเสาข้างเคียง กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 115 kV ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP โดยจะทำการพิจารณาจากสายดินชนิดแห้งและพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่ามีค่าต่างๆ กัน

2. การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่า

2.1 ความต้านทานดินที่ฐานเสา

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงเสาไฟฟ้าโดยตรง กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะไหลผ่านรากสายดินลงดิน ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นรอบๆ รากสายดินโดยแปรเปลี่ยนตามเวลา เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของดิน (E_c) จะทำให้ดินรอบตัวนำเกิดการเบรกดาวน์เปรียบเสมือนรากสายดินมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานดินในบริเวณนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไป เรนเรียกว่าความต้านทานนี้ว่าความต้านทานอิมพีแดนซ์

ความต้านทานอิมพีแดนซ์ของดิน จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปทรงทางเรขาคณิตของรากสายดิน(ขนาดและความลึก) สภาพความต้านทานของดิน รูปคลื่นและขนาดของกระแสอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความต้านทานที่ความถี่กำลัง ตามสมการ[2]

$$R_f = \alpha R_0 \quad (1)$$

เมื่อ R_f คือ ความต้านทานอิมพีแดนซ์ของดิน Ω
 R_0 คือ ความต้านทานดินที่ความถี่ต่ำ Ω
 α คือ สัมประสิทธิ์อิมพีแดนซ์

ความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง จะขึ้นอยู่กับชนิดของรากสายดินและสภาพความต้านทานดินโดยรอบในบริเวณนั้น กรณีรากสายดินเป็นชนิดแห้ง ความต้านทานดินที่ฐานเสา หาได้จากสมการ

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (2)$$

เมื่อ

- ρ คือ สภาพความต้านทานดิน $\Omega \cdot m$
- l คือ ความยาวของรากสายดิน m
- d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของรากสายดิน m

2.2 พหาวมิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่า

ในการคำนวณแรงดันเกินจากฟ้าผ่า ทำการพิจารณาฟ้าผ่าได้เสมือนกับเป็นแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งอาจจะเป็นขั้วบวก ขั้วลบ หรือมีทั้งขั้วบวกและขั้วลบอยู่ในอัตราเสไฟฟ้าผ่านเดียวกัน และรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าขึ้นอยู่กับขั้วของกระแสฟ้าผ่าและสิ่งที่มีอยู่ในบริเวณนั้นเช่น โครงสร้างที่มีความสูงหรือภูเขา ซึ่งอาจจะมีผลทำให้เกิดการคิดเทียบของคลื่นฟ้าผ่าได้

โดยทั่วไป ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของพหาวมิเตอร์กระแสฟ้าผ่าจะถูกกำหนดอยู่ในทอมของ การแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล (log-normal distribution) และความน่าจะเป็นที่จะเกิดกระแสฟ้าผ่าจะสูงกว่ากระแสวิกฤตของฉนวนลูกถ้วย. $P(I)$ สามารถประมาณได้จาก [3]

$$P(I \geq i_0) = \frac{1}{1 + (i_0/31)^{2.6}} \quad (3)$$

2.3 ความสูงโครงสร้าง

ฟ้าผ่าจะมีความสำคัญต่อความน่าเชื่อถือในการจำหน่ายไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าฟ้าผ่ามีความสูงและอยู่ในที่โล่งแจ้ง ดังนั้นอัตราการเกิดฟ้าผ่าหรือจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าลงสาย กวเมื่ออยู่ในที่โล่งแจ้ง สามารถหาได้จากสมการ[3]

$$N_z = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (4)$$

- เมื่อ h คือ ความสูงเสา (เมตร)
 - b คือ ความกว้างโครงสร้าง (เมตร)
 - และ N_g คือ จำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าลงดิน (ครั้ง/ตร.กม.-ปี)
- จำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าลงดินสามารถประมาณหาได้จากจำนวนวันที่ได้ยินเสียงฟ้าร้องใน 1 ปี, T_d ตามสมการ [3]

$$N_g = 0.047_d^{1.25} \quad (5)$$

2.4 อัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิว

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรง กระแสฟ้าผ่าและประจุจะเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างเสาตามสายตัวนำลงดินที่ฝังอยู่ภายในเสาของผู้ดินและสะท้อนกลับจากดินขึ้นสู่ยอดเสา และอีกส่วนหนึ่งจะแตกออกไปยังเสาข้างเคียงผ่านสายต่อฟ้า และเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยด้วยแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำมีค่าสูงกว่า

แรงดันวบไฟฟ้าตามผิวสัมผัสวิกฤตของทงตนวนลูกถ้วยที่จะเกิดการลัดวงจร ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟดับ ดังนั้นอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวหาได้จากสมการ[4]

$$BFR = N_z P(I) \quad (6)$$

3. ข้อมูลและแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1 ข้อมูลของระบบ 115 kV

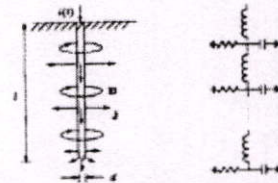
ในการวิเคราะห์จะทำการพิจารณา ระบบ 115 kV แบบวงจรเดี่ยวที่มีการจัดวางสายเฟสในแนวตั้งประกอบด้วยสายตัวนำ 3 เฟสชนิด AAC ขนาด 400 มม². สายต่อฟ้า 1 เส้นเป็นชนิดสายเหล็กตีเกลียว และเสาเสาคอนกรีตมีความสูง 22 เมตร สายต่อฟ้าจะทำการต่อลงดินโดยผ่านสายตัวนำลงดินที่ฝังในเสาคอนกรีตทุกต้นของเสาตงไปยังระบบรากสายดิน ซึ่งเป็นชนิดแท่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 เมตร มีความยาว 2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การจัดวางสายเฟสเดี่ยวของระบบ 115 kV

3.2 แบบจำลองความต้านทานดินที่ฐานเสา

ความต้านทานดินที่ฐานเสาจะแทนด้วยแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งประกอบด้วยความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า และความต้านทานของรากสายดิน[1],[5]



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของระบบรากสายดิน เนื่องจากผลของกระแสฟ้าผ่า

3.3 ฉนวนลูกถ้วย

ระบบจำหน่าย 115 kV ติดตั้งฉนวนลูกถ้วยแขวนเปอร์เซเลนแบบ 52-3 หรือ 52-8 จำนวน 7 ลูก ซึ่งแต่ละลูกมีค่าแรงดันวบไฟฟ้าตามผิวสัมผัสวิกฤตทางบวกและลบอย่างน้อย 125 kV และ 130 kV (ตามมาตรฐาน มอก. 354-2523)

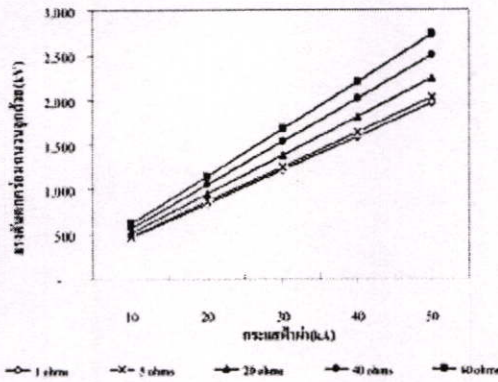
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

กระแสฟ้าผ่า	อิมพัลส์ ขนาด 10 - 50 kA
	ความชันหน้าคลื่นเป็น 0.5, 1, 1.2 และ 2 μ s
	เสิร์จอิมพีแดนซ์ของลวดฟ้าผ่า 400 Ω
สายล่อฟ้า	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 0.6675 cm
	ความต้านทานกระแสตรง 9.4 Ω /km
	Frequency Dependent Model
สายตัวนำ	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 2.611 m
	ความต้านทานกระแสตรง 0.0715 Ω /km
เสาไฟฟ้า(1)	ความสูง 22 m
	เสิร์จอิมพีแดนซ์ 450 Ω
	ระยะห่างเสา 80 m
	ความเร็วในการกระจายคลื่น 300 m/ μ s
ลูกถ้วยแขวน	ค่าความจุ 80 pF/plin
รากสายดิน(1,5)	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 1.6 cm ฮิว 2 m
	ความต้านทานอิมพัลส์ 1 -60 Ω
	ความต้านทานสัมผัสดิน 100 Ω .m

4. ผลการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์การประเมินสมรรถนะที่ค่าจากผลต่างความต้านทานดินระหว่างเสา กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงในระบบ 115 kV เมื่อระยะห่างระหว่างเสากับกัน 80 เมตร ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP คือ การเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสฟ้าผ่า เวลาหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่าและผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสาระหว่างเสากี่ค่าต่างๆ กัน

4.1 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย

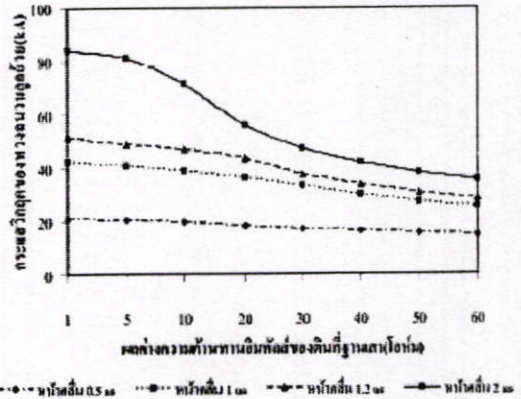


รูปที่ 3 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยระบบ 115 kV (จำนวน 7 ลูก) เมื่อเวลาหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่าเท่ากับ 0.5 μ s

จากรูปพบว่า เมื่อผลต่างของความต้านทานดินพัลส์ของดินที่ฐานเสามีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าใกล้เคียงกัน

4.2 กระแสวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วย

กระแสวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วยหาได้จากกราฟของค่าเกิดฟ้าผ่าลงเสาโดยตรงด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เมื่อระยะห่างเสา 80 เมตร แล้วทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่าและผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินระหว่างเสามีค่าต่างๆ กัน ก็จะได้ค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยตามในรูปที่ 3 และทำให้ทราบค่ากระแสวิกฤตเมื่อพิจารณาพวงฉนวนลูกถ้วยมีค่าแรงดันไฟฟ้าตามผิวอิมพัลส์เท่ากับ 875 kV ดังแสดงในรูปที่ 4

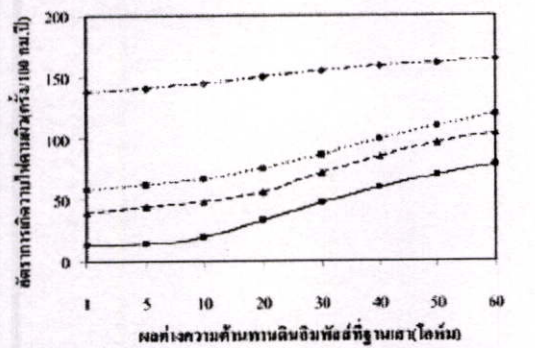


รูปที่ 4 กระแสวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วยจำนวน 7 ลูก

จากรูปที่ 4 พบว่าที่เวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่าเท่ากับ 0.5 μ s กระแสวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วยมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสามีค่าต่างๆ กัน และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหน้าคลื่นเป็น 1, 1.2 และ 2 μ s กระแสวิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าต่างกันเมื่อผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสามีค่าน้อยกว่า 30 โอห์ม

4.3 อัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิว

ในการคำนวณหาอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวของพวงฉนวนลูกถ้วยในระบบ 115 kV ทำการพิจารณาจำนวนวันที่ได้อินเลียงฟ้าร้องเท่ากับ 90 วัน/ปี ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของประเทศไทย อัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวของพวงฉนวนลูกถ้วยเมื่อผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสามีค่าต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวของพวงฉนวนลูกถ้วยระบบ 115 kV

จากรูปแสดง ให้เห็นว่าที่เวลาหน้าคลื่นมากกว่า 1 μs อัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวจะขึ้นอยู่กับผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสา กล่าวคือเมื่อผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสามีไม่เกิน 5 โอห์ม อัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวจะมีค่าใกล้เคียงกันที่แต่ละเวลาหน้าคลื่น แต่เมื่อผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสามีมากกว่า 5 โอห์ม อัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวจะมีต่างกันที่แต่ละเวลาหน้าคลื่น โดยจะขึ้นอยู่กับผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสา

5. สรุป

การจำทอของข้อหาอัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวจนวนลูกถ้วย กรณีเกิดฟ้าผ่าองเสาโดยตรงด้วยโปรแกรม ATP-EMTP สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อเกิดฟ้าผ่าองเสาโดยตรง กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะไหลผ่านรากสายดินของฐาน เสา และอีกส่วนหนึ่งจะแยกไหลไปยังเสาข้างเคียงผ่านสายล่อฟ้า และเหนี่ยวป่าทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ด้านแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวป่ามีค่าสูงกว่าค่าแรงดันวบบไฟฟ้าตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงฉนวนลูกถ้วยที่จะเกิดการฉัดวงจรทำให้เกิดไฟฟ้าดับ
2. ที่เวลาหน้าคลื่นมากกว่า 1 μs ผลต่างความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสากับเสาข้างเคียงที่มีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม จะทำให้อัตราการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวจนวนลูกถ้วยมีค่าคงที่
3. ดังนั้นในทางปฏิบัติ การต่อลงดินของเสาไฟฟ้า จะต้องทำให้ความต้านทานอิมพัลส์ของดินที่ฐานเสาแต่ละต้นมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม (ความต้านทานดินที่ความถี่กำลังเท่ากับ 12.5 โอห์ม)

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลในการวิเคราะห์

เอกสารอ้างอิง

[1] สำเริง อินทาม่า, วันชัย จันทรผล, วิจิต เครือสุข และมนตรีชัย สุรกุล "ผลจากความแตกต่างของความต้านทานดินระหว่างเสาและขนาดสายตัวนำลงดินที่ฝังในเสาต่อแรงดันเกิน กรณีเกิดฟ้าผ่าองเสาในระบบ 115 กิโลโวลต์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.

[2] H. Jinliang, Z. Rong, C. Shuiming, L. Siyun and W. Weihan "Impulse Characteristics of Grounding Systems of Transmission Line Towers in the Regions with High Soil Resistivity" IEEE Transaction on Power Delivery, pp. 156-162, 1998.

[3] IEEE Std. 1410-1997 "IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines", 1997.

[4] A.R.Hileman "The blackflash" Chapter 10 of Insulation Coordination for Power Systems, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 373-420, 1999.

[5] A.El-Morshedy "Grounding System" Chapter 13 of High-Voltage Engineering, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 427-428, 2000.



ชูกชัย แจ้ชัยม สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม เมื่อปี พ.ศ.2537 ปัจจุบันศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่สถาบันเทคโนโลยีพระ

จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



มณฑล ฉีดอนตาไกรฤกษ์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรอง

ศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิชาที่สนใจ Power System, Power System Protection, Power System Planning, Power System Co-operation.



สมชาติ จิวิวิทาทร สำเร็จการศึกษา Ph.D. in EE จาก Imperial College ลอนดอน ประเทศอังกฤษ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระ

จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิชาที่สนใจ Power System และ โครงข่ายประสานเทียม

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายศุภชัย แซ่เจียม
 วัน เดือน ปีเกิด 9 เมษายน 2514 ที่จังหวัดชุมพร
 ที่อยู่ 25/22 ซ.รามอินทรา 21 ถ.รามอินทรา แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน
 จ.กรุงเทพฯ 10260
 e-mail: supachai@spu.ac.th

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2533

มัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนศรีราษฎร์ จังหวัดชุมพร

พ.ศ.2537

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ประสบการณ์ทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2537-2540

Electrical Engineering บริษัท Asia Chemfin จำกัด

พ.ศ.2540-ปัจจุบัน

อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีปทุม