

การออกแบบระบบป้องกัน SURGE สำหรับระบบโทรศัพท์

A DESIGN OF SURGE PROTECTION SYSTEM FOR
TELEPHONE SYSTEM



สุรพล บุญจันทร์

SURAPOL BOONJUN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 43254
วัน, เดือน, ปี- 8 ส.ค. 2545

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

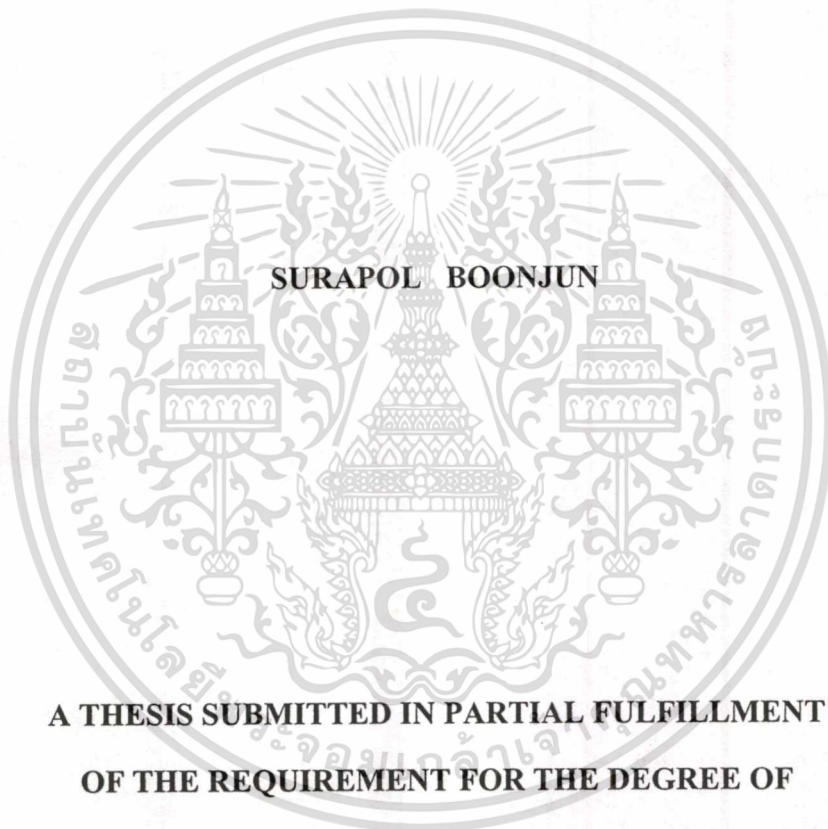
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-805-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A DESIGN OF SURGE PROTECTION SYSTEM FOR
TELEPHONE SYSTEM**



SURAPOL BOONJUN

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

2002

ISBN 974-648-805-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบป้องกัน Surge สำหรับระบบ โทรศัพท์
นักศึกษา	นายสุรพล บุญจันทร์
รหัสประจำตัว	39061065
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการออกแบบระบบป้องกัน Surge ที่อาจจะเข้ามาในระบบโทรศัพท์ ซึ่งจะทำให้ระบบโทรศัพท์เสียหายได้และการวางตำแหน่งของ Metal Oxide Varistor ซึ่งเป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จโดยการจำลองการวางอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ ตั้งแต่ Subscriber จนถึง Exchange โดย พิจารณาใช้รูปคลื่นทดสอบมาตรฐาน 8/20 μ s 3kA และ 10/1000 μ s 1kA ตามข้อกำหนด IEEE C 62.41-1991 มาเป็นรูปคลื่นเสิร์จในการจำลองผลและทำการเรียนแบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice ในรูปของกระแสและพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จ ผลลัพธ์การเลียนแบบแสดงให้เห็นถึงระยะการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เพื่อป้องกันให้ได้ดีที่สุด

Thesis Title	A Design of Surge Protection System for Telephone System
Student	Mr.Surapol Boonjun
Student ID.	39061065
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Kobchai Dejhan

ABSTRACT

This thesis proposes a design of surge protection system for using with telephone exchange system. The surge may damage the telephone exchange system, so the MOV surge position installation from the subscriber until the exchange is important to get rid of the surge. This thesis uses the standard testing waveforms $8/20 \mu\text{s}$ 3kA and $10/1000 \mu\text{s}$ 1 kA as the IEEE C 62.41- 1991 recommendation to be the surge waveform for using in the simulation in the function of stored current. The PSPICE simulation program is used for all simulation results. The simulation results show the distance of position of the surge protection system for the most suitable protection.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.กอบชัย
เดชหาญ ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอขอบคุณ อุษณิษ
บุญจันทร์ และ พลภัทร บุญจันทร์ ที่ให้กำลังใจตลอดการวิจัย รวมถึง นายสนธยา เมื่องน้อย ที่ให้คำ
ปรึกษาแนะนำในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการแก้ปัญหาต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย
ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือใน
ด้านต่าง ๆ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	1
บทที่ 2 เสรีจ.....	2
2.1 สาเหตุการเกิดเสรีจ.....	2
2.1.1 ผลกระทบจากฟ้าผ่า.....	2
2.1.1.1 การเชื่อมต่อโดยการเหนี่ยวนำ.....	2
2.1.1.2 การเชื่อมต่อโดยความจุ.....	2
2.1.1.3 การเชื่อมต่อโดยความต้านทาน.....	3
2.1.2 ผลกระทบจากการเปิด-ปิดของอุปกรณ์สวิตชิง.....	3
2.2 ความเสียหายจากเสรีจ.....	4
2.3 อัตราการเกิดเสรีจและระดับแรงดันในวงจรที่ไม่มีกำบัง.....	4
2.3.1 อัตราการเกิดเสรีจกับระดับแรงดันเสรีจ.....	4
2.3.2 ระดับเครื่องห่อหุ้ม.....	5
2.3.3 ลักษณะของรูปคลื่นเสรีจ.....	6
2.3.3.1 รังเวฟ.....	7
2.3.3.2 ไฮเอินเนอร์จีเสรีจ.....	7
2.3.3.3 ฟาซทรานเซียนท์.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 ประเภทสถานที่ตั้ง	8
บทที่ 3 การป้องกันเสิร์จ.....	11
3.1 หลักการป้องกันเสิร์จ.....	11
3.2 ทฤษฎีการทำงานของวาริสเตอร์.....	12
3.2.1 บทนำ.....	12
3.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ	13
3.2.3 โครงสร้างขนาดเล็กของวาริสเตอร์	14
3.2.4 ทฤษฎีการทำงาน	15
3.2.5 โครงสร้างของวาริสเตอร์.....	17
3.2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้า	19
3.3 การเลือกรูปคลื่นทดสอบ	24
3.3.1 รูปคลื่นทดสอบมาตรฐาน	24
3.3.2 รูปคลื่นทดสอบเสริม	30
บทที่ 4 ทฤษฎีพื้นฐานระบบโทรศัพท์.....	35
4.1 ระบบโทรศัพท์	35
4.1.1 ชุมสายโทรศัพท์	36
4.1.1.1 ชุมสายโทรศัพท์ที่มีเครื่องโทรศัพท์ของผู้เช่าต่อโดยตรง ...	36
4.1.1.2 ชุมสายโทรศัพท์ที่ไม่มีเครื่องโทรศัพท์ของผู้เช่าต่อโดยตรง	37
4.1.1.3 สัญญาณต่างๆในคู่สายโทรศัพท์ขององค์การโทรศัพท์ฯ ...	38
4.1.2 เครื่องโทรศัพท์.....	40
4.1.3 ลักษณะการติดต่อระหว่างเครื่องโทรศัพท์ของผู้เรียกและผู้ถูกเรียก ในชุมสายโทรศัพท์.....	45
บทที่ 5 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	48
5.1 การเขียนแบบการทำงาน.....	48
5.2 เงื่อนไขในการจำลองผล.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ผลการทดลอง.....	49
5.3.1 ตำแหน่งในการติดตั้งและระยะห่างที่เหมาะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ จำลองด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA.....	50
5.3.2 ตำแหน่งในการติดตั้งและระยะห่างที่เหมาะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ จำลองด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1 kA.....	54
5.3.3 ขนาดของอุปกรณ์เสิร์จ จำลองด้วยคลื่น 8/20 μ s 3 kA.....	58
5.3.4 ขนาดของอุปกรณ์เสิร์จ จำลองด้วยคลื่น 10/1000 μ s 1 kA.....	69
บทที่ 6 บทสรุป.....	80
6.1 สรุปผลการวิเคราะห์.....	80
เอกสารอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก.....	84
ภาคผนวก ข.....	92
ภาคผนวก ค.....	121
ประวัติผู้เขียน.....	122

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เปรียบเทียบหลักการป้องกัน.....	11
3.2 ขนาดทั่วไปของวาริสเตอร์.....	15
3.3 รูปคลื่นทดสอบมาตรฐานและรูปคลื่นทดสอบเสริมสำหรับตำแหน่งที่ตั้งต่าง ๆ	24
3.4 แรงดันและกระแสเสถียรที่ติดตั้งประเภทต่างๆ ของรูปคลื่นมาตรฐาน 0.5 μ s -100 kHz ..	25
3.5 แสดงค่าแรงดันและกระแสเสถียรที่ติดตั้งประเภทต่างๆ ของรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s - 8/20 μ s Combination wave.....	28
3.6 ระดับของเบิร์สต์ EFT.....	31
3.7 ระดับแรงดันของรูปคลื่น 10/1000 μ s	32
3.8 ระดับแรงดันของรูปคลื่น 10/1000 μ s	34
5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์ขจัดเสถียร	48
5.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองผล	49
5.3 ผลการเขียนแบบตำแหน่งในการติดตั้งและระยะห่างที่เหมาะสมของอุปกรณ์ ขจัดเสถียรในรูปของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานสะสมด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร โดยใช้ B32K130	50
5.4 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสถียรในรูปของ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานสะสมด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร โดยใช้สายโทรศัพทชนิด DW.....	59
5.5 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสถียรในรูปของ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานสะสมด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร โดยใช้สายโทรศัพทชนิด AP-FSF	60
5.6 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสถียรในรูปของ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานสะสมด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1 kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร โดยใช้สายโทรศัพทชนิด DW.....	70
5.7 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสถียรในรูปของ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานสะสมด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1 kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร โดยใช้สายโทรศัพทชนิด AP-FSF	71

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเชื่อมต่อโดยการเหนี่ยวนำ.....	2
2.2 การเชื่อมต่อโดยความจุ.....	3
2.3 การเชื่อมต่อโดยความต้านทาน.....	3
2.4 แสดงอัตราการเกิดเสิร์จกับระดับแรงดันในสถานที่ที่ไม่มีการป้องกัน.....	4
2.5 แสดง Isokeraunic map.....	6
2.6 ประเภทของสถานที่ตั้ง.....	9
3.1 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ.....	12
3.2 คุณลักษณะ V/I ของวาริสเตอร์.....	13
3.3 โครงสร้างขนาดเล็กของเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์.....	14
3.4 พฤติกรรมของค่าความจุไฟฟ้าต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของวาริสเตอร์.....	16
3.5 แถบพลังงานสำหรับเกรนของ ZnO ที่มีขอบเขตติดกับรอยต่อ ZnO.....	16
3.6 แบริเยเซียมความร้อนกับฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้.....	17
3.7 กระบวนการผลิตของวาริสเตอร์.....	18
3.8 รูปทรงของวาริสเตอร์.....	19
3.9 คุณลักษณะของกราฟ V-I ในรูปมาตราส่วนของ log-log.....	19
3.10 แบบจำลองทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์.....	20
3.11 วงจรเสมือนที่ระดับกระแสมีค่าต่ำ.....	20
3.12 ผลกระทบของอุณหภูมิในพื้นที่ leakage.....	21
3.13 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (dv/dT) ต่อกระแส.....	22
3.14 วงจรเสมือนที่การนำของวาริสเตอร์.....	22
3.15 ค่าความต้านทาน static (R_s) กับกระแส.....	23
3.16 ค่าความต้านทาน dynamic (Z_s) กับกระแส.....	23
3.17 วงจรเสมือนที่การ upturn ของวาริสเตอร์.....	24
3.18 แสดงรูปคลื่น 0.5 μ s-100 kHz Ring wave.....	25
3.19 แสดงรูปคลื่นรวมของแรงดันเปิดวงจร 1.2/50 μ s.....	27
3.20 แสดงรูปคลื่นรวมของกระแสลัดวงจร 8/20 μ s.....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21 แสดงลักษณะของรูปคลื่น $8/20 \mu\text{s}$ (เวลาหน้าคลื่น จุดเริ่มต้นที่แท้จริงและช่วงระยะเวลา)	28
3.22 แสดงคลื่นเบิรสต์ EFT.....	30
3.23 แสดงรูปคลื่น $10/1000 \mu\text{s}$	32
3.24 แสดงรูปคลื่นของ 5 kHz Ring wave.....	33
4.1 แสดงการเชื่อมต่อของผู้ใช้กับชุมสายโทรศัพท์โดยผ่านชุมสาย PABX.....	37
4.2 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างชุมสายโทรศัพท์และเครื่องโทรศัพท์ผู้ใช้.....	38
4.3 แสดงแถบความถี่ของสัญญาณเสียง.....	40
4.4 แสดงลักษณะสัญญาณพื้นฐานของระบบโทรศัพท์.....	42
4.5 แสดงลักษณะของสัญญาณที่เกิดจากการหมุนหมายเลข 4.....	42
4.6 แสดงค่าความถี่ในแต่ละหมายเลขของระบบโทรศัพท์ DTMF.....	43
4.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับโทรศัพท์.....	44
4.8 แสดงการติดต่อระหว่างผู้เรียกและผู้ถูกเรียกในชุมสายโทรศัพท์.....	47
5.1 รูปจำลองวงจรในการแสดงผล.....	48
5.2 ระดับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเลียนแบบตำแหน่งในการติดตั้งและระยะที่เหมาะสม เมื่อติดตั้ง B32K130 ด้วยรูปคลื่น $8/20 \text{ 3kA}$ ในรูปของกระแสไฟฟ้าของสาย AP-FSF	52
5.3 ระดับพลังงานสะสมที่ได้จากการเลียนแบบตำแหน่งในการติดตั้งและระยะที่เหมาะสม เมื่อติดตั้ง B32K130 ด้วยรูปคลื่น $8/20 \text{ 3kA}$ ในรูปของกระแสไฟฟ้าของสาย AP-FSF	53
5.4 ระดับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเลียนแบบตำแหน่งในการติดตั้งและระยะที่เหมาะสม เมื่อติดตั้ง B32K130 ด้วยรูปคลื่น $10/1000 \mu\text{s} \text{ 3 kA}$ ในรูปของกระแสไฟฟ้าของสาย AP-FSF	56
5.5 ระดับพลังงานสะสมที่ได้จากการเลียนแบบตำแหน่งในการติดตั้งและระยะที่เหมาะสม เมื่อติดตั้ง B32K130 ด้วยรูปคลื่น $10/1000 \mu\text{s} \text{ 3 kA}$ ในรูปของกระแสไฟฟ้าของสาย AP-FSF	57
5.6 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์จัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น $8/20 \mu\text{s} \text{ 3 kA}$ ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย DW	61
5.7 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์จัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น $8/20 \mu\text{s} \text{ 3 kA}$ ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย DW	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย AP-FSF	63
5.9 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย AP-FSF	64
5.10 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย DW	65
5.11 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย DW	66
5.12 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย AP-FSF	67
5.13 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย AP-FSF	68
5.14 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 3 kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย DW	72
5.15 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 3 kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย DW	73
5.16 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 3 kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย AP-FSF	74
5.17 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 3 kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย AP-FSF	75
5.18 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย DW	76
5.19 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย DW	77
5.20 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย AP-FSF	78
5.21 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย AP-FSF	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบชุมสายโทรศัพท์องค์ประกอบของวงจรจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำทำให้มีความไวต่อการรบกวนและทนแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำเพราะผู้ผลิตต้องการออกแบบให้ระบบชุมสายมีขนาดเล็กกลง ตลอดจนการพัฒนาทางด้านสารกึ่งตัวนำจะนั้นเมื่ออุปกรณ์ได้รับการเสียหายจึงอาจทำให้การทำงานหยุดชะงัก และทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

เสิร์จ (Surge) เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดผลกระทบที่รุนแรง และรวดเร็วในการทำลายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ [1,2] โดยผลกระทบดังกล่าว จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียค่าใช้จ่าย ในการซ่อมบำรุง อย่างมหาศาล

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษา อัตราการเกิดเสิร์จและระดับแรงดันเสิร์จ ในวงจรที่ไม่มีกำบังกันรวมถึงลักษณะรูปคลื่นเสิร์จและระยะในการในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ
2. เพื่อศึกษาการป้องกันเสิร์จของระบบชุมสายโทรศัพท์โดยอาศัยการทำงานร่วมกันกับอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ พร้อมทั้งการเปรียบเทียบระยะป้องกันที่ดีที่สุดในการติดตั้ง อุปกรณ์ขจัดเสิร์จ
3. เพื่อศึกษาการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จระยะการติดตั้งว่ามีผลการป้องกันเสิร์จของระบบชุมสายโทรศัพท์ได้ดีเพียงใด

1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการป้องกันเสิร์จซึ่งอาจจะเข้ามาในระบบโทรศัพท์ โดยใช้ MOV เป็นตัวขจัดเสิร์จ อาศัยคุณลักษณะของ เมทอลอ็อกไซด์วาริสเตอร์ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่มีความสัมพันธ์ ของแรงดันกับกระแสเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น คือมีความต้านทานสูงที่แรงดันไฟฟ้าปกติ แต่เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ (Surge) เกินแรงดัน Threshold เข้ามา เมทอลอ็อกไซด์วาริสเตอร์จะประพุดิตัวให้มีความต้านทานต่ำและจะพยายามควบคุมให้แรงดันเสิร์จ มีค่าต่ำเข้ากับระดับแรงดันปกติ ซึ่งในปัจจุบัน เมทอลอ็อกไซด์วาริสเตอร์ เป็นที่นิยม และราคาไม่แพง [3,4]

บทที่ 2

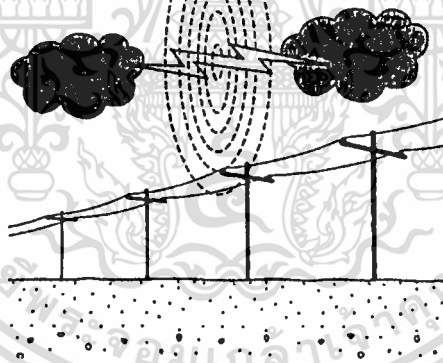
เสิร์จ

2.1 สาเหตุการเกิดเสิร์จ (Source of Surge)

เสิร์จ (Surge) เป็นแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นสูงมากจากสภาวะปกติอย่างรวดเร็ว ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (Microsecond domain) ปนเข้ามาในระบบไฟฟ้าปกติ ครอบคลุมให้อุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เสียหายซึ่งเป็นผลกระทบที่รุนแรงและรวดเร็ว สาเหตุของการเกิดเสิร์จมาจาก 2 สาเหตุใหญ่ๆ ได้แก่

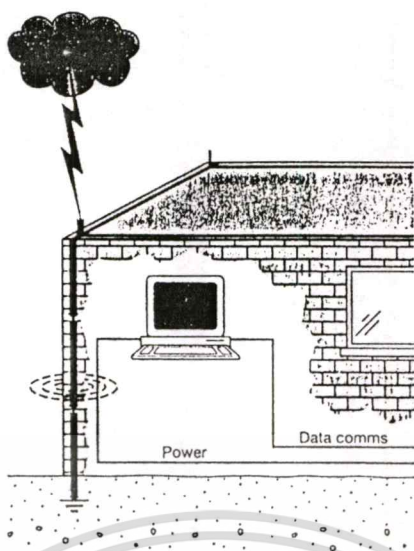
2.1.1 ผลกระทบจากฟ้าผ่า ซึ่งมี 3 รูปแบบหลัก คือ

2.1.1.1 การเชื่อมต่อโดยการเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) หลังจากเกิดฟ้าผ่าจะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายทั่วไปและเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเสิร์จในตัวนำ เช่น สายไฟฟ้า สายโทรศัพท์หรือสายสัญญาณที่อยู่ในบริเวณนั้น



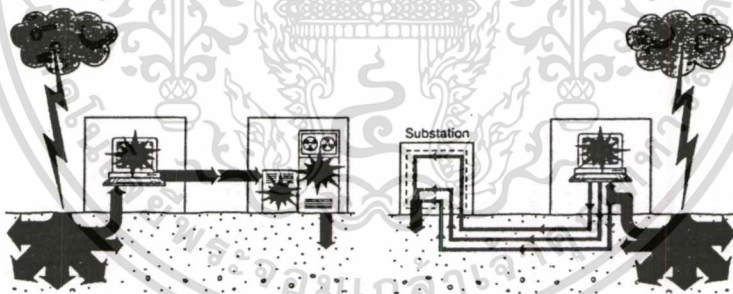
รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อโดยการเหนี่ยวนำ

2.1.1.2 การเชื่อมต่อโดยความจุ (Capacitive coupling) เมื่อเกิดฟ้าผ่าที่สายล่อฟ้า จะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำสายไฟฟ้าที่อยู่ใกล้สายล่อฟ้านั้นทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเสิร์จได้



รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อโดยความจุ

2.1.1.3 การเชื่อมต่อโดยความต้านทาน (Resistive coupling) การเกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากที่ที่มีศักย์ค่าไฟฟ้าสูงไปยังที่ศักย์ค่าไฟฟ้าต่ำเนื่องจากฟ้าผ่า (หลังจากเกิดฟ้าผ่าลงบนดินและกระจายพลังงานไฟฟ้าไปทั่ว ในบริเวณที่ใกล้จุดฟ้าผ่าจะมีศักย์ค่าไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่ไกลออกไปทำให้เกิดความต่างศักย์ค่าไฟฟ้ามาก)



รูปที่ 2.3 การเชื่อมต่อโดยความต้านทาน

2.1.2 ผลกระทบจากการเปิด-ปิดของอุปกรณ์สวิตชิง

อุปกรณ์สวิตชิงซึ่งเปิด-ปิดการทำงานสลับกันตลอดเวลา ในขณะที่เปิดจะมีกระแสไหลผ่านตัวนำไฟฟ้า ก่อให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบๆ ตัวนำนั้น และเมื่อปิดอุปกรณ์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะหยุดไหลและเกิดการสลายตัวทันทีก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเสิร์จ ที่มีขนาดแปรผันโดยตรงกับขนาดกระแสไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดพลังงานสะสม

2.2 ความเสียหายจากเสิร์จ

1. ทำให้อุปกรณ์ซึ่งกักการทำงาน (Disruption) ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเสิร์จที่สูงผิดปกติ จะรบกวนชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยผ่านทางตัวนำต่างๆ ที่ป้อนเข้าอุปกรณ์ ให้ทำงานผิดปกติหรืออาจหยุดการทำงานชั่วคราว

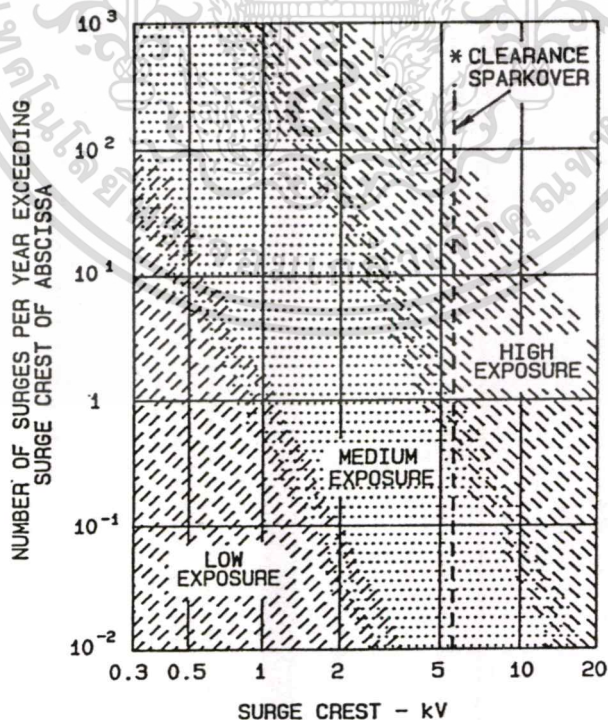
2. ลดคุณภาพและอายุการใช้งาน (Degradation) บางชิ้นส่วนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าในระดับผิดปกติจะทำให้ทำงานไม่สมบูรณ์ในช่วงเวลานั้น และอาจเกิดการเสื่อมคุณภาพได้ แต่หากเกิดหลายๆ ครั้ง ก็จะสิ้นสุดอายุการใช้งานอย่างรวดเร็ว

3. การเสียหายโดยตรง (Damage) โดยปกติแล้วอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ไปถูกออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้าเสิร์จได้ 2 เท่าของแรงดันสูงสุด (Peak voltage) ในภาวะปกติ หากแรงดันไฟฟ้าเสิร์จที่ป้อนอุปกรณ์สูงกว่าค่านี้ จะทำลายชิ้นส่วนภายในให้หมดสภาพการใช้งานทันที

4. การเสียหายโดยทางอ้อมที่พบมาก คือ ในกรณีเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งกักการทำงานโดยไม่มีตัวตั้งตัว ทำให้เสียหายที่กำลังดำเนินการอยู่ และเสียเวลา

2.3 อัตราการเกิดเสิร์จและระดับแรงดันในวงจรที่ไม่มีการป้องกัน (Rate of Occurrence and Voltage levels in unprotected circuit)

2.3.1 อัตราการเกิดเสิร์จกับระดับแรงดันเสิร์จ



รูปที่ 2.4 แสดงอัตราการเกิดเสิร์จกับระดับแรงดันในสถานที่ที่ไม่มีการป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

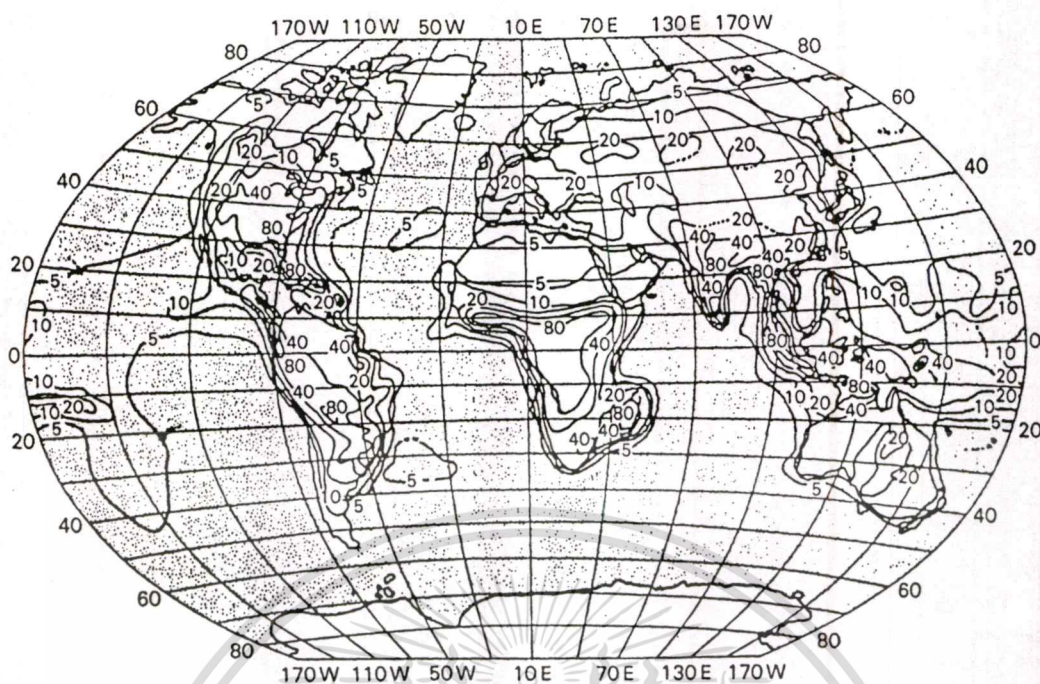
นับตั้งแต่ปี 1980 ได้มีการบันทึกอัตราการเกิดเสิร์จและจำนวนการเสิร์จจากหลายๆ สถานที่ โดยหน่วยงานต่างๆ ดังภาคผนวก ก. รูปที่ 2.4 แสดงกราฟ log-log ของระดับแรงดันเสิร์จสูงสุดกับจำนวนของเสิร์จต่อปี โดยไม่คำนึงถึงรูปคลื่นเสิร์จและสถานที่ที่บันทึก จากรูปพบว่าจำนวนเสิร์จลดลงเมื่อระดับแรงดันเสิร์จมีค่าสูงขึ้น

ระดับการกระจายของเสิร์จเป็นผลจากกระบวนการเกิดของเสิร์จ ดังเช่น ระยะปลอดภัยที่เกิดประกายไฟ (sparkover of clearance) ระหว่างอุปกรณ์ที่ถูกกระตุ้นกับกราวด์และการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆ การแบ่งแยกระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้จริงกับแรงดันไฟฟ้าที่ถูกจำกัด โดย sparkover เป็นค่าที่สำคัญของอุปกรณ์ต่อร่วมระหว่างภายในและภายนอกอาคาร อุปกรณ์สำหรับภายนอกอาคารควรจะมีระยะปลอดภัยมากกว่าภายในอาคาร ดังนั้นจึงมีค่าประกายไฟสูงประมาณ 10 kV แต่บางครั้งอาจมีค่าสูงถึง 20 kV (เป็นค่าสูงสุดสำหรับรูปคลื่น 1.2/50 μ s) ส่วนที่ Watt-hour มิเตอร์ ตามรูปที่ 2.6 มีระยะระหว่างสายเฟสตัวนำกับกราวด์ ซึ่งก่อให้เกิดค่าของประกายไฟ 8 kV ในทางตรงกันข้ามสำหรับอุปกรณ์ส่วนมากที่ใช้ภายในอาคารในระบบไฟฟ้า 120 โวลต์ 220 โวลต์ และ 480 โวลต์ จะมีค่าประกายไฟระหว่างเฟสหรือระหว่างเฟสกับกราวด์ประมาณ 6 kV แต่อย่างไรก็ตาม เรายังไม่สามารถสรุปได้ว่าค่า 6 kV นี้เป็นค่าสูงสุดของเสิร์จที่เกิดขึ้นภายในอาคาร

2.3.2 ระดับเครื่องห่อหุ้ม

จากรูปที่ 2.4 แสดงเพียงแต่ความสัมพันธ์ของความถี่ในการเกิดเสิร์จเท่านั้น ขณะที่จำนวนการเกิดเสิร์จนั้นจะระบุในเทอมของระดับเครื่องห่อหุ้ม ซึ่งมี 3 ระดับดังนี้

- (1) เครื่องห่อหุ้มระดับต่ำ (Low exposure) ระบบที่อยู่ในสภาพภูมิศาสตร์ที่มีการเกิดฟ้าผ่าไม่บ่อยครั้ง มีการเกิดคาปาซิเตอร์สวิตชิ่งน้อย
- (2) เครื่องห่อหุ้มระดับปานกลาง (Medium exposure) ระบบที่อยู่ในสภาพภูมิศาสตร์ที่มีการเกิดฟ้าผ่าบ่อยครั้งหรือมีการเกิดสวิตชิ่งในรูปแบบสภาวะชั่วคราว
- (3) เครื่องห่อหุ้มระดับสูง (High exposure) เป็นระบบที่อยู่ในสภาพภูมิศาสตร์ที่มีการเกิดฟ้าผ่าบ่อยครั้งและมีการเกิดสวิตชิ่งเสิร์จอย่างรุนแรงมากกว่า 2 แบบแรกซึ่งเป็นกรณีที่พบได้ยาก



รูปที่ 2.5 แสดง Isokeraunic map

ความถี่ของการเกิดและระดับของระบบไฟฟ้าสวิตชิงเสิร์จขึ้นอยู่กับแบบวิธีการทำงานของสาธารณูปโภค สำหรับความถี่ของการเกิดและระดับของโหลดสวิตชิงเสิร์จขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดนั้นๆ ที่เกิดสวิตชิงหรือระยะไฟฟ้าจากจุดนั้นๆ มากกว่าตำแหน่งที่โหลดนั้นตั้งอยู่

ส่วนการศึกษาความถี่ของการเกิดฟ้าผ่านั้น ทำให้สามารถทราบว่ามีบริเวณใดที่เกิดฟ้าผ่ามาก เพื่อการป้องกันให้มากขึ้น จำนวนของ stoke ที่เกิดขึ้นบนสายส่งโดยทั่วไปแล้วมีจำนวนมากขึ้นเมื่อสายส่งมีความสูงเพิ่มขึ้น จำนวนฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริงนั้นวัดได้ยากมาก ดังนั้นในการศึกษาถึงความถี่ของฟ้าผ่าก็อาจใช้การพิจารณาได้จากจำนวนวันที่เกิดพายุฝนฟ้าคะนอง (Thunder) ในปีหนึ่ง แม้วิธีนี้จะไม่บอกถึงจำนวนฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริงแต่ก็เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากนัก แผนที่ที่แสดงถึงปริมาณวันที่เกิดฝนฟ้าคะนองในหนึ่งปีนี้เรียกว่า Isokeraunic map

2.3.3 ลักษณะของรูปคลื่นเสิร์จ (Recommended Waveform)

นับตั้งแต่ช่วง 1960 เป็นต้นมาได้มีการคิดค้นเทคนิคในการบันทึกข้อมูลของเสิร์จ การพัฒนาและปรับเครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกรูปคลื่นของเสิร์จ จากฐานข้อมูลการเกิดเสิร์จในอดีตรวมทั้งการบันทึกรายงานจากหลายเหตุการณ์ อาจจะจำแนกลักษณะรูปคลื่นเสิร์จได้ ออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.1 Ring wave

จากการผลการวัดเก็บรวบรวมสถิติในสถานที่ต่างๆ และในห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่าการแพร่กระจายของแรงดันเสิร์จส่วนใหญ่ภายในอาคารในระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำมีลักษณะของรูปคลื่นสั้นแกว่งไปมา (Oscillatory) นอกจากนั้นยังมีแอมพลิจูดไม่เท่ากันและรูปคลื่นที่แตกต่างกันในแต่ละสถานที่ ช่วงความถี่ของการสั้นแกว่งไปมาของเสิร์จนี้ มีค่าตั้งแต่ต่ำกว่า 1 kHz จนถึงมากกว่า 500 kHz

ANSI/IEEE std. C62.41-1980 ได้กำหนดรูปคลื่น Ring wave เป็นรูปคลื่นที่มีเวลาช่วงขึ้น (rise time) เท่ากับ $0.5 \mu\text{s}$ และมีความถี่ของการสั้น (decaying oscillation) ที่ 100 kHz. แต่ละลูกคลื่นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 60% ของแอมพลิจูดของลูกคลื่นก่อนหน้าชั่วคราวข้าม อย่างไรก็ตามรูปคลื่นนี้ได้ถูกเลือกเป็นรูปคลื่นเสริม ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 3.3 ต่อไป

เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของหน้าคลื่นของรูปคลื่น Ring wave สามารถก่อให้เกิดผลกระทบของการกระจายแรงดันแบบไม่เป็นเชิงเส้นของชุดขดลวดและในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบางชนิดจะมีความไวต่อผลของ dv/dt โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในช่วงการเข้าสู่หรือออกจากภาวะการนำ

2.3.3.2 High Energy Surge

จากข้อมูลการบันทึกการเกิดเสิร์จในอดีตแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่มีความสามารถในการจำกัดกระแสที่ Service entrance จะมีประวัติของความล้มเหลวในขณะที่ในอุปกรณ์ตัวเดียวกันแต่นำไปติดตั้งภายในอาคารจะไม่มี (ซึ่งเป็นผลจากพลังงานและอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด) ดังนั้นรูปคลื่น 100 kHz Ring wave จะไม่สามารถสะสมพลังงานให้กับอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จเพียงพอที่จะก่อให้เกิดการป้องกันที่ล้มเหลวได้

ประเภทของเหตุการณ์ที่สามารถก่อให้เกิดเสิร์จที่มีพลังงานสูง แบ่งออกเป็น

A) เสิร์จฟ้าผ่าในระบบสายส่งไฟฟ้า รูปคลื่นของเสิร์จในกรณีนี้ถูกแทนด้วยรูปคลื่น $1.2/50 \mu\text{s}$ เป็นรูปคลื่นแรงดันเสิร์จและรูปคลื่น $8/20 \mu\text{s}$ เป็นรูปคลื่นกระแสเสิร์จโดย IEEE C62.1-1984 และ IEEE C62.41-1991 ได้กำหนด 2 รูปคลื่นนี้เป็นรูปคลื่นผสม ซึ่งรูปคลื่นทั้ง 2 นี้ได้ถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการเพื่อจำลองสภาพสิ่งแวดล้อมบริเวณ Service entrance ของอาคารที่เชื่อมติดกับระบบสายส่งไฟฟ้าและจำลองความเค้นที่จะเกิดกับอุปกรณ์เชื่อมต่อด้วย

เนื่องจากรูปคลื่นกระแสเสิร์จมีเวลาหน้าคลื่นที่สั้น $8 \mu\text{s}$ จึงไม่สามารถที่จะแพร่กระจายในอาคารได้ในระยะไกลๆ

B) เสิร์จฟ้าผ่าในสายส่งไฟฟ้าและเคลื่อนที่ไปตามสาย เสิร์จที่เกิดขึ้นนี้เมื่อเคลื่อนที่ไปตามสายส่งระยะไกลๆ จะความชันของหน้าคลื่นลดลงกว่าช่วงเริ่มต้น และมีคาบเวลาการเกิดมาก

C) เสร็จจากการทำงานของฟิวส์รวมถึงสายส่งที่มีความยาวมาก เสร็จที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็น เสร็จทิศทางเดียว (unidirectional Surge) มีคาบเวลาการเกิดประมาณหลายร้อยไมโครวินาที ขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของสายด้วย

D) เสร็จจากการปรับแก้ค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) ของคาปาซิเตอร์สวิตชิง ค่าคาปาซิเตอร์สวิตชิงและสวิตชิงชนิดอื่นๆ บางชนิดก่อให้เกิดการอสซิลเลตถูกหน่วงที่ความถี่ต่ำ (ประมาณ 100 Hz ถึง 1 kHz) ส่วนมากมีคาบเวลาการเกิดประมาณ 2 ถึง 3 มิลลิวินาที

สำหรับเสร็จใน B) C) และ D) นั้น IEEE C62.41-1991 ได้เสนอรูปคลื่นที่ใช้แทนเสร็จที่เกิดขึ้น 2 รูปคลื่นด้วยกันซึ่งถือเป็นรูปคลื่นเสริมที่มีคาบเวลาการเกิดที่นาน ได้แก่ รูปคลื่นเสร็จทิศทางเดียว 10/1000 μ s และรูปคลื่นความถี่ต่ำ 5 kHz Ring wave

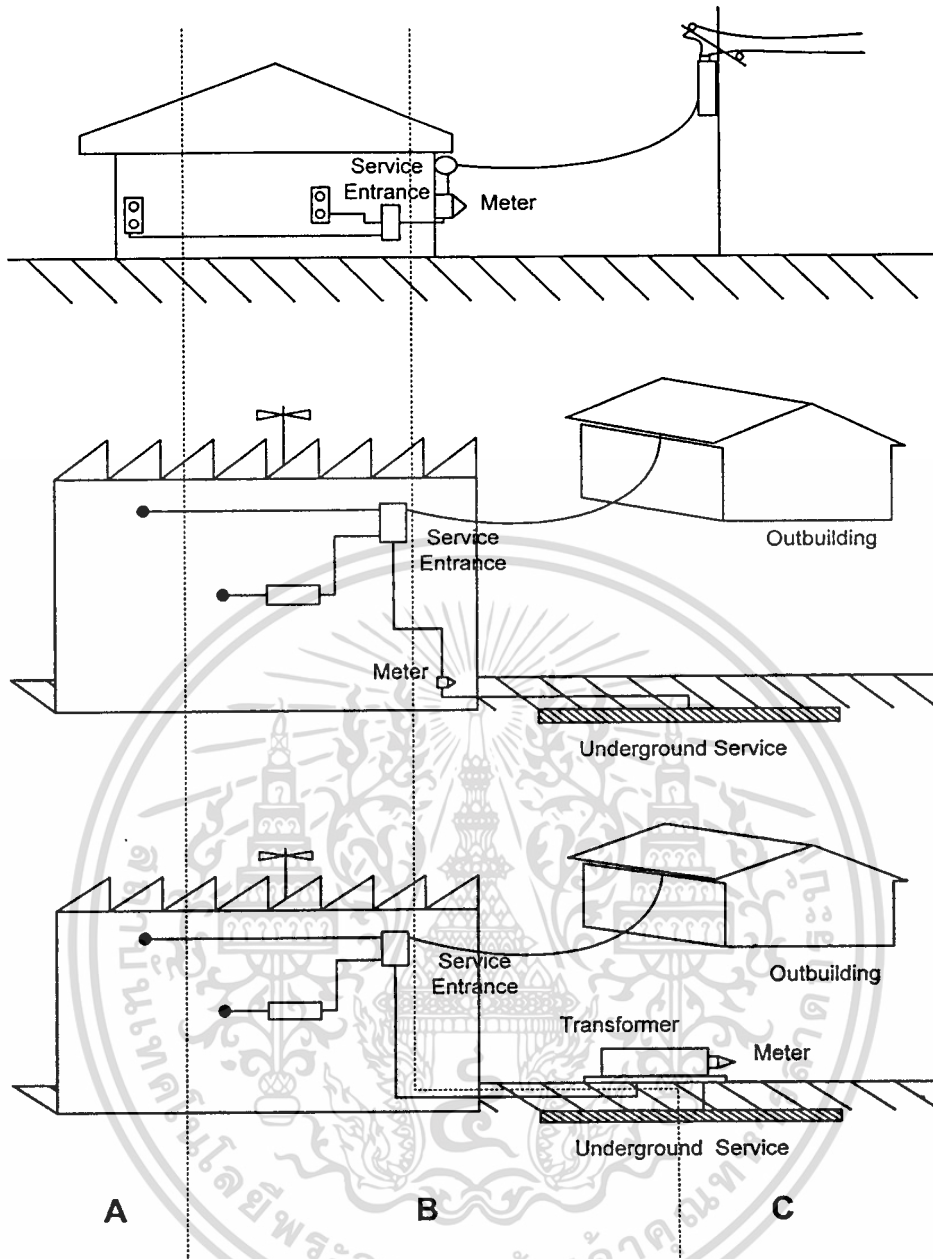
2.3.3.3 Fast Transient

การเปิดวงจรไฟฟ้าด้วยสวิตช์ประเภท air gap ซึ่งได้แก่ รีเลย์และคอนแทกเตอร์ ก่อให้เกิดการเบิรสต์ของ Fast ringing surge ขึ้น ในบางครั้งอาจจะเกิดจากปรากฏการณ์อาร์ก เรียกว่า Showering arc และ IEC 801-4 (1988) เรียกรูปคลื่นนี้ว่า Electrical Fast Transient (EFT) กำหนดการทดสอบที่เวลาช่วงขึ้นของการเบิรสต์ของเสร็จเท่ากับ 5 ns และคาบเวลาการเกิดเท่ากับ 50 ns สำหรับรูปคลื่นนี้ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์เครื่องมือในอุตสาหกรรมต่างๆไป

เมื่อนำรูปคลื่นนี้เปรียบเทียบกับรูปคลื่นอื่นที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้พบว่า ช่วงเวลาการเกิดของรูปคลื่น Fast transient นี้สั้นกว่าระยะเวลาเคลื่อนที่ (travel time) ในสายไฟฟ้าภายในอาคาร (ระยะเวลา 50 ns สามารถใช้ในการเคลื่อนที่ได้ 10 เมตร) ดังนั้นแนวคิดของสายส่ง (transmission line) ได้ถูกประยุกต์ในการบ่งบอกลักษณะการแพร่กระจายของความผิดปกติในรูปแบบสถานะชั่วคราวในสายไฟฟ้าภายในอาคารและอุปกรณ์ขนาดใหญ่

2.4 ประเภทสถานที่ตั้ง (Location Category)

เนื่องจากเราไม่สามารถที่จะเลือกหรือกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด (Source impedance) ทั้งภายในและภายนอกอาคารได้ เพราะมีค่าที่เหมาะสมเป็นไปได้หลายค่า ดังนั้น IEEE C62.41-1991 [5] จึงทำการจัดจำแนกประเภทสถานที่ตั้งออกเป็น 3 ประเภท ดังรูป



รูปที่ 2.6 ประเภทของสถานที่ตั้ง

(1) ที่ตั้งประเภท A พิจารณาที่จุดต่อไฟฟ้า (Outlets) และวงจรรย่อยยาวๆ (Long branch circuit) ได้แก่ จุดต่อไฟฟ้าทั้งหมดที่มีระยะห่างจากที่ตั้งประเภท B มากกว่า 10 เมตร (30 ฟุต) หรือมีระยะห่างจากที่ตั้งประเภท C มากกว่า 20 เมตร (60 ฟุต)

(2) ที่ตั้งประเภท B พิจารณาที่สายป้อน (Feeder) และวงจรรย่อยสั้นๆ (Short branch circuit) ได้แก่ อุปกรณ์ที่ Distribution panel สายป้อนและบัส (Bus) ในโรงงานอุตสาหกรรม จุดต่อไฟฟ้าสำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีระยะต่อกับ Service entrance สั้น ระบบไฟแสงสว่างในอาคารขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) ที่ตั้งประเภท C พิจารณาที่ภายนอกอาคารและ Service entrance

ได้แก่ จุดบริการจากเสาไฟฟ้าจนถึงตัวอาคาร สายตัวนำระหว่างมิเตอร์ไฟฟ้ากับ Distribution panel สายไฟฟ้าที่พาดจากภายนอกอาคารซึ่งสามารถถอดได้และสายไฟฟ้าใต้ดินสำหรับมอเตอร์ปั๊มน้ำ

การพิจารณาจัดจำแนกประเภทสถานที่ตั้งรวมทั้งระดับเครื่องป้องกันในแต่ละที่ตั้งนั้น เพื่อกำหนดให้เป็นแบบแผนเดียวกันในการทดสอบ (Test procedure) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.3



บทที่ 3

การป้องกันลัดวงจร

3.1 หลักการป้องกันลัดวงจร

หลักการป้องกันลัดวงจรสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปจะใช้อุปกรณ์ป้องกันลัดวงจร (Surge protective device) ได้แก่ สปาร์กแก๊ป (gas tube) วาริสเตอร์ชนิดเมทอลออกไซด์ (metal oxide varistor) และไดโอดขจัดลัดวงจร (diode suppressor) แต่อุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรแต่ละชนิดจะมีลักษณะสมบัติในการทำงานหรือการขจัดลัดวงจรได้แตกต่างกัน และอุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรชนิดใดชนิดหนึ่งไม่สามารถจะทำหน้าที่ป้องกันลัดวงจรให้ได้ผลตามที่ต้องการครบถ้วน จึงจำเป็นต้องใช้วิธีทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันลัดวงจร (Coordination of Surge protective device) เมื่อพิจารณาถึงหลักการทำงานในการป้องกันขั้นพื้นฐานของอุปกรณ์ป้องกันลัดวงจร อาจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1) แบบขูดแรงดัน (Clamping) อุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรที่ใช้ขูดหรือขจัดแรงดัน ได้แก่ วาริสเตอร์และซิลิกอนไดโอดหรือไดโอดขจัดลัดวงจร

2) แบบโครบาร์ (Crowbar) อุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรจะทำงานในลักษณะที่มีความต้านทานในเชิงลบสูง (negative resistance characteristics) และเป็นผลให้เกิดการขจัดแรงดันให้เบ็ลืองน้อยลงต่ำพอที่จะไม่เกิดความเสียหายแก่โหลด

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการทำงานของการทำงานของการป้องกันทั้งสองแบบจะได้ดังแสดงในตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบหลักการป้องกัน

คุณลักษณะ	แบบขูดแรงดัน (clamp)	แบบโครบาร์ (crowbar)
ความสามารถรับกระแสลัดวงจร	รับกระแสได้น้อย	รับกระแสได้สูง
การตอบสนองต่อกระแส	รับพลังงานไว้ในลักษณะที่ปล่อยระบายออกไปเป็นความร้อน	สะท้อนกระแสที่ได้รับให้ย้อนกลับไปในวงจรได้สูง
ตัวอย่างองค์ประกอบกับดัก	MOV ไดโอดสะกด	หลอดบรรจุก๊าซ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ เมทอลออกไซด์วาริสเตอร์ (Metal oxide varistor : MOV) เป็นอุปกรณ์ป้องกันลัดวงจร โดยเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์เป็นตัวต้านทานที่มีความสัมพันธ์ของแรง

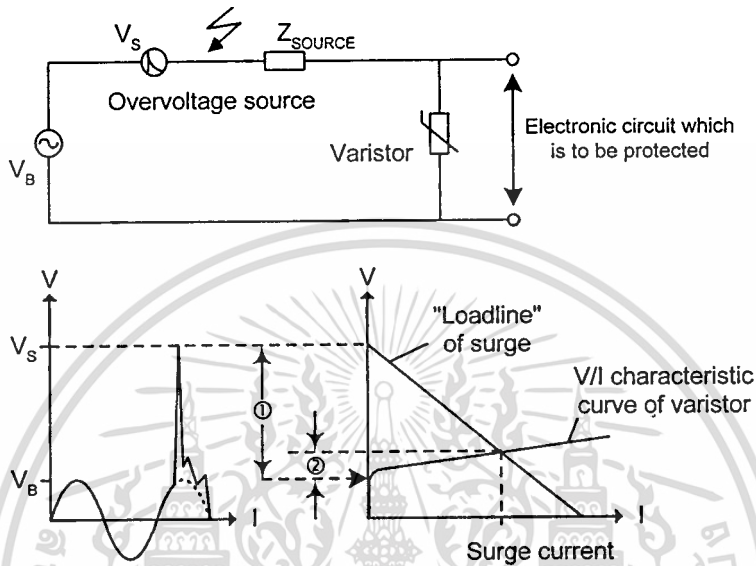
เอกสารถูกบันทึกไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังสมการที่ 3.1 และเส้นกราฟคุณลักษณะของ V/I จะมีลักษณะคล้ายฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล (Exponential)

$$I = KV^\alpha \quad ; \quad \alpha > 1 \quad (3.1)$$

(สำหรับ MOV แล้ว $\alpha \approx 25$ ถึง 60)



รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ

โดยเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์จะประพฤติตัวเสมือนเปิดวงจร (open circuit) คือจะมีความต้านทานสูงที่แรงดันไฟฟ้าปกติ แต่เมื่อเกิดแรงดันสูงผิดปกติเกินแรงดัน Threshold ตัว MOV จะประพฤติตัวให้มีค่าความต้านทานต่ำ พยายามควบคุมให้มีค่าแรงดันเหลือรอด (Let-through voltage) ของแรงดันเสิร์จต่ำและเข้าใกล้แรงดันระดับปกติที่สุด จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าขนาดแรงดันเสิร์จ ① ถูกขจัดจนเหลือขนาดแรงดัน ② โดยอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ [6,7]

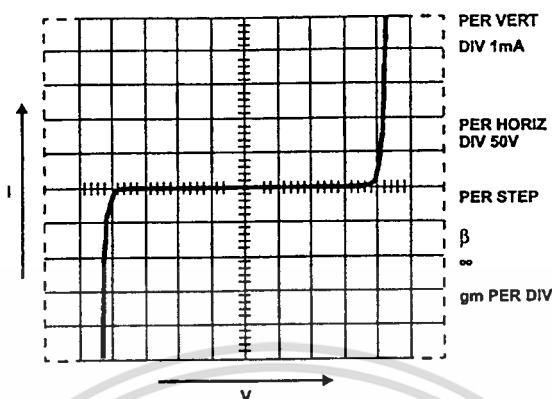
3.2 ทฤษฎีการทำงานของวาริสเตอร์

3.2.1 บทนำ

วาริสเตอร์ (Varistor) เป็นอุปกรณ์ประเภทไม่เชิงเส้น (Nonlinear device) และเป็นอุปกรณ์ที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าซึ่งมีพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่คล้ายกับซีเนอร์ประเภท back-to-back ซึ่งมีคุณสมบัติที่สมมาตรและค่าแรงดันเบรคดาวน์ (Breakdown) ที่ชันแสดงดังรูปที่ 3.2 ทำให้มีความสามารถในการระงับหรือขจัดเสิร์จได้ดี เมื่อเกิดแรงดันเสิร์จที่สูง ค่าอิมพีแดนซ์ของวาริสเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างมากจากจุดที่ใกล้เปิดวงจร (open circuit) ไปยังระดับการนำ (Conductive level) ดังนั้นจึงต้องจำกัดระดับแรงดันเสิร์จไปยังระดับที่ปลอดภัย พลังงานสะสมการทำลายของแรงดันเสิร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกคุกกร่อนโดยวาริสเตอร์ ทำให้สามารถป้องกันอุปกรณ์ที่ไวต่อการทำลายได้ (Vulnerable circuit component)



รูปที่ 3.2 คุณลักษณะ V/I ของวาริสเตอร์

วาริสเตอร์ถูกผลิตขึ้น โดยใช้เทคโนโลยีของเซรามิกประกอบไปด้วย ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เป็นส่วนประกอบสำคัญกับ บิสมัท (Bismuth) โคบอลต์ (Cobalt) แมงกานีส (Maganese) และเมทอลออกไซด์ชนิดอื่นๆ ซึ่งโครงสร้างของวาริสเตอร์ประกอบไปด้วยเมทริกซ์ของตัวนำซิงค์ออกไซด์ขนาดเล็ก แยกโดยรอยต่อ P-N ซึ่งรอยตอดังกล่าวจะตอบสนองการนำไฟฟ้าที่แรงดันต่ำ และเป็นแหล่งกำเนิดการนำไฟฟ้าไม่เชิงเส้นที่แรงดันไฟฟ้าสูง

เมื่อเกิดการนำไฟฟ้าระหว่างเกรนซิงค์ออกไซด์ขนาดเล็กถูกกระจายไปทั่วกลุ่มของอุปกรณ์ โดย วาริสเตอร์จะมีความทนทานมากกว่าอุปกรณ์ที่มีรอยต่อ P-N เดียวเช่น ซีเนอร์ไดโอด ในตัววาริสเตอร์พลังงานจะถูกคุกกร่อนแบบเอกรูป (uniform) ผ่านทางตัวของอุปกรณ์ซึ่งเป็นผลจากการแผ่ความร้อนไปอย่างสม่ำเสมอตลอดความจุของมัน คุณสมบัติทางไฟฟ้าถูกควบคุมโดยลักษณะทางกายภาพคือ ขนาดของตัววาริสเตอร์ซึ่งถูกเผาโดยขึ้นรูปเช่น ดิสก์ ชิป และหลอด โดยพิกัดพลังงานถูกกำหนดด้วยความจุ อัตราพิกัดแรงดันถูกกำหนดด้วยความหนาและปริมาณบรรจุกระแสถูกกำหนดด้วยพื้นที่ที่กระแสไหลไป

โดยทั่วไปวาริสเตอร์สามารถทำงานที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 2.5 V ถึง 6000 V แรงดันที่สูงขึ้นขึ้นอยู่กับขนาดและรูปแบบการบรรจุเท่านั้น การควบคุมกระแสสูงสุดที่รับได้ประมาณ 70,000 A และปริมาณบรรจุพลังงานที่รองรับได้มากขึ้นถึง 10,000 J สำหรับขนาดที่ใหญ่ขึ้น

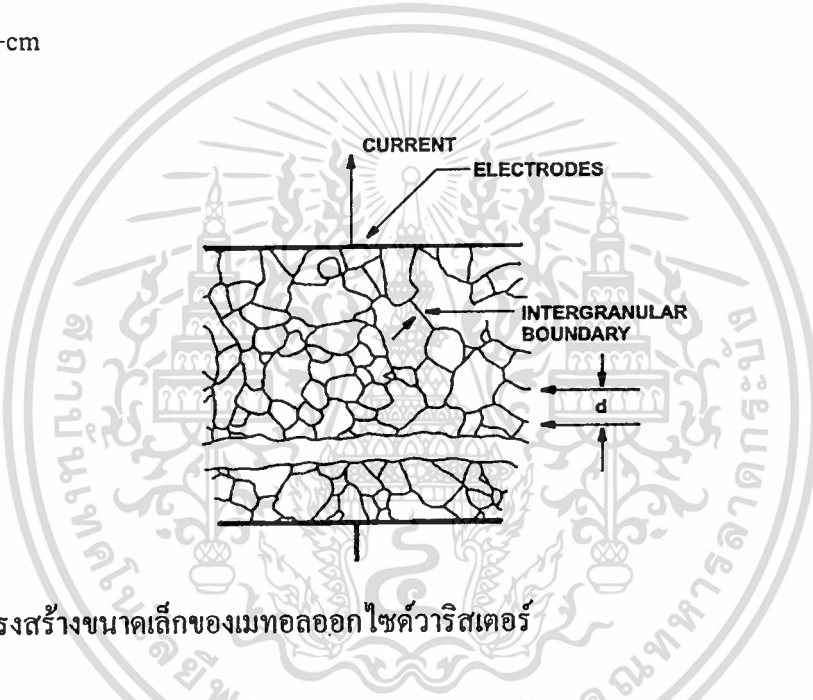
3.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property)

คุณสมบัติที่น่าสนใจของวาริสเตอร์ชนิดเมทอลออกไซด์ที่สร้างจาก ZnO คือคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับขนาดของอุปกรณ์แต่ละเกรน (grain) ของ ZnO ของเซรามิกทำตัวเหมือนกับว่ามีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่อสารกึ่งตัวนำที่ขอบของเกรนนั้น เมื่อพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นเกิดที่ขอบของเกรน ZnO แต่ละอัน ตัววาริสเตอร์สามารถพิจารณาให้เป็นอุปกรณ์หลายรอยต่อ (multi-junction) ที่ประกอบไปด้วยเกรนที่ต่อเนื่องกันและขนานกันหลายๆ อัน ค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนและการแจกแจงขนาดเกรนเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดพฤติกรรมทางไฟฟ้า

3.2.3 โครงสร้างขนาดเล็กของวาริสเตอร์ (Varistor Microstructure)

วาริสเตอร์สร้างได้โดยการขึ้นรูป (form) และเผา (sinter) ผงของ ZnO ในชั้นเซรามิก ชั้นส่วนดังกล่าวจะถูกยึดติดกับ thick film silver หรือ arc/frame sprayed metal ขนาดวาริสเตอร์ระหว่างจุดเชื่อมประกอบด้วยเกรน ZnO ซึ่งมีค่าเฉลี่ย d แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีค่าความต้านทานของ ZnO $< 0.3 \Omega\text{-cm}$



รูปที่ 3.3 โครงสร้างขนาดเล็กของเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์

การออกแบบวาริสเตอร์เพื่อให้มีแรงดันวาริสเตอร์ระดับปกติ (V_N) นั้นเกิดจากการเลือกความหนาที่เหมาะสมกับจำนวนของเกรน ในทางปฏิบัติอุปกรณ์วาริสเตอร์จะถูกกำหนดลักษณะโดยแรงดันเกรเดียนต์ที่วัดตลอดช่วงความหนาซึ่งมีค่า volts/mm โดยการควบคุมส่วนประกอบและเงื่อนไขการผลิตจะต้องให้ค่าเกรเดียนต์นั้นมีค่าคงที่ เนื่องจากข้อจำกัดด้านการปฏิบัติกับความหนาที่เป็นไปได้ค่าแรงดันเกรเดียนต์จึงถูกออกแบบให้มีค่ามากกว่า 1 โดยการเปลี่ยนส่วนประกอบของเมทอลออกไซด์ ซึ่งทำให้สามารถเปลี่ยนขนาดของ d ได้ ซึ่งจะให้ได้ผลตามที่ต้องการ

คุณสมบัติพื้นฐานของ ZnO วาริสเตอร์ก็คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมตลอดช่วงการเชื่อมต่อตรงรอยต่อระหว่างเกรนจะมีค่าใกล้เคียงค่าคงที่ซึ่งมีค่าประมาณ 2-3 V ต่อรอยต่อของเกรนซึ่งค่าแรงดันดังกล่าวจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของเกรน ดังนั้นค่าแรงดันวาริสเตอร์จะแสดงได้โดยความหนาของวัสดุและขนาดของ ZnO เกรนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{แรงดันวาริสเตอร์} \quad V_N(DC) &= (3V)n & (3.2) \\ \text{ความหนาวาริสเตอร์} \quad D &= (n+1)d \\ &\approx \frac{V_N \times d}{3} & (3.3) \end{aligned}$$

โดย n คือ จำนวนเฉลี่ยของเกรนระหว่างอิเล็กโทโรด

d คือ ขนาดเฉลี่ยของเกรน

ค่าแรงดันวาริสเตอร์ (V_N) ซึ่งอธิบายค่าแรงดันไฟฟ้าตลอดช่วงวาริสเตอร์ที่จุดบนกราฟ V-I จากระดับต่ำที่เป็นเชิงเส้น ไปยังระดับสูงที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมาตรฐานจะวัดแรงดันนี้ที่กระแส 1 mA ขนาด โดยทั่วไปของวาริสเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ขนาดทั่วไปของวาริสเตอร์

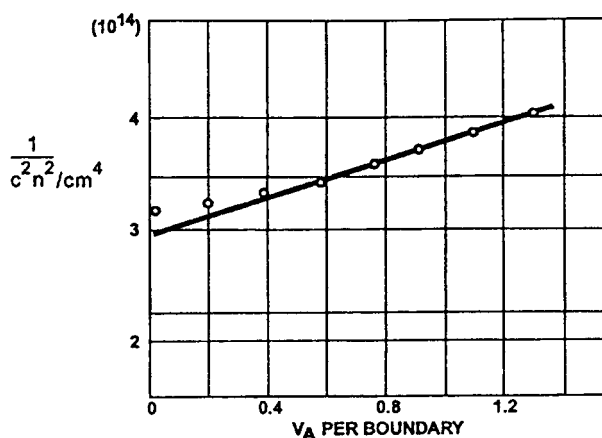
แรงดันวาริสเตอร์	ค่าเฉลี่ยขนาดเกรน	n	แรงดันเกรเดียนต์	ความหนา
Volt	μm		V/mm ที่ 1mA	mm
150 V _{rms}	20	75	150	1.5
25 V _{rms}	80	12	39	1.0

3.2.4 ทฤษฎีการทำงาน (Theory of Operation)

เนื่องจากธรรมชาติของ polycrystalline ของวาริสเตอร์สารกึ่งตัวนำแบบเมทอลออกไซด์ การทำงานทางกายภาพของอุปกรณ์จะซับซ้อนกว่าสารกึ่งตัวนำ โดยทั่วไป ภูเขาสำคัญในการอธิบายการทำงานของเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์คือ การเข้าใจปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่เกิดที่ขอบเขตของเกรนหรือรอยต่อระหว่างเกรนซึ่งคือออกไซด์ ในขณะที่บางทฤษฎีก่อนหน้านี้สมมติว่าช่องทางทางไฟฟ้าเกิดผ่านฉนวนเฟสลำดับที่ 2 ที่ขอบเขตของเกรน การทำงานของวาริสเตอร์บางทีจะดีกว่าเอาไดโอดมาต่ออนุกรมหรือขนานกัน ในแบบจำลองนี้ขอบเขตของเกรนประกอบไปด้วยสถานะที่ไม่สมบูรณ์ที่ดักจับอิเล็กตรอนอิสระจากเกรนของซิงค์ออกไซด์ในพื้นที่ที่ติดกับขอบเขตของเกรน รูปที่ 3.4 แสดงชั้นดีพลิตชันที่เกิดขึ้นในวาริสเตอร์ โดยที่ส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้าต่อค่าขอบเขตกำลังสองถูกพล็อตกับค่าแรงดันไฟฟ้าต่อขอบเขตซึ่งเป็นแบบเดียวกับสารกึ่งตัวนำประเภท P-N ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_b + V)}{q\epsilon N} \quad (3.4)$$

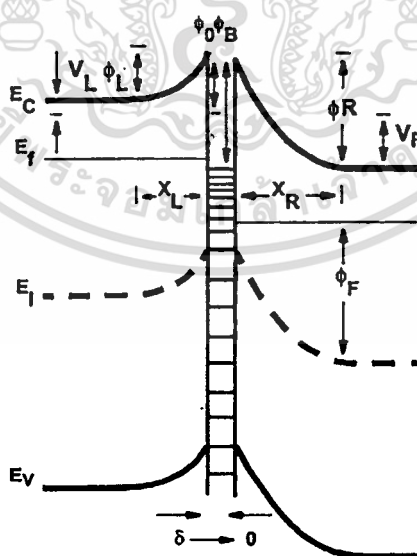
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 พฤติกรรมของค่าความจุไฟฟ้าต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของวาริสเตอร์

โดย V_b คือค่าแรงดันแบเรีย V คือค่าแรงดันที่ป้อนให้ q คือประจุอิเล็กตรอน ϵ_s คือค่า permittivity ของสารกึ่งตัวนำและ N คือความหนาแน่นของประจุ จากความสัมพันธ์นี้ค่า N มีค่า 2×10^{17} ต่อ cm^3 นอกจากนี้กำหนดให้ค่าความกว้างของชั้นดีพลิตชันที่คำนวณมีค่าประมาณ 1000 Angstrom

ตัวดีพลิตชันที่กั้นการไหลของประจุอิสระและจะทำตัวเป็นฉนวนที่มีค่าแรงดันต่ำในพื้นที่การรั่ว (leakage region) ดังแสดงดังรูปที่ 3.5 กระแสการรั่วเกิดจากประจุอิสระไหลผ่านสนามแบเรียต่ำ (field lower barrier) และอุณหภูมิที่ทำงานประมาณ 25°C

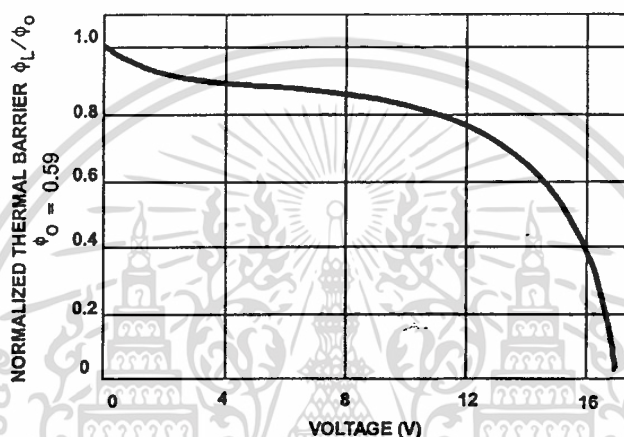


รูปที่ 3.5 แถบพลังงานสำหรับเกรนของ ZnO ที่มีขอบเขตติดกับรอยต่อ ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 แสดงแถบพลังงานสำหรับเกรนของ ZnO ที่มีขอบเขตติดกับรอยต่อ ZnO เกรนทางซ้ายคือ forward bias (V_L) และทางขวาคือ reverse bias (V_R) ความกว้างของชั้นดีพลิตชันคือ X_L และ X_R ค่าความสูงแถบเรียคือ ϕ_L และ ϕ_R และค่าความสูง zero bias แถบเรียคือ ϕ_0 เมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้น ϕ_L จะลดลงและค่า ϕ_R จะเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้แถบเรียมีค่าลดลงและเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า

ค่าความสูงแถบเรีย ϕ_L ของวาริสเตอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้าค่าถ่วงเป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แสดงดังรูปที่ 3.6 การลดลงอย่างรวดเร็วในแถบเรียที่แรงดันไฟฟ้าสูงแสดงการเริ่มนำไฟฟ้าอย่างไม่เชิงเส้น



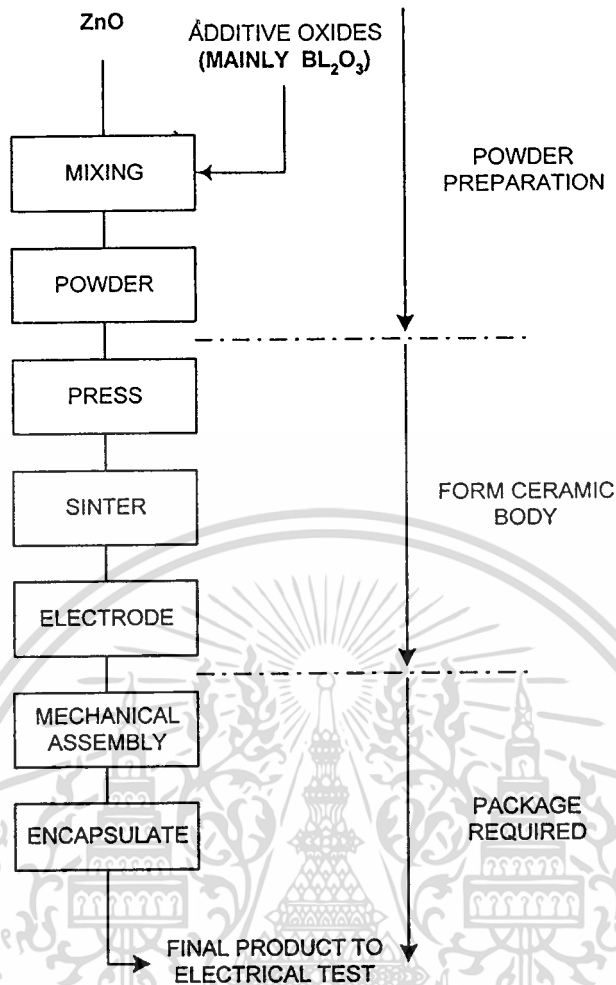
รูปที่ 3.6 แถบเรียเชิงความร้อนกับฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้

พิจารณากรณีช่วง high current upturn ในรูปที่ 3.9 จะพบว่าความสัมพันธ์ของ V-I จะเข้าใกล้คุณสมบัติของ ohmic ค่าความต้านทานขึ้นอยู่กับกรนำไฟฟ้าของเกรนของ ZnO ซึ่งมีความหนาแน่นประจุในช่วง 10^{17} ถึง 10^{18} ต่อ cm^2 ซึ่งทำให้ ZnO มีค่าความต้านทานต่ำกว่า $0.3 \Omega\text{cm}$

3.2.5 โครงสร้างของวาริสเตอร์ (Varistor construction)

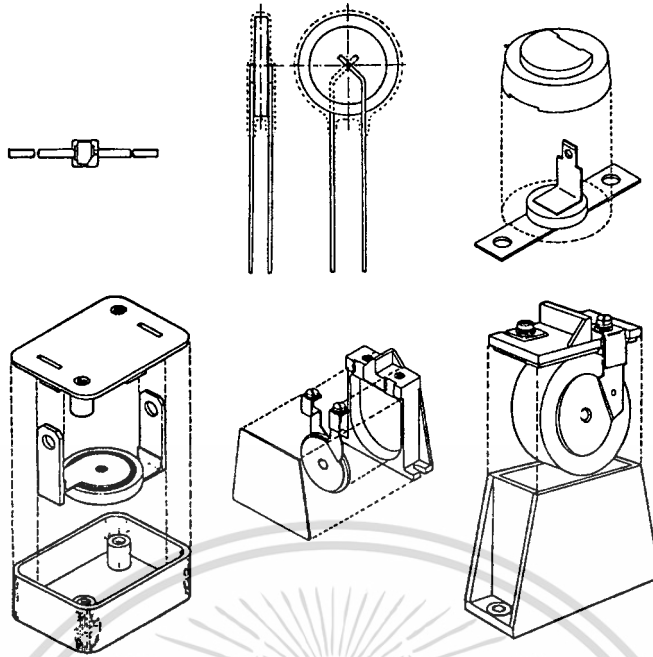
กระบวนการสร้างวาริสเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.7 คุณลักษณะของอุปกรณ์จะกำหนดที่การอัด (pressing operation) โดยผงแป้ง (powder) จะถูกอัดลงในแบบพิมพ์ที่กำหนดความหนาเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ พื้นที่อิเล็กโทรดและมวลของอุปกรณ์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้อัตรากระแสสูงสุดและความสามารถในการรับพลังงาน โดยทั่วไปช่วงของเส้นผ่านศูนย์กลางของวาริสเตอร์ที่เป็นดีสก์มีค่าดังนี้ 3, 5, 7, 10, 14, 20, 32, 40 และ 62 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กระบวนการผลิตของวาริสเตอร์

การใช้เทคนิคการผลิตของเซรามิกสามารถใช้ในการสร้างรูปร่างอื่นๆ ตัวอย่างเช่น แท่งหรือหลอดถูกสร้างโดยการดันออก (extrude) และตัดเพื่อให้ได้ความยาวที่ต้องการ หลังจากการขึ้นรูปแล้ว ส่วนที่ยังไม่ได้เผาจะถูกวางในเตาเผาอิฐและเผาที่อุณหภูมิสูงสุดที่มากกว่า 1200°C ด้วยวิธีนี้ออกไซด์จะหลอมละลายที่อุณหภูมิมากกว่า 825°C ทำให้เกิดความหนาแน่นของ polycrystalline ceramic ที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดเกรนและโครงสร้างที่ถูกควบคุมโดยขนาดของเกรน รูปทรงของวาริสเตอร์ (package) แสดงดังรูป 3.8

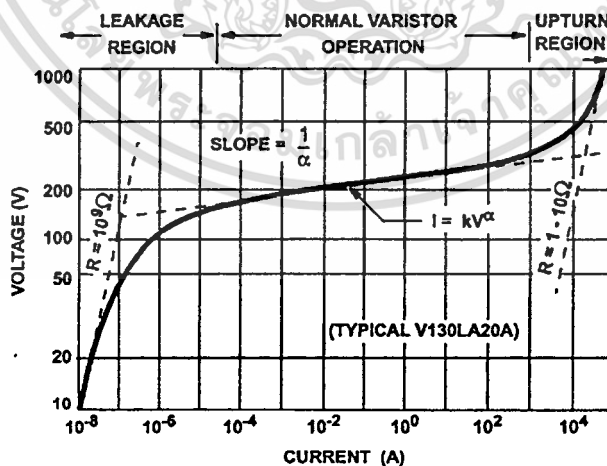


รูปที่ 3.8 รูปทรงของวาริสเตอร์

3.2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Characterization)

1.) คุณลักษณะ V-I ของวาริสเตอร์

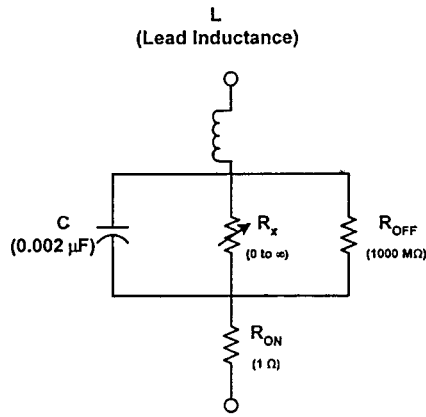
คุณลักษณะทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์มักแสดงในรูปของ log-log เพื่อแสดงช่วงกว้างของกราฟ V-I คุณลักษณะของกราฟ V-I แสดงบริเวณ (region) การทำงานที่แตกต่างกันทั้ง 3 ช่วงของวาริสเตอร์ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งแสดงช่วงกว้างของกระแสมากกว่าที่แสดงใน data sheet โดยทั่วไป



รูปที่ 3.9 คุณลักษณะของกราฟ V-I ในรูปมาตรฐานส่วนหนึ่งของ log-log

2.) วงจรเสมือน (Equivalent Circuit Model)

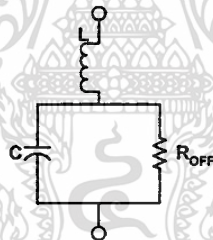
แบบจำลองทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์สามารถแสดงโดยวงจรเสมือนดังรูปที่ 3.10 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แบบจำลองทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์

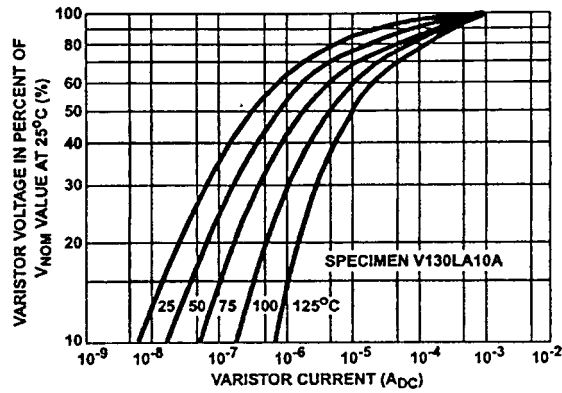
3.) ช่วงบริเวณ leakage ของการทำงาน

ที่ระดับกระแสมีค่าต่ำ กราฟ V-I จะเข้าใกล้ลักษณะเชิงเส้น (ohmic) และแสดงลักษณะการขึ้นกับอุณหภูมิ ตัววาริสเตอร์จะมีค่าความต้านทานสูง (เข้าใกล้ $10^9 \Omega$) และแสดงลักษณะเหมือนเปิดวงจร ค่าความต้านทานแบบไม่เชิงเส้น (R_x) สามารถละได้เนื่องจาก R_{OFF} ที่ต่อแบบขนานมีอิทธิพลมากกว่ารวมทั้ง R_{ON} สามารถละได้เมื่อเทียบกับ R_{OFF}



รูปที่ 3.11 วงจรเสมือนที่ระดับกระแสมีค่าต่ำ

ค่าความจุไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์วาริสเตอร์มีค่าประมาณคงที่ตลอดช่วงแรงดันและความถี่ในพื้นที่ leakage region ค่าความจุไฟฟ้าที่ตกลงจะมีค่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแรงดันที่ให้กับวาริสเตอร์ ในขณะที่เมื่อค่าแรงดันเข้าใกล้ค่าแรงดันวาริสเตอร์ที่ระบุค่าความจุไฟฟ้าจะลดลงทันที ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าประมาณคงที่เมื่อค่าความถี่เปลี่ยนไป 100 kHz



รูปที่ 3.12 ผลกระทบของอุณหภูมิในพื้นที่ leakage

ผลกระทบของอุณหภูมิของกราฟ V-I คุณลักษณะในพื้นที่ leakage แสดงดังรูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส leakage (I) และอุณหภูมิ (T) คือ

$$I = I_0 e^{-V_B / kT} \quad (3.5)$$

โดยที่ I_0 = ค่าคงที่

K = ค่าคงที่ของ Boltzmann

$V_B = 0.9\text{eV}$

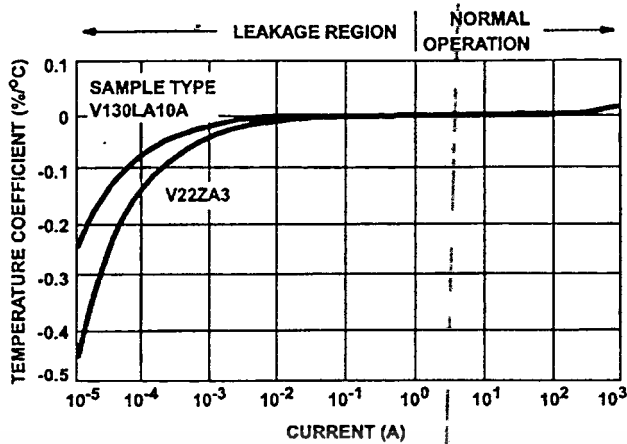
การเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงใน R_{OFF} อย่างไรก็ตาม R_{OFF} ยังมีค่าความต้านทานสูงแม้ว่าที่อุณหภูมิสูง เช่น มีค่าอยู่ในช่วง $10\text{ M}\Omega$ ถึง $100\text{ M}\Omega$ ที่อุณหภูมิ 125°C ถึงแม้ว่า R_{OFF} จะมีค่าความต้านทานสูงแต่ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ซึ่งความสัมพันธ์นี้มีค่าประมาณเชิงเส้นที่แปรผกผันกับความถี่

$$R_{OFF} \approx \frac{1}{f} \quad (3.6)$$

อย่างไรก็ตามการรวมกันแบบขนานของ R_{OFF} และ C ซึ่งจะเป็นค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ที่พิจารณา ทั้งนี้เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าประมาณเชิงเส้นกับ $1/R$

ที่กระแสสูงกว่าและมีค่ามากกว่าช่วงมิลลิแอมป์ การเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิจะมีค่าต่ำสุด การพล็อตกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (dv/dt) แสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจะเป็นลบและลดลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ในช่วงแรงดันเคลมปีปิงของวาริสเตอร์ ($I > 1\text{ A}$) ค่าอุณหภูมิจะมีค่าเข้าใกล้ 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (dv/dT) ต่อกระแส

4.) ส่วนการทำงานปกติของวาริสเตอร์

คุณลักษณะของวาริสเตอร์แสดงตามสมการ $I=kV^\alpha$ โดย k คือค่าคงที่และส่วนของ α แสดงความไม่เป็นเชิงเส้น ค่า α คือค่า figure of merit และแสดงได้จากความชันของกราฟ V-I หรือ คำนวณจากสมการ

$$\alpha = \frac{\log(I_2 / I_1)}{\log(V_2 / V_1)} = \frac{1}{\log(V_2 / V_1)} \text{ ที่ } I_2 / I_1 = 1 \quad (3.7)$$

ในบริเวณนี้วาริสเตอร์จะทำงานและ R_x จะมีผลมากกว่า R_{ON} R_{OFF} และ C ตัว R_x จะมีค่าขนาดน้อยกว่า R_{OFF} แต่จะมีค่ามากกว่า R_{ON}



รูปที่ 3.14 วงจรเสมือนที่การนำของวาริสเตอร์

ตลอดช่วงการทำงานค่าแรงดันวาริสเตอร์จะมีค่าคงที่ สำหรับการเปลี่ยนแปลงกระแส หลากๆขนาด ค่าความต้านทาน R_x จะเปลี่ยนตามขนาดการตอบสนองของกระแส ซึ่งสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

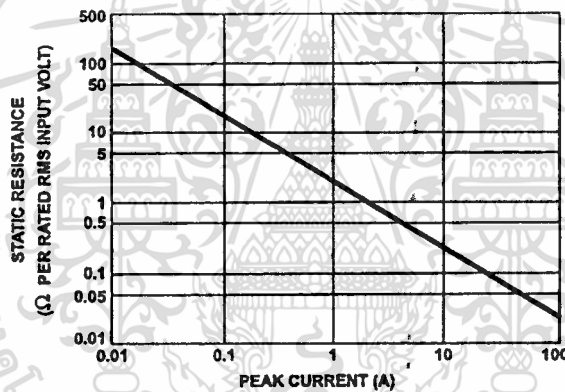
สังเกตโดยการตรวจสอบค่าความต้านทาน static และ dynamic ซึ่งเป็นฟังก์ชันของกระแส ค่าความต้านทาน static อธิบายได้โดย

$$R_x = \frac{V}{I} \quad (3.8)$$

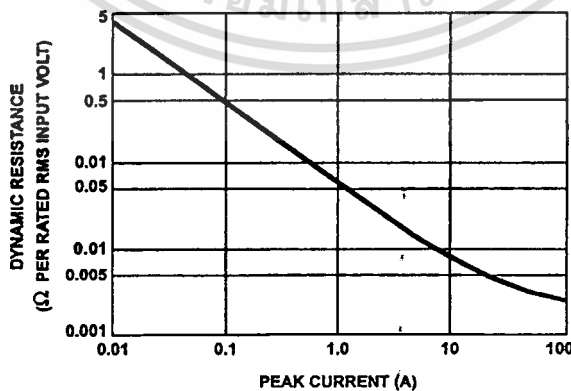
และค่าความต้านทาน dynamic

$$Z_x = \frac{dv}{di} = V / \alpha I = R_x' / \alpha \quad (3.9)$$

กราฟระหว่างค่าความต้านทานกับกระแส แสดงดังรูปที่ 3.15 และ 3.16



รูปที่ 3.15 ค่าความต้านทาน static (R_x) กับกระแส



รูปที่ 3.16 ค่าความต้านทาน dynamic (Z_x) กับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.) ช่วงบริเวณ upturn ของการทำงาน

ที่กระแสสูงซึ่งเข้าใกล้ค่าพิกัดสูงสุด ตัววาริสเตอร์จะประพุดติตัวคล้ายการลัดวงจร (short circuit) กราฟจะแยกออกมาจากช่วงไม่เชิงเส้นและเข้าใกล้ค่าความต้านทานของวัสดุหลักประมาณ 1 ถึง 10 Ω ที่บริเวณ upturn จะก่อให้เกิดค่า R_x เข้าใกล้ค่า R_{ON} ซึ่งค่าความต้านทาน R_{ON} นี้แสดงถึงค่าความต้านทานหลักของเกรนของ ZnO ค่าความต้านทานนี้จะมีค่าเชิงเส้นและเกิดที่กระแส 50 A ถึง 50,000 A ขึ้นอยู่กับขนาดของวาริสเตอร์



รูปที่ 3.17 วงจรเสมือนที่การ upturn ของวาริสเตอร์

3.3 การเลือกรูปคลื่นทดสอบ (Selection of waveform)

IEEE C62.41-1991 ได้แนะนำรูปคลื่นทดสอบที่เป็นตัวแทนของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบอิมพัลส์ (Impulse) ทั้งหมด 5 ชนิด โดยแบ่งออกเป็นรูปคลื่นทดสอบมาตรฐาน 2 ชนิดและรูปคลื่นทดสอบเสริม 3 ชนิด ดังตาราง

ตารางที่ 3.3 รูปคลื่นทดสอบมาตรฐานและรูปคลื่นทดสอบเสริมสำหรับตำแหน่งที่ตั้งต่าง ๆ

ตำแหน่งที่ตั้ง	100 kHz Ring Wave	Combination Wave	5/50 ns EFT Burst	10/100 μ s Wave	5 kHz Ring Wave
A	มาตรฐาน	ไม่มี	เสริม	เสริม	เสริม
B	มาตรฐาน	มาตรฐาน	เสริม	เสริม	เสริม
C	ไม่มี	มาตรฐาน	ไม่มี	เสริม	เสริม

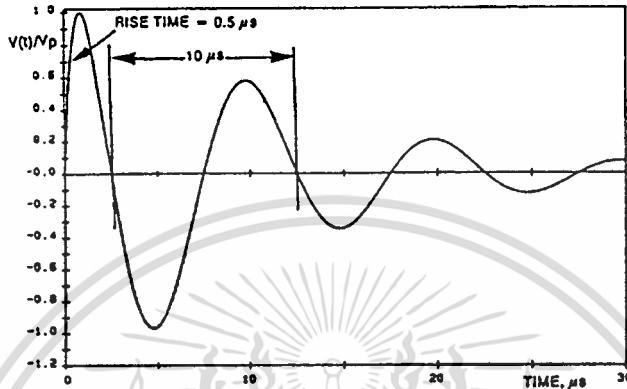
3.3.1. รูปคลื่นทดสอบมาตรฐาน (Standard Waveforms)

1) รูปคลื่น 0.5 μ s-100 kHz Ring Wave

เป็นรูปคลื่นของแรงดันเปิดวงจร (Open-circuit voltage) มีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

- เวลาช่วงขึ้น (Rise time) : 0.5 μ s \pm 0.15 μ s
- ความถี่ของการสั่น (Ringing frequency) : 100 kHz \pm 20 kHz

แอมพลิจูดของรูปคลื่นนี้มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามอัตราส่วนของแอมพลิจูดระหว่างรูปคลื่นสูงสุดกับรูปคลื่นลูกตรงข้ามที่อยู่ติดกันดังนี้ อัตราส่วนของรูปคลื่นสูงสุดลูกที่สองกับลูกแรกมีค่าระหว่าง 40 ถึง 110 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนของรูปคลื่นสูงสุดลูกที่ 4 กับลูกที่ 3 มีค่าระหว่าง 40 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงรูปคลื่น 0.5 μ s-100 kHz Ring wave

เวลาช่วงขึ้น คือ เวลาที่ใช้สำหรับหน้าคลื่นที่ขึ้นจากจุดที่มีแอมพลิจูด 10 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่น ส่วนความถี่ของการสั่นของรูปคลื่น พิจารณาจากจุดตัดแกน X (มีค่าเป็นศูนย์) ครั้งที่ 1 ถึง 3 นับจากรูปคลื่นสูงสุดแรก

ค่าแอมพลิจูดสูงสุดแรกของทั้งแรงดันเปิดวงจร (V_p) และกระแสลัดวงจร (I_p) นั้นจะพิจารณาจากตารางที่ 1 โดยมีค่าเผื่อเท่ากับ $\pm 10\%$

ตารางที่ 3.4 แรงดันและกระแสลัดวงจรที่ติดตั้งประเภทต่างๆ ของรูปคลื่นมาตรฐาน 0.5 μ s -100 kHz

ประเภทที่ติดตั้ง	เครื่องต่อหุ้มของระบบ	ค่าสูงสุด		ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)
		แรงดัน (kV)	กระแสไฟฟ้า (kA)	
A1	ต่ำ	2	0.07	30
A2	ปานกลาง	4	0.13	30
A3	สูง	6	0.20	30
B1	ต่ำ	2	0.17	12
B2	ปานกลาง	4	0.33	12
B3	สูง	6	0.50	12

ค่าอิมพีแดนซ์แหล่งกำเนิดหรือ V_p/I_p สำหรับการจำลองผลในที่ตั้งประเภท B เท่ากับ $12 \Omega \pm 3 \Omega$ และสำหรับการจำลองผลในประเภทที่ตั้ง A เท่ากับ $30 \Omega \pm 8 \Omega$ เมื่อแรงดันเปิดวงจรสูงสุดมีค่าใกล้เคียง 6 kV ค่าของกระแสลัดวงจรสูงสุดก็จะมีค่าประมาณ 500 A สำหรับที่ตั้งประเภท B และเท่ากับ 200 A สำหรับที่ตั้งประเภท A

สำหรับรูปคลื่นมาตรฐาน 0.5 μ s -100 kHz Ring wave จะไม่มีรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรในการทดสอบ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าของกระแสลัดวงจรสูงสุดขึ้นอยู่กับที่ตั้งประเภทต่างๆ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของ Ring wave นี้จะไม่ได้ให้พลังงานสูงกับอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

เนื่องจาก Ring wave มีเวลารุ่งที่สั้นเท่ากับ 0.5 μ s ของขอบขาขึ้น ประกอบกับกระแสสูงสุดและค่า di/dt ที่มีค่ามากพอจะก่อให้เกิดผลกระทบของการเหนี่ยวนำที่จุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในการทดสอบ ซึ่งอัตราส่วนของค่าแรงดันกับด้วยอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดเสิร์จ และอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทดสอบจะประมาณเท่ากับค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด

สำหรับรูปคลื่น 0.5 μ s-100 kHz Ring wave สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองรูปคลื่นนี้รวมทั้งค่าคงที่ของเวลาแสดงได้ดังสมการที่ 3.10

$$V(t) = AV_p \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \cos(\omega t) \quad (3.10)$$

โดยที่

$$\tau_1 = 0.533 \mu\text{s}$$

$$\tau_2 = 9.788 \mu\text{s}$$

$$\omega = 2\pi 10^5 \text{ rad/s}$$

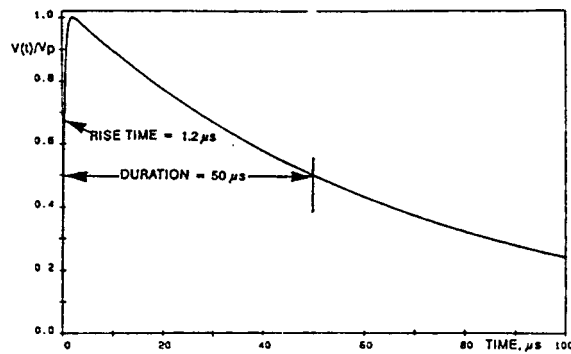
$$A = 1.590$$

2) รูปคลื่นแบบชุดผสม (Combination Wave) 1.2/50 μ s - 8/20 μ s

รูปคลื่นแบบชุดผสมนี้ถูกกำเนิดจากเครื่องกำเนิดรูปคลื่นแรงดันเปิดวงจร 1.2/50 μ s และรูปคลื่นกระแสลัดวงจร 8/20 μ s ซึ่งรูปคลื่นที่ถูกต้องจะพิจารณาจากแหล่งกำเนิดและค่าอิมพีแดนซ์ของเสิร์จที่เกิดขึ้น

รูปคลื่นแรงดันเปิดวงจร (Open-circuit voltage) 1.2/50 μ s มีกราฟแสดงดังรูปที่ 2 และมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

- เวลาค้นหน้าคลื่น (front time) : 1.2 μ s \pm 0.36 μ s
- คาบเวลาการเกิด (Duration) : 50 μ s \pm 10 μ s



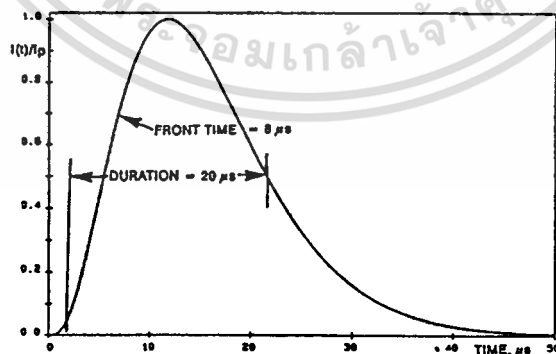
รูปที่ 3.19 แสดงรูปคลื่นรวมของแรงดันเปิดวงจร 1.2/50 μs

เวลาหน้าคลื่นสำหรับรูปคลื่นแรงดันนี้เท่ากับ $1.67 (t_{90} - t_{30})$ โดยที่ t_{90} และ t_{30} เป็นเวลาที่แอมพลิจูดมีค่า 90 % และ 30 % ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่น ซึ่งได้ถูกนิยามตาม IEC 60-2 (1973) [8] และ IEEE std.4-1978 [9]

ส่วนคาบเวลาการเกิด คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นที่แท้จริงกับเวลาที่จุดที่มีแอมพลิจูด 50 % ของขอบขาลงหลังคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นที่แท้จริงคือ จุดตัดของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุดที่มีแอมพลิจูด 30 % และ 90 % ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่นกับเส้นกราฟ $V=0$

รูปคลื่นกระแสลัดวงจร (Short-circuit current) 8/20 μs มีกราฟแสดงดังรูปที่ 3.20 และมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

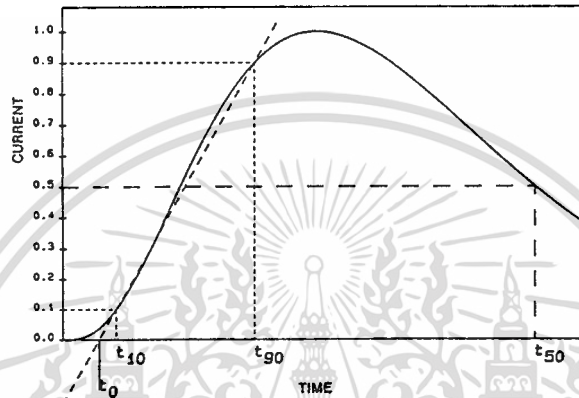
- เวลาหน้าคลื่น (front time) : 8 μs (+1.0 – 2.5) μs
- คาบเวลาการเกิด (Duration) : 20 μs (+8 – 4) μs



รูปที่ 3.20 แสดงรูปคลื่นรวมของกระแสลัดวงจร 8/20 μs

เวลาน้ำคลื่นสำหรับรูปคลื่นกระแสนี้เท่ากับ $1.25 (t_{90} - t_{10})$ โดยที่ t_{90} และ t_{10} เป็นเวลาที่แอมพลิจูดมีค่า 90 % และ 10 % ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่น ซึ่งได้ถูกนิยามตาม IEC 60-2 (1973) และ IEEE std.4-1978

คาบเวลาการเกิด เป็นช่วงระยะเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นที่แท้จริงกับเวลาที่จุดที่มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 50 % ของขอบขาหลังคลื่นซึ่งจุดเริ่มต้นที่แท้จริง คือ จุดตัดของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างแอมพลิจูดเท่ากับ 10 % และ 90 % ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่นกับเส้นกราฟ $I=0$ แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะของรูปคลื่น 8/20 μs (เวลาน้ำคลื่น จุดเริ่มต้นที่แท้จริงและช่วงระยะเวลา)

ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของทั้งแรงดันเปิดวงจร (V_p) และกระแสลัดวงจร (I_p) นั้นจะพิจารณาจากตารางที่ 3.5 โดยมีค่าเผื่อเท่ากับ $\pm 10\%$

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าแรงดันและกระแสลัดวงจรที่ติดตั้งประเภทต่างๆ ของรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs - 8/20 μs Combination wave

ประเภทที่ติดตั้ง	เครื่องต่อหุ้มของระบบ	ค่าสูงสุด		ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)
		แรงดัน (kV)	กระแสไฟฟ้า (kA)	
B1	ต่ำ	2	1	2
B2	ปานกลาง	4	2	2
B3	สูง	6	3	2
C1	ต่ำ	6	3	2
C2	ปานกลาง	10	5	2
C3	สูง	20	10	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแหล่งกำเนิดอิมพีแดนซ์หรืออัตราส่วนระหว่าง V_p กับ I_p เท่ากับ $2.0 \Omega \pm 0.25 \Omega$ ซึ่งค่านี้จะบ่งบอกถึงพฤติกรรมของรูปคลื่น เมื่อต่อโหลดต่างๆกัน เช่น อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จเข้ากับแหล่งกำเนิด

จากอดีตที่ผ่านมา รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs ถูกใช้สำหรับการทดสอบระดับอิมพัลส์พื้นฐานของการเป็นฉนวนซึ่งจำลองโดยการทดสอบเปิดวงจรจนกระทั่งค่าความเป็นฉนวนหมดไป สำหรับรูปคลื่นกระแส 8/20 μs จะถูกใช้ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จโดยการป้อนกระแสสูงๆ เมื่อแรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรมีลักษณะรูปคลื่นที่ต่างกันในปรากฏการณ์เดียวกัน เช่น การเกิด Overstress จากฟ้าผ่า จึงมีความจำเป็นที่จะรวมทั้งสองเป็นรูปคลื่นทดสอบรูปคลื่นเดียวกัน

สำหรับรูปคลื่น 1.2/50 μs สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองรูปคลื่นนี้รวมทั้งค่าคงที่ของเวลาแสดงได้ดังสมการที่ 3.11

$$V(t) = AV_p \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (3.11)$$

โดยที่

$$\tau_1 = 0.4074 \mu\text{s}$$

$$\tau_2 = 68.22 \mu\text{s}$$

$$A = 1.037$$

สำหรับรูปคลื่น 8/20 μs สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองรูปคลื่นนี้รวมทั้งค่าคงที่ของเวลาแสดงได้ดังสมการที่ 3.12

$$I(t) = AI_p t^3 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3.12)$$

โดยที่

$$\tau = 3.911 \mu\text{s}$$

$$A = 0.01243 (\mu\text{s})^{-3}$$

หมายเหตุ τ คือ ค่าคงที่ของเวลา

t คือ เวลา

V_p คือ แรงดันเปิดวงจรสูงสุด

I_p คือ กระแสลัดวงจรสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2. รูปคลื่นทดสอบเสริม (Additional Waveform)

รูปคลื่นเสริมนี้ประกอบด้วย รูปคลื่นเบริสสต์ EFT รูปคลื่นทิศทางเดียว (Unidirectional) 10/1000 μs และรูปคลื่น 5 kHz Ring Wave ซึ่งแต่ละลูกคลื่นก็มีลักษณะพิเศษเฉพาะเลียนแบบการเชื่อมต่อของคอนแทกเตอร์ การทำงานของฟิวส์ และการสวิตซ์ของตัวเก็บประจุ ตามลำดับ

1) รูปคลื่นเบริสสต์ EFT (Electrical Fast Transient)

รูปคลื่นนี้ประกอบด้วยการเบริสสต์หลายๆ ครั้งซึ่งแต่ละครั้งจะมีพัลส์ทิศทางเดียวเฉพาะตัว รูปคลื่นนี้แทนการประเมินความคงทนของอุปกรณ์จากการรบกวน ระดับแอมพลิจูดนำเสนอแทนขีดความรุนแรงต่างๆ จากความเครียดที่เกิดขึ้นจริง

สำหรับรูปคลื่นเสริมเบริสสต์ EFT มีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

- เวลาช่วงขึ้น (Rise time) : $5 \text{ ns} \pm 1.5 \text{ ns}$
- คาบเวลาการเกิด (Duration) : $50 \text{ ns} \pm 1.5 \text{ ns}$

เวลาช่วงขึ้น คือ เวลาที่ใช้สำหรับหน้าคลื่นที่ขึ้นจากจุดที่มีแอมพลิจูด 10 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่น ส่วนคาบเวลาการเกิด คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดที่มีแอมพลิจูด 50% ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่นและหลังคลื่นเฉพาะแต่ละลูกคลื่นนั้นๆ

IEC 801- 4 (1988) [10] กำหนดช่วงระยะเวลาสำหรับพัลส์แต่ละลูกในเบริสสต์นั้น มีช่วงระยะเวลาเท่ากับ $15 \text{ ms} \pm 3 \text{ ms}$ และอัตราการเกิดซ้ำของพัลส์ภายในแต่ละเบริสสต์นั้น จะถูกกำหนดในฟังก์ชันของแรงดันเปิดวงจรสูงสุด ดังนี้

- สำหรับแรงดันสูงสุด $\leq 2 \text{ kV}$: $5 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$
- สำหรับแรงดันสูงสุด $> 2 \text{ kV}$: $2.5 \text{ kHz} \pm 0.5 \text{ kHz}$

คาบของการเกิดเบริสสต์ซ้ำๆ กันเท่ากับ $300 \text{ ms} \pm 60 \text{ ms}$ รูปคลื่นเดี่ยวของ EFT แสดงดังรูป

ที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงคลื่นเบริสสต์ EFT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแอมพลิจูดของรูปคลื่น EFT ได้ถูกกำหนดในเงื่อนไขการเปิดวงจรตามที่ได้ระบุใน IEC 801-4 (1988) แสดงดังตารางที่ 3.6 และตัวกำเนิดรูปคลื่นนี้มีค่าอิมพีแดนซ์กำเนิดเท่ากับ 50 Ω ตั้งแต่ 1 ถึง 100 MHz จุดประสงค์ของการทดสอบด้วยรูปคลื่นนี้เพื่อการประเมินผลระดับความทนต่อการรบกวนต่างๆ ไม่ใช่การทดสอบความสามารถในการสะสมพลังงาน

ตารางที่ 3.6 ระดับของเบิร์สต์ EFT

ระดับความคงทน	ระดับแรงดันสูงสุด(เปิดวงจร)
I	1 kV
II	2 kV
III	4 kV

สำหรับรูปคลื่นเบิร์สต์ EFT สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองรูปคลื่นนี้รวมทั้งค่าคงที่ของเวลาแสดงได้ดังสมการที่ 3.13

$$V(t) = AV_p \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (3.13)$$

โดยที่

$$\tau_1 = 3.5 \text{ ns}$$

$$\tau_2 = 55.6 \text{ ns}$$

$$A = 1.270$$

2) รูปคลื่น 10/1000 μs

สำหรับรูปคลื่น 10/1000 μs มีกราฟแสดงดังรูปที่ 3.23 และมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้ที่แรงดันเปิดวงจร

- เวลาค้นหน้าคลื่น (front time) = 10 μs (+0,-5) μs
- คาบเวลาการเกิด (Duration) = 1000 μs (+1000,0) μs

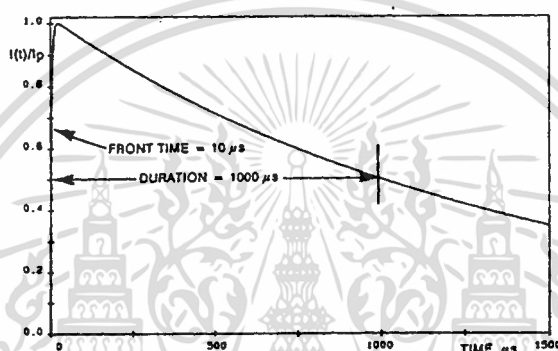
เวลาค้นหน้าคลื่นสำหรับรูปคลื่นแรงดันนี้เท่ากับ 1.67 ($t_{90} - t_{30}$) โดยที่ t_{90} และ t_{30} เป็นเวลาที่แอมพลิจูดมีค่า 90 % และ 30 % ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่น ส่วนคาบเวลาการเกิด เป็นช่วงระยะเวลาที่ระหว่างจุดเริ่มต้นที่แท้จริงกับเวลาที่จุดที่มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 50 % ของขอบขาลงหลังคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นที่แท้จริง คือ จุดตัดของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างแอมพลิจูดเท่ากับ 30 % และ 90 % ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่นกับเส้นกราฟ $V=0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กระแสลัดวงจร

- เวลาหน้าคลื่น (Front time) = $10 \mu\text{s} (+0, -5) \mu\text{s}$
- คาบเวลาการเกิด (Duration) = $1000 \mu\text{s} \pm 200 \mu\text{s}$

เวลาหน้าคลื่นสำหรับรูปคลื่นกระแสนี้เท่ากับ $1.25 (t_{90} - t_{10})$ โดยที่ t_{90} และ t_{10} เป็นเวลาที่แอมพลิจูดมีค่า 90 % และ 10 % ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่น ส่วนคาบเวลาการเกิด คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นที่แท้จริงกับเวลาที่จุดที่มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 50 % ของขอบขาลงหลังคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นที่แท้จริง คือ จุดตัดของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างแอมพลิจูดเท่ากับ 10 % และ 90 % ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่นกับเส้นกราฟ $I=0$



รูปที่ 3.23 แสดงรูปคลื่น 10/1000 μs

แอมพลิจูดของแรงดันเปิดวงจรสูงสุด พิจารณาจากตารางที่ 3.7 โดยมีค่าเผื่อเท่ากับ $\pm 10 \%$

ตารางที่ 3.7 ระดับแรงดันของรูปคลื่น 10/1000 μs

เครื่องห่อหุ้มของระบบ	แรงดันเสิร์จสูงสุด	ค่าอิมพีแดนซ์
ต่ำ	ไม่มี	ไม่มี
ปานกลาง	$1.0 U_{pk}$	1.00Ω
สูง	$1.3 U_{pk}$	0.25Ω

แรงดันเสิร์จสูงสุดตามตารางที่ 3.7 นี้เป็นสัดส่วนกับแรงดันสูงสุดของระบบ (U_{pk}) ซึ่งค่าแรงดันรวมจะเท่ากับผลรวมของค่าแรงดันในระบบกับแรงดันเสิร์จสูงสุด ยกตัวอย่าง เช่น ค่าแรงดันรวมสูงสุดของระบบที่อุปกรณ์ใดๆ ในระบบ L-N 220 Vrms สำหรับเครื่องห่อหุ้มระดับปานกลางมีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{\text{รวม}} = 311V_p + (1.0 \times 311)V_{\text{เสริม}}$$

$$= 622 \text{ V}$$

สำหรับรูปคลื่น 10/1000 μs สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองรูปคลื่นนี้รวมทั้งค่าคงที่ของเวลาแสดงได้ดังสมการที่ 3.14

$$V(t) = AI_p \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (3.14)$$

โดยที่

$$\tau_1 = 3.827 \mu\text{s}$$

$$\tau_2 = 1404 \mu\text{s}$$

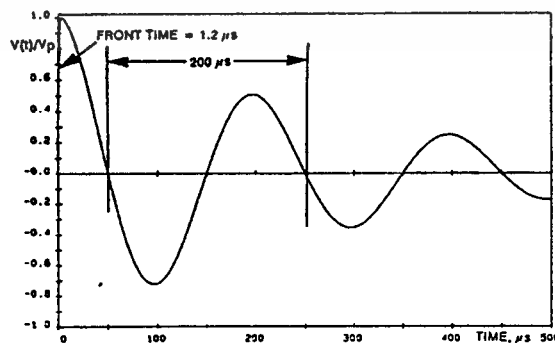
$$A = 1.019$$

3) รูปคลื่น 5 kHz Ring Wave

สำหรับรูปคลื่น 5 kHz Ring wave แสดงดังรูปที่ 7 นิยามโดยค่าพารามิเตอร์ของแรงดันเปิดวงจรเท่านั้น มีค่าดังนี้

- เวลาช่วงขึ้น (Rise time) = $1.5 \mu\text{s} \pm 0.5 \mu\text{s}$
- ความถี่ของการสั่น (Ringing frequency) = $5 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$
- อัตราส่วนของแอมพลิจูดระหว่างรูปคลื่นลูกสูงสุดกับลูกตรงข้ามที่อยู่ติดกัน = 60 ถึง 80%

เวลาช่วงขึ้น คือ เวลาที่ใช้สำหรับหน้าคลื่นที่ขึ้นจากจุดที่มีแอมพลิจูด 10 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่น ส่วนความถี่ของการสั่นของรูปคลื่น พิจารณาจากจุดตัดแกน X (มีค่าเป็นศูนย์) ครั้งที่ 1 ถึง 3 นับจากรูปคลื่นสูงสุดแรก



รูปที่ 3.24 แสดงรูปคลื่นของ 5 kHz Ring wave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแหล่งกำเนิดอิมพีแดนซ์หรืออัตราส่วนระหว่าง V_p กับ I_p เท่ากับ $5 \Omega \pm 2 \Omega$ พิจารณาจากตารางที่ 3.8 โดยมีค่าเผื่อเท่ากับ $\pm 10 \%$

ตารางที่ 3.8 ระดับแรงดันของรูปคลื่น 10/1000 μs

เครื่องต่อหุ้มของระบบ	แรงดันเสิร์จสูงสุด	ค่าอิมพีแดนซ์
ต่ำ	ไม่มี	ไม่มี
ปานกลาง	$1.0 U_{pk}$	1 ถึง 5Ω
สูง	$1.8 U_{pk}$	0.5 ถึง 1Ω

แรงดันเสิร์จสูงสุดตามตารางที่ 3.8 นี้เป็นสัดส่วนกับแรงดันสูงสุดของระบบ (U_{pk}) ซึ่งค่าแรงดันรวมจะเท่ากับผลรวมของค่าแรงดันในระบบกับแรงดันเสิร์จสูงสุด ยกตัวอย่าง เช่น ค่าแรงดันรวมสูงสุดของระบบที่อุปกรณ์ใดๆ ในระบบ L-N 120 Vrms สำหรับเครื่องต่อหุ้มระดับสูงมีค่าดังนี้

$$V_{รวม} = 170V_p + (1.8 \times 170)V_{เสิร์จ}$$

$$= 476 \text{ V}$$

สำหรับรูปคลื่น 5 kHz Ring wave สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองรูปคลื่นนี้รวมทั้งค่าคงที่ของเวลาแสดงได้ดังสมการที่ 3.15

$$V(t) = AV_p \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \cos(\omega t) \quad (3.15)$$

โดยที่

$$\tau_1 = 0.7356 \mu s$$

$$\tau_2 = 280.4 \mu s$$

$$\omega = \pi 10^4 \text{ rad/s}$$

$$A = 1.027$$

หมายเหตุ τ คือ ค่าคงที่ของเวลา

t คือ เวลา

V_p คือ แรงดันเบ็ดดวงจรสูงสุด

I_p คือ กระแสลัดดวงจรสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ทฤษฎีพื้นฐานระบบโทรศัพท์

4.1 ระบบโทรศัพท์

ระบบโทรศัพท์เป็นผลผลิตจากเทคโนโลยีการสื่อสารแขนงหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันกลายเป็นสิ่งที่จำเป็นมากในชีวิตประจำวัน ในการติดต่อสื่อสารกับบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆที่เราต้องการในเวลาอันรวดเร็ว โดยโครงข่ายโทรศัพท์พื้นฐาน (PSTN) นั้นจะมีกระจายอยู่ทั่วประเทศ เป็นโครงข่ายที่มีความครอบคลุมมากที่สุดในระบบการสื่อสารในปัจจุบัน ระบบโทรศัพท์จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบโทรศัพท์แบบอนาล็อกคือระบบโทรศัพท์ที่ใช้กันอยู่มาช้านาน และระบบโทรศัพท์แบบดิจิทัลหรือระบบโทรศัพท์แบบ ISDN (Integrated Service Digital Network) ซึ่งเป็นรูปแบบการให้บริการใหม่ แต่ในระบบโทรศัพท์แบบ ISDN นี้ยังไม่มีการให้บริการกันมากนักในปัจจุบัน [11]

ระบบ ISDN นั้นเกิดขึ้นมาจากการที่ได้มีการมองเห็นว่าโครงข่ายการสื่อสารในปัจจุบันนั้น มีวงจำกัดกันมากมาย เช่น โครงข่ายโทรศัพท์ โครงข่ายเทเล็กซ์ โครงข่ายข้อมูล โครงข่ายอินเตอร์เน็ต ฯลฯ ทำให้เปลืองงบประมาณในการวางโครงข่ายเป็นอย่างมาก และไม่สะดวกในการใช้งาน จึงมีการคิดค้นและพัฒนาโครงข่ายการให้บริการร่วมระบบดิจิทัล (Integrated Service Digital Network) หรือระบบ ISDN ขึ้นมา เพื่อรวบรวมโครงข่ายที่จำกัดเหล่านี้เข้าไว้ด้วยกัน เป็นโครงข่ายระบบดิจิทัลที่สามารถรองรับการบริการสื่อสารได้ทั้งทางด้านเสียง ข้อมูล และภาพ พร้อมๆ กันโดยไม่รบกวนซึ่งกันและกันบนโครงข่าย ISDN โดยระบบโทรศัพท์แบบ ISDN ก็เป็นการให้บริการรูปแบบหนึ่งในระบบนี้ ผู้ใช้บริการ ISDN จะสามารถติดต่อกับผู้ใช้บริการอื่นในโครงข่ายโทรศัพท์ระบบเดิมได้ คู่สาย ISDN เป็นคู่สายอเนกประสงค์สำหรับอุปกรณ์ปลายทางชนิดต่างๆ เช่น เครื่องโทรสาร เครื่องโทรศัพท์ คอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์สื่อสารอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ จะสามารถต่อเข้ากับคู่สาย ISDN เพียงคู่สายเดียว ทำให้ลดสายจากอุปกรณ์ต่างให้เหลือเพียงเส้นเดียว ง่ายต่อการเดินสาย มีความเป็นระเบียบเรียบร้อยภายในบ้านหรือสำนักงานของผู้ใช้บริการ และจะมีคุณภาพในการส่งและรับข้อมูลสูงกว่าในระบบอนาล็อก นอกจากนี้ยังง่ายต่อการบำรุงรักษาในภายหลังด้วย นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า เทอร์มินอลอะแดปเตอร์ (TA) ซึ่งจะใช้ในการเชื่อมต่อกับเครื่องให้บริการปลายทางที่ไม่ใช่ระบบดิจิทัลให้สามารถใช้ได้กับโครงข่ายในระบบดิจิทัลได้ [12]

ส่วนประกอบหลักๆ ของระบบโทรศัพท์พื้นฐานในปัจจุบันนี้จะประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆด้วยกันคือ หุมสายโทรศัพท์ เครื่องโทรศัพท์ และสายโทรศัพท์ ทำหน้าที่ในการติดต่อให้ผู้ใช้เรียกและผู้ถูกเรียกสามารถทำการติดต่อสื่อสารกันได้ตามต้องการ ดังจะมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ขุมสายโทรศัพท์ (Telephone exchange)

ขุมสายโทรศัพท์นั้นจะมีหน้าที่เลือกคู่สายหรือทำการสลับสายคู่สายโทรศัพท์ ตามสัญญาณที่ส่งออกมาจากเครื่องโทรศัพท์ของผู้เรียก เพื่อทำการเชื่อมต่อคู่สายของผู้เรียกไปยังผู้ถูกเรียกให้สามารถติดต่อกันได้ โดยขุมสายโทรศัพท์ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันนี้ จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่ ประเภทแรกเป็นขุมสายโทรศัพท์ที่มีเครื่องโทรศัพท์ของผู้เช่าต่อโดยตรง จะแบ่งออกได้เป็น ขุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่น (Local exchange) และขุมสายโทรศัพท์แบบ PABX (Private Automatic Branch Exchange) ส่วนประเภทที่สองเป็นขุมสายโทรศัพท์ที่ไม่มีเครื่องโทรศัพท์ของผู้เช่าต่อโดยตรงหรือขุมสายต่อผ่าน จะแบ่งออกได้เป็น ขุมสายแทนเค็ม (Tandem exchange) และขุมสายต่อผ่านทางไกล (Transit exchange) ซึ่งรายละเอียดของขุมสายแต่ละชนิดจะทำการอธิบายต่อไป

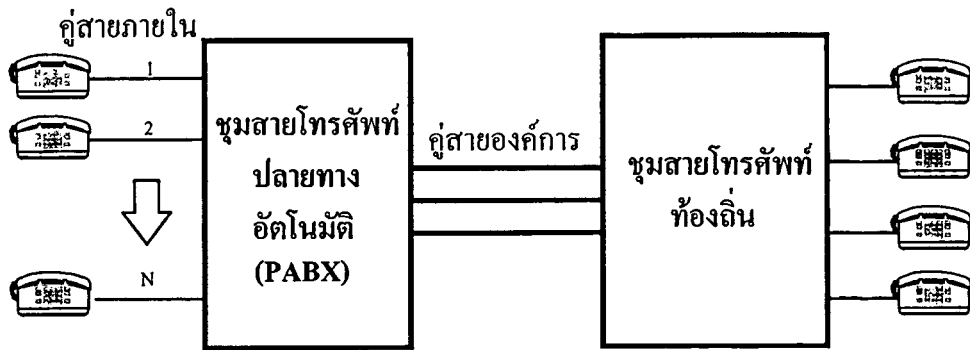
4.1.1.1 ขุมสายโทรศัพท์ที่มีเครื่องโทรศัพท์ของผู้เช่าต่อโดยตรง จะสามารถแบ่งออกได้เป็น

1.1 ขุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่น (Local exchange)

เป็นขุมสายโทรศัพท์ที่มีเครื่องโทรศัพท์ของผู้เช่าต่อเข้ามาโดยตรง ขุมสายแบบนี้จะมีขนาดตั้งแต่ร้อยเลขหมายจนถึงหมื่นเลขหมายหรือมากกว่านั้น ตามสภาพของพื้นที่และปริมาณการใช้งานโทรศัพท์

1.2 ขุมสายโทรศัพท์ปลายทางอัตโนมัติ (PABX)

ขุมสายโทรศัพท์ปลายทางอัตโนมัติ (PABX) นั้นจะมีทั้งการใช้พนักงานทำการสลับสายและการใช้ระบบสลับสายแบบอัตโนมัติ ในการติดต่อระหว่างผู้เรียกและผู้ถูกเรียก โดยจะมีลักษณะการทำงานเหมือนกับขุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่น เพียงแต่มีขนาดเล็กกว่า ทำการติดตั้งใน อาคาร สำนักงาน บริษัทฯลฯ เพื่อที่จะให้บริการการเรียกสำหรับผู้ใช้งานในสำนักงานโดยไม่ต้องผ่านขุมสายท้องถิ่น และใช้ติดต่อกับภายนอกของสำนักงานนั้นๆ โดยผ่านขุมสายท้องถิ่น จะทำให้จำนวนคู่สายโทรศัพท์ที่ต่อมายังสำนักงานและปริมาณการใช้บริการโทรศัพท์ของขุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่นจะลดลง ขุมสายโทรศัพท์แบบนี้จะสามารถให้บริการพิเศษแก่สมาชิกภายในขุมสายได้หลายอย่างด้วยกัน เช่น การย่อหมายเลข การประชุมทางโทรศัพท์ การโอนสายกันระหว่างผู้ใช้ภายในขุมสาย การรับสายแทนกัน การพักสายด้วยเสียงคนตรี โดยบริการพิเศษนี้จะขึ้นอยู่กับความสามารถของแต่ละขุมสายนั้นๆ การเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้กับขุมสาย PABX และขุมสายท้องถิ่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการเชื่อมต่อของผู้ใช้กับชุมสายโทรศัพท์โดยผ่านชุมสาย PABX

4.1.1.2. ชุมสายโทรศัพท์ที่ไม่มีเครื่องโทรศัพท์ของผู้เช่าต่อโดยตรง

จะเป็นชุมสายโทรศัพท์ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารและให้บริการกันเองระหว่างชุมสาย เพื่อให้การติดต่อระหว่างผู้ใช้งานนั้นๆ ประสบความสำเร็จ โดยจะไม่มีเครื่องโทรศัพท์ของผู้เช่าต่อเข้ายังชุมสายนี้เลย

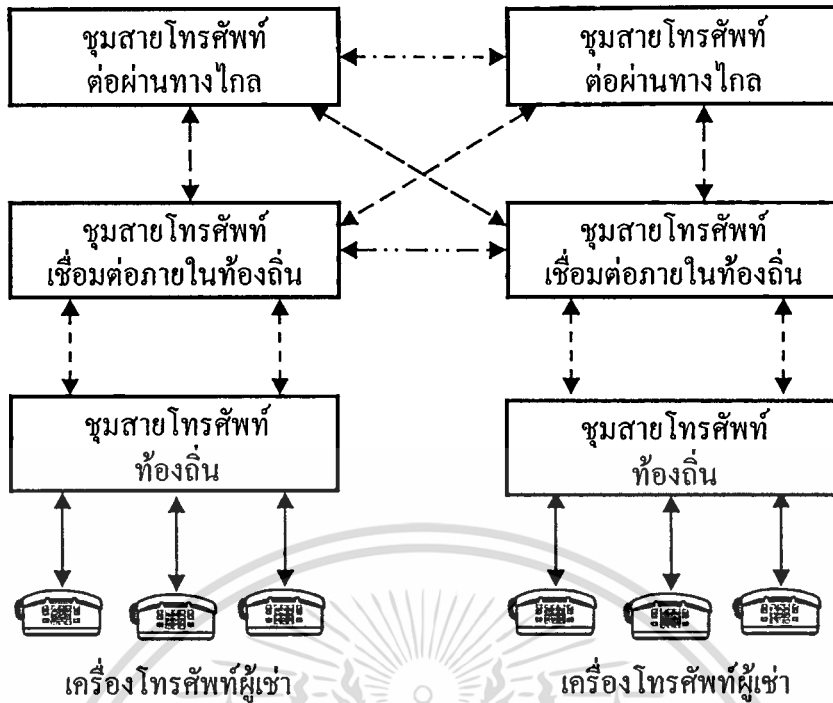
1. ชุมสายโทรศัพท์เชื่อมต่อภายในท้องถิ่น (Tandem exchange)

เป็นชุมสายโทรศัพท์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อภายในชุมสายท้องถิ่นเดียวกัน เพื่อให้บริการการเรียกภายในชุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่นนั้น และเป็นชุมสายต่อร่วมระหว่างชุมสายต่อผ่านท้องถิ่นของ TA กับชุมสายต่อผ่านท้องถิ่น TOT โดยจะใช้ในบริเวณที่มีความหนาแน่นของการใช้โทรศัพท์สูงหรือบางครั้งอาจจะเรียกว่า Tandem switch ดังแสดงในรูปที่ 4.2

2. ชุมสายโทรศัพท์ต่อผ่านทางไกล (Transit exchange)

เป็นชุมสายโทรศัพท์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างชุมสายโทรศัพท์เชื่อมต่อภายในท้องถิ่นกับชุมสายโทรศัพท์เชื่อมต่อภายในท้องถิ่นอื่นๆ เช่นการเรียกจากจังหวัดหนึ่งไปยังอีกจังหวัดหนึ่งต้องผ่านชุมสายต่อผ่านทางไกล ดังแสดงในรูปที่ 4.2

ในการเรียกโทรศัพท์ครั้งหนึ่งระหว่างผู้เช่าสองคน อาจจะมีการเรียกผ่านไปยังชุมสายโทรศัพท์หลายชุมสายก็ได้ โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะการวางโครงข่ายของชุมสายโทรศัพท์ของแต่ละพื้นที่ และพื้นที่การให้บริการของผู้เช่า โดยชุมสายโทรศัพท์จะทำการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากผู้ที่ทำกรเรียกไปยังผู้ถูกเรียก



รูปที่ 4.2 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างชุมสายโทรศัพท์และเครื่องโทรศัพท์ผู้ใช้

4.1.1.3 สัญญาณต่างๆในคู่สายโทรศัพท์ขององค์การโทรศัพท์ฯ

คู่สายภายนอกที่ต่อออกมาจากชุมสายโทรศัพท์ขององค์การโทรศัพท์ฯ ไปยังเครื่องโทรศัพท์ของผู้ใช้ จะมีสายสัญญาณอยู่ 2 เส้น คือเส้นทาบ (Tip) และเส้นริง (Ring) โดยจะมีไฟเลี้ยงกระแสตรงขนาด 48 โวลต์ส่งมากับคู่สายทั้งสองเส้นนี้ด้วย ในการติดต่อก็จะทำการติดต่อผ่านสายสัญญาณสองเส้นนี้ โดยสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อจะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ ได้แก่ สัญญาณเสียงพูด จะเป็นเสียงที่พูดคุยในระหว่างการติดต่อโทรศัพท์ระหว่างผู้เรียกกับผู้ถูกเรียก และสัญญาณควบคุมต่างๆ ซึ่งจะเป็นสัญญาณที่ชุมสายโทรศัพท์ส่งออกมาเพื่อทำการติดต่อกับเครื่องโทรศัพท์ผู้เช่า หรือติดต่อกับชุมสายโทรศัพท์ด้วยตัวเอง เพื่อแสดงสถานะการทำงานในขณะนั้น ดังจะมีรายละเอียดตามมาตรฐานของ CCITT ดังต่อไปนี้

1. สัญญาณให้หมุน (Dial tone)

เป็นสัญญาณที่ชุมสายโทรศัพท์ขององค์การโทรศัพท์ฯ ส่งไปยังเครื่องโทรศัพท์ เมื่อมีการยกหูโทรศัพท์ เพื่อบอกให้ผู้ใช้บริการทราบว่าชุมสายโทรศัพท์พร้อมที่รับสัญญาณในการติดต่อจากโทรศัพท์ของผู้ใช้แล้ว หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สัญญาณแมวกรน ลักษณะของสัญญาณจะมีความถี่ประมาณ 400-450 Hz ดังต่อไปนี้

2. สัญญาณเรียกกลับ (Ringback tone)

เป็นสัญญาณที่ชุมสายโทรศัพท์ส่งออกไปยังเครื่องโทรศัพท์ หลังจากที่ผู้ให้บริการทำการกดหมายเลขโทรศัพท์ที่ต้องการจะติดต่อ เพื่อแจ้งให้ผู้ให้บริการทราบว่าสามารถทำการติดต่อกับหมายเลขนั้นได้แล้ว สัญญาณเรียกกลับจะเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง มีลักษณะความถี่เดียว มีความถี่อยู่ระหว่าง 400-450 Hz มีจังหวะการดังและหยุดของสัญญาณ ทางองค์การโทรศัพท์ใช้สัญญาณมีลักษณะแบบดัง 1 วินาที และเงียบ 3 วินาที โดยจะอยู่ในมาตรฐานของ CCITT ที่กำหนดไว้ดังนี้

-จังหวะดัง ควรอยู่ในช่วง 0.67 ถึง 1.5 วินาที แต่ไม่เกิน 2.5 วินาที

-จังหวะหยุด ควรอยู่ในช่วง 3 ถึง 3.5 วินาที แต่ไม่เกิน 6 วินาที

3. สัญญาณไม่ว่าง (Busy tone)

เป็นสัญญาณที่ชุมสายโทรศัพท์ส่งไปยังเครื่องโทรศัพท์ หลังจากที่ผู้ให้บริการทำการกดหมายเลขโทรศัพท์ที่ต้องการจะติดต่อแล้ว เพื่อแจ้งให้ผู้ให้บริการทราบว่าไม่สามารถทำการติดต่อกับหมายเลขนั้นได้หรือหมายเลขที่ทำการเรียกไปนั้นไม่ว่าง ผู้เรียกควรวางหูสักระยะแล้วค่อยทำการเรียกใหม่ สัญญาณไม่ว่างจะเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องมีลักษณะดังแล้วหยุดเหมือนกับสัญญาณเรียกกลับ แต่มีคาบเวลาที่แตกต่างกัน โดยจะมีความถี่ประมาณ 400-450 Hz เสียงดังเป็นเวลาประมาณ 0.5วินาที เงียบ 0.5 วินาที

4. สัญญาณกริ่งเรียกหรือสัญญาณกระดิ่ง (Ringing tone)

เป็นสัญญาณที่ชุมสายโทรศัพท์ส่งไปยังเครื่องโทรศัพท์ของผู้ถูกเรียก จะทำให้กระดิ่งของเครื่องโทรศัพท์ดังขึ้น เพื่อที่จะแจ้งให้ผู้ถูกเรียกทราบว่ามีคนกำลังต้องการที่จะติดต่อกับ สัญญาณกริ่งหรือสัญญาณกระดิ่งนี้ จะมีจังหวะการดังและเงียบเหมือนกับสัญญาณเรียกกลับคือจะดัง 1 วินาที และเงียบ 3 วินาที ลักษณะของสัญญาณจะเป็นสัญญาณกระแสสลับที่มีความถี่ประมาณ 25 Hz และมีแรงดันประมาณ 100 Vp-p

5. สัญญาณหมายเลข (Register signal)

สัญญาณหมายเลขเป็นสัญญาณที่ส่งจากเครื่องโทรศัพท์ของผู้เรียกไปยังชุมสายโทรศัพท์ เพื่อบอกให้ชุมสายทราบถึงหมายเลขที่ต้องการที่จะติดต่อกับ สัญญาณหมายเลขจะมีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ สัญญาณแบบพัลส์ จะส่งออกมาจากเครื่องโทรศัพท์แบบหมุน ซึ่งจะส่งสัญญาณพัลส์ออกมาเป็นช่วงๆ ตามหมายเลขที่ทำการหมุน และสัญญาณความถี่คู่ผสมหรือสัญญาณความถี่ DTMF (Dual Tone Multi Frequency) โดยการส่งหมายเลขหนึ่งหมายเลขใด จะประกอบด้วยสัญญาณความถี่ 2 ความถี่ที่ถูกมอดูเลทกันส่งออกไป ตัวอย่างเช่นในการกดหมายเลข 5 ก็จะมี

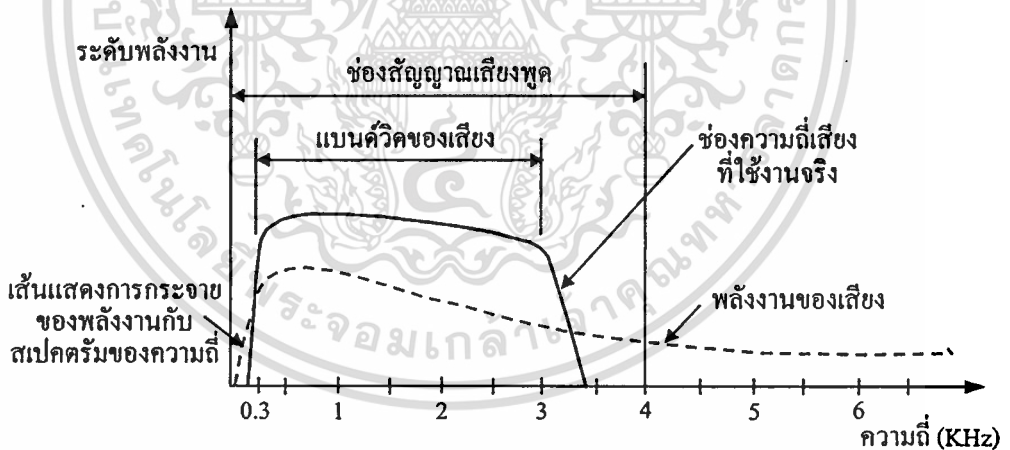
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 770 Hz กับความถี่ 1336 Hz ที่ถูกมอดูเลทกันส่งออกมาจากเครื่องโทรศัพท์แบบคดปุ่มไปยังชุมสายโทรศัพท์

6. สัญญาณเสียงพูด (Voice signal)

ทาง CCITT ได้มีการกำหนดให้ย่านความถี่เสียงพูด (Voice Channel หรือ VF Channel) มีช่วงความถี่อยู่ที่ 0- 4,000 Hz แต่สัญญาณเสียงพูดที่ฟังแล้วสามารถจับใจความได้จะมีความถี่อยู่ในช่วง 200 Hz – 4,000 Hz อย่างไรก็ตาม ช่วงความถี่ของเสียงพูดในการใช้งานจริงจะอยู่ในช่วง 300 Hz – 3,000 Hz เท่านั้น ไม่ได้ใช้งานเต็มช่องสัญญาณ จะเห็นว่าสัญญาณควบคุมต่างๆที่ใช้ในชุมสายโทรศัพท์ก็จะมีช่วงความถี่อยู่ในย่านนี้ด้วย

นอกจากนี้ในสายสัญญาณก็จะมีสัญญาณรบกวนปรากฏอยู่ภายในสายด้วย ซึ่งอาจจะเกิดได้จากหลายๆสาเหตุ เช่น จากสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิ สายส่งไฟฟ้ากำลังสูงๆ ที่อยู่ใกล้กับสายสัญญาณ หรือแม้แต่ข้อต่อของสายสัญญาณที่ทำการเชื่อมต่อไม่ดีก็มีผลด้วย สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้มีการผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงในสายสัญญาณขึ้น นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนอีกชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญมากในระบบโทรศัพท์ก็คือ สัญญาณเสียงสะท้อน (Echo) ซึ่งมีสาเหตุมาจากเกิดความไม่สมดุลกันระหว่างอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณกับอุปกรณ์ทางด้านเอาท์พุท



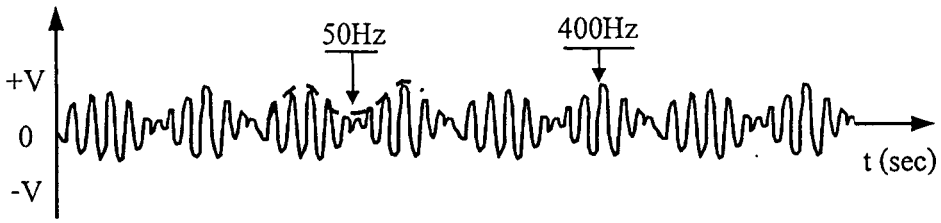
รูปที่ 4.3 แสดงแถบความถี่ของสัญญาณเสียง

4.1.2. เครื่องโทรศัพท์

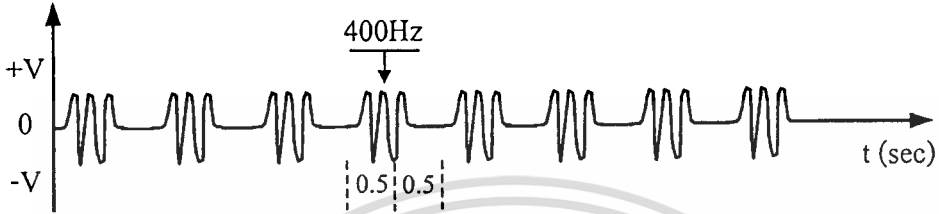
เครื่องโทรศัพท์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากสำหรับชุมสาย จะติดตั้งอยู่ที่สำนักงานหรือที่พักอาศัยของผู้เช่า มีหน้าที่ส่งสัญญาณเรียกหรือสัญญาณหมายเลขไปยังชุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่น และใช้สำหรับผู้เรียกและผู้ถูกเรียกในการพูดและฟังผ่านชุมสายโทรศัพท์ โดยเมื่อต้องการที่จะทำการเรียกหรือติดต่อก็ทำการหมุน หรือกดหมายเลขของผู้รับที่หน้าปัดของเครื่องโทรศัพท์ เพื่อแจ้งให้ชุมสายทำการติดต่อให้

เครื่องโทรศัพท์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันนี้จะมีอยู่สองระบบได้แก่ ระบบโทรศัพท์แบบพัลส์ หน้าปัดแบบหมุน เป็นระบบเดิมที่ใช้กันอยู่ในยุคแรกๆ โดยเครื่องโทรศัพท์แบบส่งสัญญาณพัลส์เมื่อทำการหมุนโทรศัพท์ หน้าปัดที่หมุนของโทรศัพท์นั้นจะเชื่อมต่ออยู่กับสวิทช์ ซึ่งจะทำให้สวิทช์นี้เปิดปิดเป็นจังหวะเท่ากับค่าตัวเลขที่หมุนเช่น หมุนหมายเลข 4 ก็จะทำให้สวิทช์มีการเปิดปิด 4 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ยกเว้นตัวเลข 0 จะทำให้เกิดการขัดจังหวะเป็นจำนวน 10 ครั้ง ขบวนการของพัลส์นี้เองที่จะเป็นสัญญาณบอกให้ชุมสายสามารถเลือกต่อคู่สายได้อย่างถูกต้อง

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบโทรศัพท์แบบส่งสัญญาณความถี่คู่หรือระบบโทรศัพท์แบบ DTMF (Dual Tone Multi Frequency) ขึ้นมาใช้แทนระบบแบบเก่า เพื่ออำนวยความสะดวกให้ผู้ใช้มากขึ้น เครื่องโทรศัพท์แบบกดปุ่มนี้จะใช้การส่งความถี่ออกไปแทน โดยในระบบนี้จะช่วยประหยัดเวลาในการส่งหมายเลข และลดความผิดพลาดในการส่งหมายเลขลง สามารถเพิ่มปุ่มอื่นๆ เพื่อใช้งานอย่างอื่น นอกจากปุ่มที่มีอยู่แล้ว โดยการกดปุ่มแต่ละครั้งก็จะมีการส่งสัญญาณความถี่ 2 ความถี่ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มความถี่ต่ำ และกลุ่มความถี่สูง ที่ถูกมอดูเลทกันออกไปแทนหมายเลขที่ต้องการส่งออกไป โดยความถี่นี้จะอยู่ในย่านความถี่เสียงพูด ดังมีค่าแสดงดังในรูปที่ 4.6 ยกตัวอย่างเช่น เมื่อมีการกดหมายเลข 1 ก็จะมีการผลิตความถี่ 697 Hz และ 1209 Hz ที่มีการมอดูเลทกันส่งออกไป



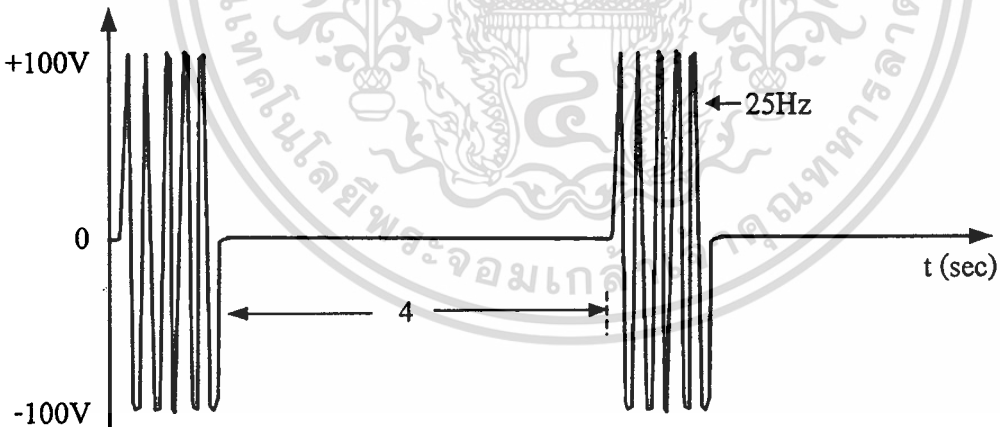
สัญญาณให้หมุน



สัญญาณไม่ว่าง



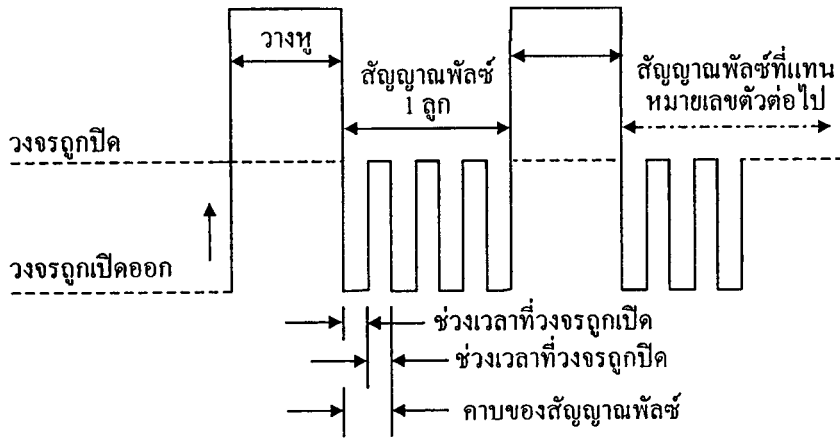
สัญญาณเรียกกลับ



สัญญาณกระดิ่ง

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะสัญญาณพื้นฐานของระบบโทรศัพท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของสัญญาณที่เกิดจากการหมุนหมายเลข 4

กลุ่มความถี่ต่ำ (Hz)	กลุ่มความถี่สูง (Hz)			
	1209	1336	1477	1633
579	1	2	3	A
770	4	5	6	B
852	7	8	9	C
941	*	0	#	D

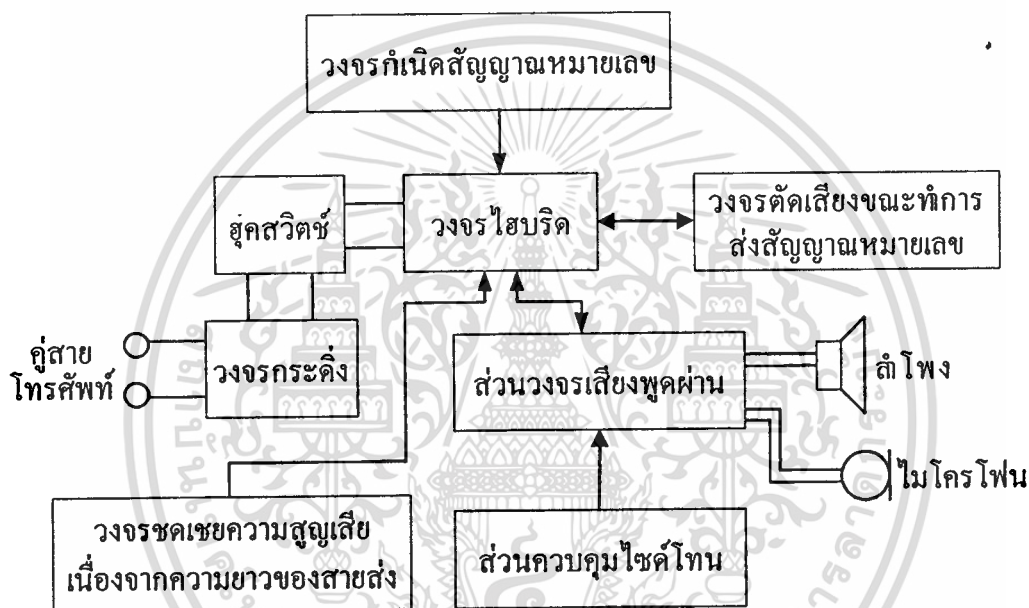
รูปที่ 4.6 แสดงค่าความถี่ในแต่ละหมายเลขของระบบโทรศัพท์ DTMF

เครื่องโทรศัพท์จะติดต่อกับชุมสายโทรศัพท์ด้วยสายสัญญาณสองสายคือสาย ทิป (Tip) และสายริง (Ring) ปกติเมื่อไม่มีการใช้โทรศัพท์ วงจรของเครื่องโทรศัพท์จะถูกตัดออกจากคู่สายของโทรศัพท์คงเหลือแต่วงจรกำเนิดเสียงเรียก (Ringing) หรือวงจรระดิงต่ออยู่กับชุมสายโทรศัพท์เท่านั้น เพื่อส่งสัญญาณเรียกเมื่อมีการติดต่อจากผู้อื่นเข้ามา ทำให้ในขณะที่โทรศัพท์ไม่ถูกใช้งานจะไม่มีกระแสไหลผ่านเครื่องรับโทรศัพท์ แต่เมื่อเรายกหูโทรศัพท์ก็จะมีการเชื่อมต่อเครื่องโทรศัพท์เข้ากับชุมสายขององค์การโทรศัพท์ เกิดการไหลของกระแสในวงจร โดยกระแสนี้จะมาจากแบตเตอรี่ในชุมสายโทรศัพท์ที่อยู่ใกล้ผู้เข้าโทรศัพท์มากที่สุด และเมื่อชุมสายโทรศัพท์เลือกคู่สายที่ต้องการจะต่อด้วยได้แล้ว ก็จะทำการส่งสัญญาณระดิง ซึ่งเป็นสัญญาณสัญญาณ AC ออกไปยังเครื่องรับโทรศัพท์ของผู้ถูกเรียก เพื่อทำการสั้นกระดิงให้ดังขึ้น เมื่อผู้ถูกเรียกยกหูโทรศัพท์รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายก็จะเกิดกระแส DC ไหล เมื่อชุมสายตรวจพบก็จะหยุดส่งสัญญาณกระดิ่ง ก็จะสามารถทำการสนทนาได้ โดยในส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างปากพูดและหูฟังกับสายโทรศัพท์ จะต้องมีการปรับอิมพีแดนซ์ของหูฟังและสายโทรศัพท์ให้สมดุลกัน เพื่อให้มีการรับและส่งสัญญาณอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด รวมทั้งทำให้ผู้พูดสามารถได้ยินเสียงของตนเองที่พูดออกไปด้วย เพื่อที่จะได้ปรับระดับการพูดของตนเองไม่ให้ดังหรือค่อยจนเกินไป

เครื่องโทรศัพท์ทั้งสองแบบจะมีลักษณะ โครงสร้างและการทำงานคล้ายๆกันดังแสดงในรูปที่ 4.7 จะมีความแตกต่างกันตรงที่ลักษณะของสัญญาณหมายเลขที่ทำการส่งไปยังชุมสายโทรศัพท์เท่านั้น



รูปที่ 4.7 แสดงบล็อกโคโอะแกรมของเครื่องรับโทรศัพท์

จากรูปที่ 4.7 จะสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

วงจรถูกนิโคสัญญาณหมายเลข จะทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณของหมายเลขโทรศัพท์ซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณพัลส์หรือสัญญาณความถี่คู่ผสมก็ได้แล้วแต่ชนิดของ โทรศัพท์ที่ใช้งาน

วงจรถัด ชุมสายโทรศัพท์จะส่งสัญญาณเรียกเข้ามาเป็นกระแสไฟสลับประมาณ 100-120 โวลต์ ส่งเข้ามายังวงจรถัดทำให้กระดิ่งดังขึ้น เพื่อแจ้งให้เจ้าของเครื่องทราบว่ามีการเรียกเข้ามา

วงจรตัดเสียง จะทำการตัดเสียงต่างๆมิให้เข้าไปในชุมสาย เพื่อป้องกันความผิดพลาด ถ้าหากบังเอิญมีสัญญาณเสียงที่มีความถี่ใกล้เคียงกับสัญญาณความถี่ของหมายเลขก็จะทำให้การส่งสัญญาณหมายเลขเกิดความผิดพลาดได้

วงจรไฮบริด เนื่องจากวงจรในเครื่องโทรศัพท์จะใช้ระบบ 4 สายนั่นก็คือใช้สองสายสำหรับส่งสัญญาณเสียงพูด และอีกสองสายสำหรับนำเสียงพูดจากอีกด้านหนึ่งมายังหูฟัง แต่ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องโทรศัพท์กับชุมสายโทรศัพท์จะเป็นระบบ 2 สาย จะติดต่อกันโดยใช้สายสัญญาณเพียงสองเส้นเพียงเท่านั้นเอง จึงต้องใช้วงจรไฮบริดทำการเชื่อมต่อระบบ 2 สาย และระบบ 4 สาย ให้สามารถติดต่อกันได้

ส่วนวงจรปากพูดและหูฟัง ส่วนนี้จะทำหน้าที่เสมือนวงจรเครื่องรับ และเครื่องส่งที่ใช้ในการติดต่อกันระหว่างเครื่องโทรศัพท์ของผู้เรียกและผู้ถูกเรียก เพื่อให้สามารถพูดคุยสนทนากันได้

การใช้งานโทรศัพท์ในการติดต่อกันระหว่างเครื่องโทรศัพท์ผู้ใช้ จะกระทำผ่านชุมสายโทรศัพท์ต่างๆที่องค์การโทรศัพท์ให้บริการดังมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.2

4.1.3 ลักษณะการติดต่อกันระหว่างเครื่องโทรศัพท์ของผู้เรียกและผู้ถูกเรียกในชุมสายโทรศัพท์

ในการติดต่อกันระหว่างเครื่องโทรศัพท์ผู้เรียกและเครื่องโทรศัพท์ผู้ถูกเรียกผ่านชุมสายโทรศัพท์จะมีวิธีการติดต่อกันดังนี้

การเรียกทางโทรศัพท์ (Telephone Call) การเรียกผ่านโครงข่ายโทรศัพท์ระหว่างผู้เรียกและผู้รับ

ผู้เรียก (Calling Subscriber) ผู้ที่ทำการติดต่อไปยังชุมสายโทรศัพท์เพื่อแจ้งหมายเลขที่ต้องการติดต่อ

ผู้รับ (Called Subscriber) ผู้ที่ได้รับ การติดต่อจากชุมสายโทรศัพท์ว่ามีการคนต้องการจะติดต่อด้วย

คู่สายโทรศัพท์ (Telephone Line) คือสายนำสัญญาณที่นำสัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนมาจากเสียงพูดไปยังจากผู้ทำการเรียกและผู้ที่ถูกเรียก

การติดต่อทางด้านผู้เรียก

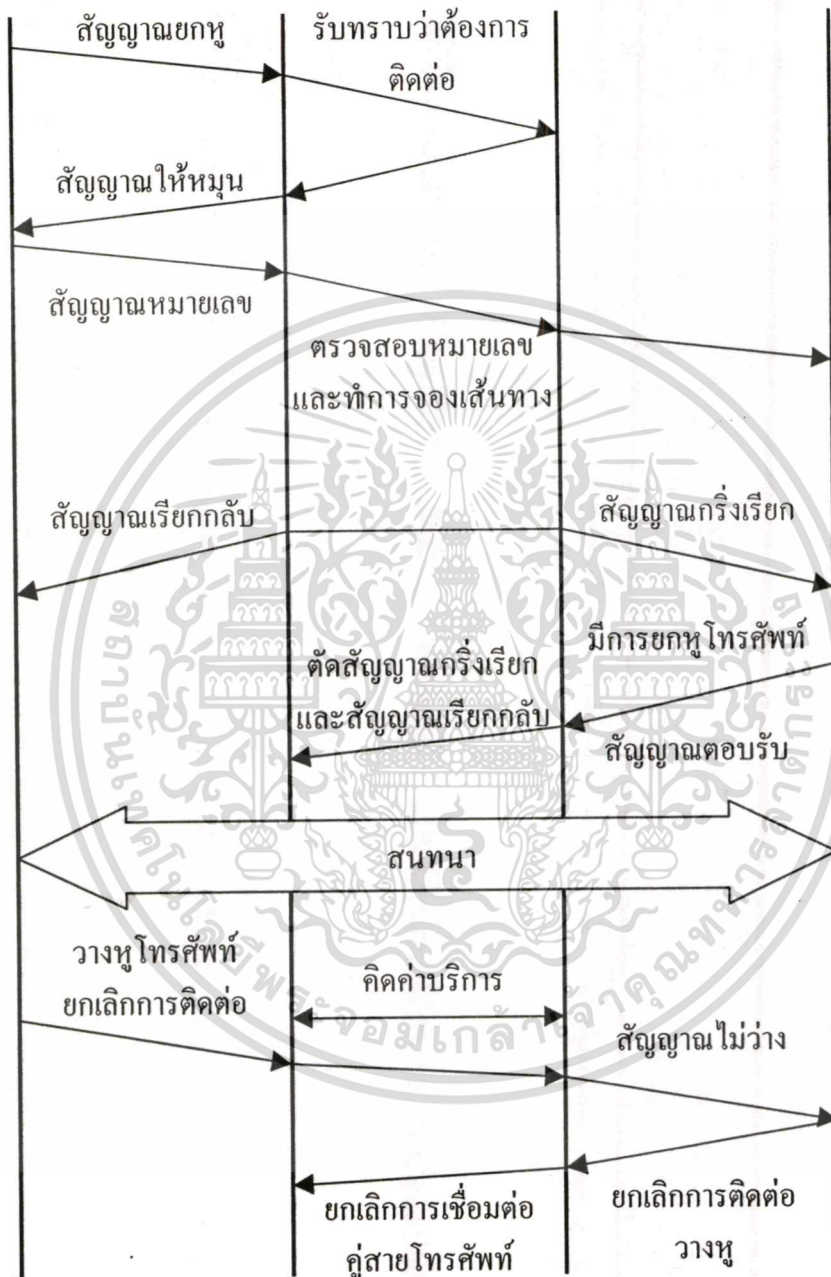
ในด้านผู้เรียกเมื่อยังไม่ยกหูจะมีแรงดันไฟตรงที่คู่สายประมาณ 48 V เมื่อผู้เรียกยกหูขึ้นทำการกดหมายเลขเพื่อโทรเรียกไปยังผู้รับ จะทำให้ระดับแรงดันไฟตรงที่คู่สายโทรศัพท์เปลี่ยนแปลงไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระดับ 48 โวลต์ เป็นประมาณ 6 โวลต์ ถึง 10 โวลต์ ชุมสายโทรศัพท์จะรับรู้ว่ามี การเริ่มต้นการเรียก ชุมสายโทรศัพท์ก็จะทำการจะส่งสัญญาณให้หมุนไปยังผู้เรียก เมื่อผู้เรียกได้ยื่นสัญญาณให้หมุนก็จะกดหมายเลขผู้รับ ในขณะที่กดหมายเลขวงจรภายในเครื่องโทรศัพท์ก็จะสร้างสัญญาณรหัสหมายเลขส่งไปยังชุมสายโทรศัพท์ตามหมายเลขที่กด ชุมสายจะตัดสัญญาณให้หมุนออกทันทีที่ได้รับหมายเลขโทรศัพท์ตัวแรก เมื่อชุมสายโทรศัพท์รับทราบหมายเลขผู้รับแล้วก็จะทำการกำหนดเส้นทางระหว่างผู้เรียกและผู้ถูกเรียกเพื่อใช้ในการสนทนา แต่ถ้าหากคู่สายด้านผู้รับไม่ว่าง ชุมสายจะส่งสัญญาณไม่ว่างไปยังผู้เรียกทราบ เพื่อให้ผู้เรียกทำการวางหู แล้วค่อยทำการเรียกใหม่ หากคู่สายด้านผู้รับว่างชุมสายจะส่งสัญญาณกริ่งเรียกไปยังเครื่องผู้ถูกเรียกพร้อมทั้งส่งสัญญาณเรียกกลับไปยังด้านผู้เรียกเพื่อแจ้งให้ทราบว่าจะสามารถติดต่อได้แล้ว เมื่อผู้ถูกเรียกได้ยินเสียงกริ่งเรียกแล้วทำการยกหูรับสาย ชุมสายโทรศัพท์ก็จะทำการยกเลิกสัญญาณเรียกกลับด้านผู้เรียก การสนทนาจึงจะสามารถเริ่มต้นได้

การติดต่อทางด้านผู้รับ

ด้านผู้รับเมื่อมีการเรียกจากภายนอกเข้ามา ชุมสายโทรศัพท์จะส่งสัญญาณกริ่งเรียกที่มีความถี่ 25 Hz และขนาดแรงดัน 100 Vp-p ไปยังผู้รับเพื่อทำการเรียกผู้รับ ทำให้กระดิ่งที่เครื่องโทรศัพท์ดังขึ้น ในกรณีที่ไม่มีผู้รับสายสัญญาณกริ่งเรียกก็ดังอยู่ประมาณ 15 ครั้ง หลังจากนั้นชุมสายจะทำการตัดสัญญาณเอง แล้วส่งสัญญาณไม่ว่างไปยังผู้เรียก เพื่อให้ผู้เรียกทำการวางหูโทรศัพท์ เพื่อทำการวางสายหรือทำการเรียกใหม่ ถ้าผู้รับสายยกหูโทรศัพท์ระดับแรงดันไฟตรงที่คู่สายโทรศัพท์ของผู้รับจะเปลี่ยนจาก 48 โวลต์ เป็น 10 โวลต์ เกิดสัญญาณตอบรับไปยังชุมสายโทรศัพท์ ชุมสายโทรศัพท์ก็จะทำการตัดสัญญาณกริ่งเรียกออกจากผู้รับ เพื่อให้คู่สนทนาพูดคุยกันได้ ในตอนนี้หน้าที่การทำงานของชุมสายในส่วนของการควบคุมก็จะหยุดลง มิเตอร์สำหรับเก็บค่าบริการของชุมสายก็จะเริ่มทำงาน เพื่อเก็บค่าบริการการใช้งานโทรศัพท์ในภายหลัง

เมื่อการสนทนาสิ้นสุดลง คู่สายสนทนาจึงทำการวางหุระดับแรงดันของคู่สายโทรศัพท์ก็จะเปลี่ยนเป็น 48 โวลต์เหมือนเดิม เกิดสัญญาณตอบรับไปยังชุมสายโทรศัพท์ให้รับรู้ว่าการสนทนาได้ยุติลงแล้ว



รูปที่ 4.8 แสดงการติดต่อระหว่างผู้เรียกและผู้ถูกเรียกในชุมสายโทรศัพท์

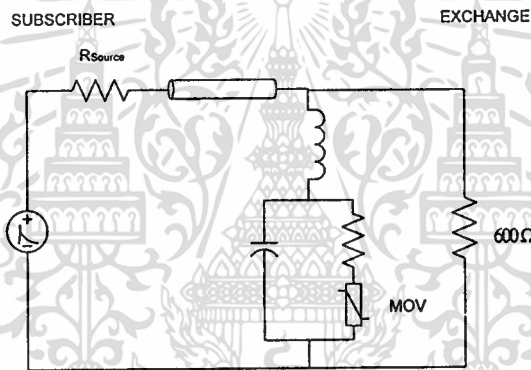
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบและผลการทดสอบ

5.1 การเลียนแบบการทำงาน

การจำลองผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการป้องกันเสิร์จระหว่าง Subscriber ถึง Exchange ในระบบโทรศัพท์แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยจำลอง Exchange เป็นความต้านทาน $600\ \Omega$ และพิจารณารูปแบบสายโทรศัพท์ (transmission line) เป็นแบบ Cascade lumped RLC เลือกใช้ชนิดของสายเป็น PVC-Self-Support Telephone Drop Wire (DW) และ FOAM/SKIN Insulation Alpth Sheathed Field Cable (AP-FSF) มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของความต้านทานเท่ากับ $28.5\ \Omega/\text{Km}$ และ $90.2\ \Omega/\text{Km}$ และค่าการเก็บประจุของสายเท่ากับ $56\ \text{pF}/\text{Km}$



รูปที่ 5.1 รูปจำลองวงจรในการแสดงผล

สำหรับอุปกรณ์เสิร์จที่ใช้ นั้น จะพิจารณาเลือกใช้เมทอลออกไซด์วาริสเตอร์เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เนื่องจากได้รับความนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำ และมีราคาไม่แพง โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ

MODEL	Size (mm)	C (pF)	L (μ H)	Vrms (V)	Energy (J)
B32K130	32	4400	20	130	210
B40K130	40	5600	19	130	310
B60K130	60	15000	27	130	490
B80K130	80	28000	30	130	660

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับคนใช้งานเพื่อส่งท้ายงานของท่านนี้เหมือนถาดหินไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างในการติดตั้ง (d) จะพิจารณาระยะห่างของสายโทรศัพท์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเป็น 1 กิโลเมตร จนถึง 6 กิโลเมตร โดยจะพิจารณาแหล่งกำเนิดเสิร์จที่ใช้ในการจำลองเป็น 2 แบบ ได้แก่ รูปคลื่นมาตรฐาน 8/20 μ s 3 kA และรูปคลื่นเสริม 10/1000 μ s 1 kA ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.31 และ 3.32

5.2 เงื่อนไขในการจำลองผล

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาดังพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการป้องกันเสิร์จในระบบโทรศัพท์ ดังนี้

- 1) ตำแหน่งในการติดตั้ง และระยะห่างที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ

พิจารณารูปคลื่นของแหล่งกำเนิดเสิร์จเป็น 8/20 μ s 3 kA และ 10/1000 μ s 1 kA จำลองผลตามวงจรที่แสดงในรูปที่ 5.1 ด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 5.2 โดยเลือกใช้สายชนิด DW และ AP-FSF และมีระยะห่างในการติดตั้งเท่ากับ 1 กิโลเมตร จนถึง 6 กิโลเมตร โดยเลือกใช้ อุปกรณ์ขจัดเสิร์จเป็น B32K130

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองผล

รูปคลื่นเสิร์จ	ชนิดสาย	1 กม.	2 กม.	3 กม.	4 กม.	5 กม.	6 กม.
8/20 μ s 3 kA	DW	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	AP-FSF	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10/1000 μ s 1 kA	DW	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	AP-FSF	✓	✓	✓	✓	✓	✓

- 2) ขนาดของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ

พิจารณาเลือกใช้ อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่มีขนาดแตกต่างกันตามตารางที่ 5.1 แล้วทำการจำลองผลตามวงจรในรูปที่ 5.1 โดยเลือกใช้สายชนิด DW และ AP-FSF เปรียบเทียบกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างในการติดตั้งเท่ากับ 1 กิโลเมตร จนถึง 6 กิโลเมตร และพิจารณารูปคลื่นของแหล่งกำเนิดเป็น 8/20 μ s 3 kA และ 10/1000 μ s 1 kA

5.3 ผลการทดลอง

หัวข้อนี้นำเสนอผลการเลียนแบบการทำงานของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จด้วยโปรแกรม PSPICE ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่ได้ศึกษาถึงผลกระทบของตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จระยะในการติดตั้ง ผลของรูปคลื่นและขนาดในการป้องกัน ซึ่งมีผลในการป้องกันระบบโทรศัพท์

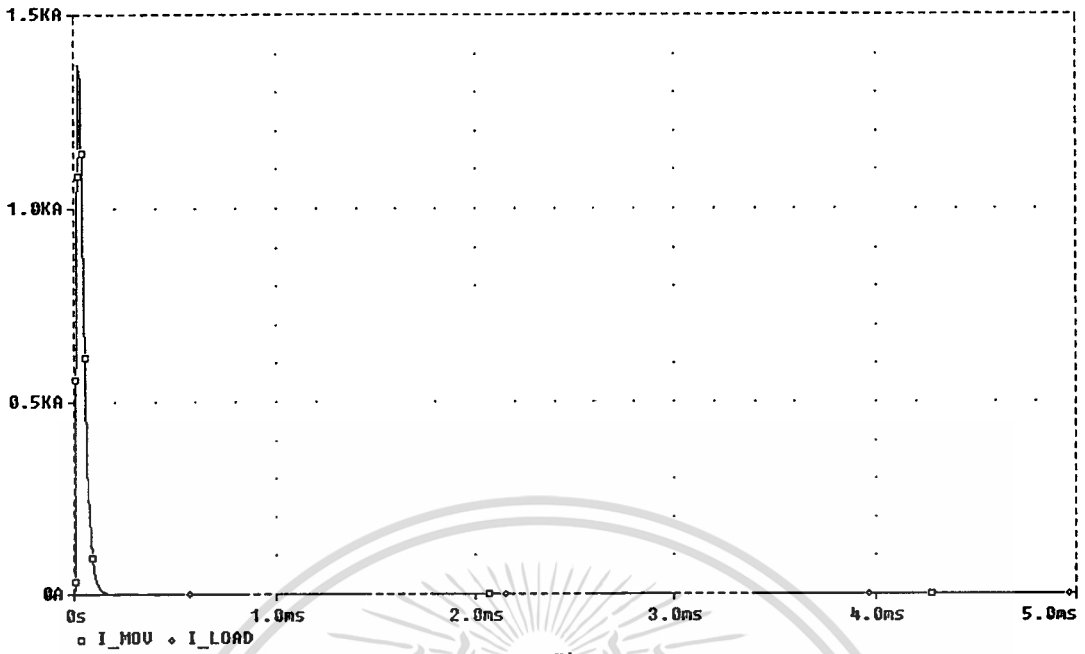
จากเสิร์จ โดยแบ่งเป็นหัวข้อในการวิเคราะห์ ดังนี้ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1 ตำแหน่งในการติดตั้งและระยะห่างที่เหมาะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ จำลองด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA

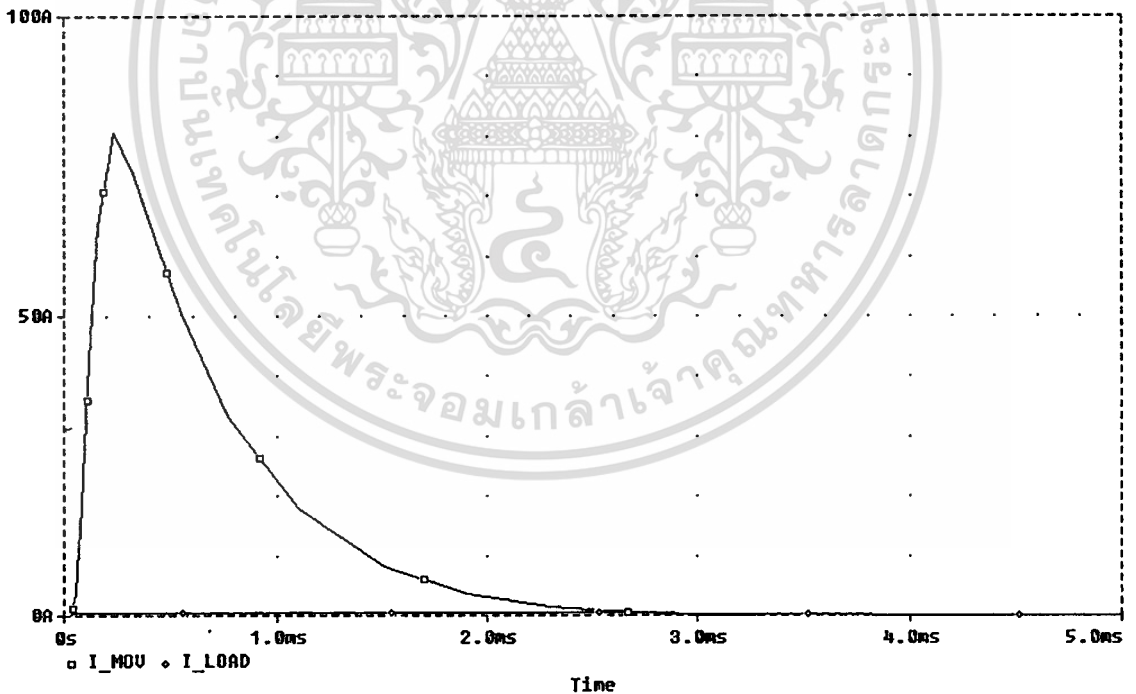
ตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.2-5.3 แสดงผลการเลียนแบบการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จในรูปของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จ และโหลด 600 Ω รวมทั้งพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จ รูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA ใช้สายโทรศัพท์ชนิด DW และ AP-FSF พิจารณาระยะห่างในการติดตั้งเท่ากับ 1 กิโลเมตร จนถึง 6 กิโลเมตร เลือกใช้อุปกรณ์ขจัดเสิร์จเป็น B32K130 จากผลการเลียนแบบการทำงานแสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จห่างจากแหล่งกำเนิดเสิร์จเป็นระยะทาง 6 กิโลเมตร คือตำแหน่งที่ติดกับโหลด 600 Ω มากที่สุด จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านโหลด 600 Ω ต่ำที่สุด รวมทั้งพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จต่ำที่สุด ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบจะสอดคล้องกันทั้งสายชนิด DW และ AP-FSF

ตารางที่ 5.3 ผลการเลียนแบบตำแหน่งในการติดตั้งและระยะห่างที่เหมาะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จในรูปของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานสะสม ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร โดยใช้ B32K130

ชนิดสาย	ระยะการติดตั้ง (km)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)		พลังงานสะสม (J)	
			MOV	600 Ω	MOV	600 Ω
DW	1	347.70	2,450.0	0.579	19.00	0.013
	2	305.30	717.90	0.511	16.96	0.050
	3	292.00	247.60	0.471	15.90	0.134
	4	269.60	100.70	0.448	14.90	0.266
	5	280.50	54.40	0.434	14.10	0.452
	6	254.20	30.50	0.422	13.60	0.695
AP-FSF	1	324.87	1,380.0	0.541	17.88	0.025
	2	283.34	264.41	0.472	15.96	0.127
	3	256.29	80.58	0.442	14.61	0.329
	4	254.99	32.85	0.425	13.67	0.659
	5	248.39	16.61	0.414	12.75	1.10
	6	243.56	9.52	0.406	11.89	1.64

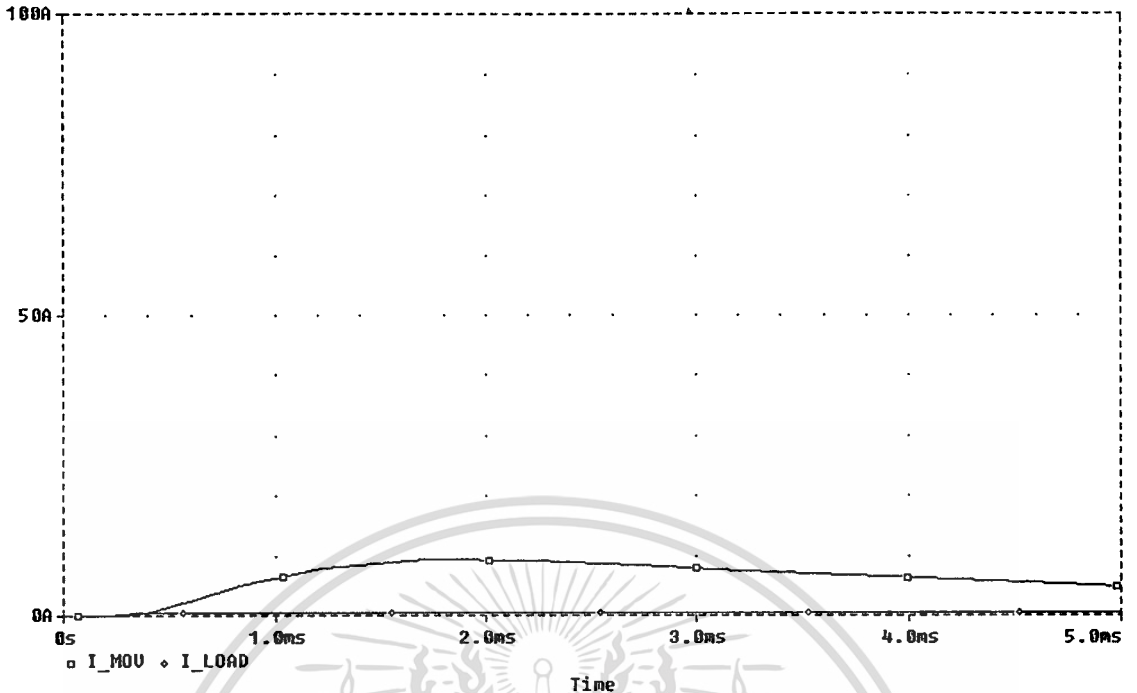


(a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร



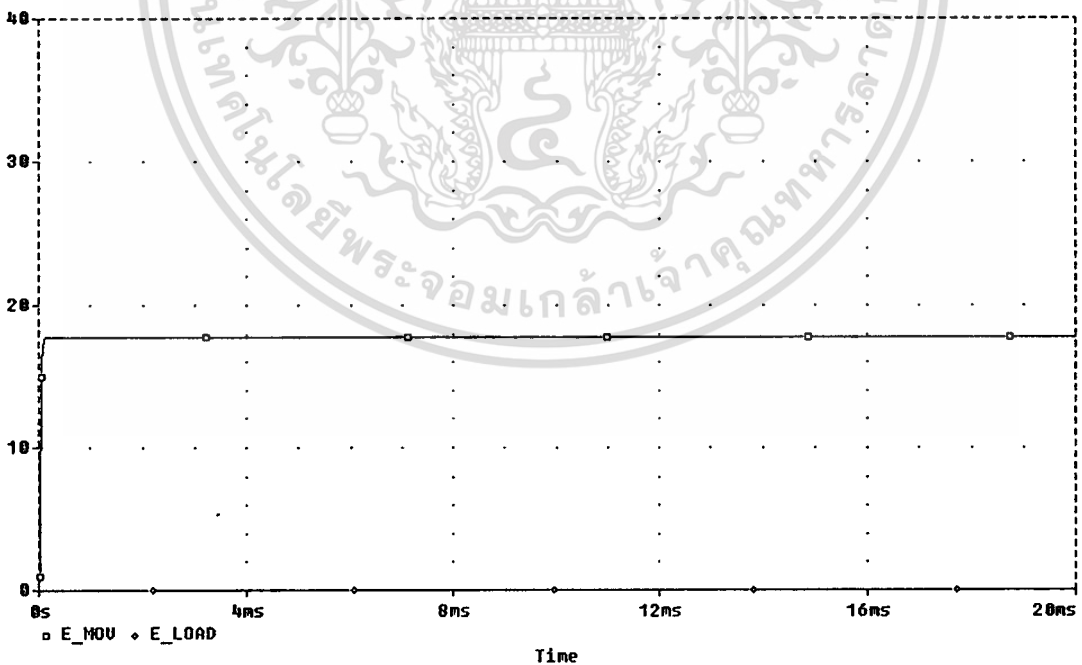
(b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 3 กิโลเมตร

รูปที่ 5.2 ระดับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเลียนแบบตำแหน่งในการติดตั้งและระยะที่เหมาะสม เมื่อเอกสารนี้เป็นติดตั้ง B32K130 ด้วยรูปคลื่น 8/20 3kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าของสาย AP-FSE ขนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.2 (ต่อ)



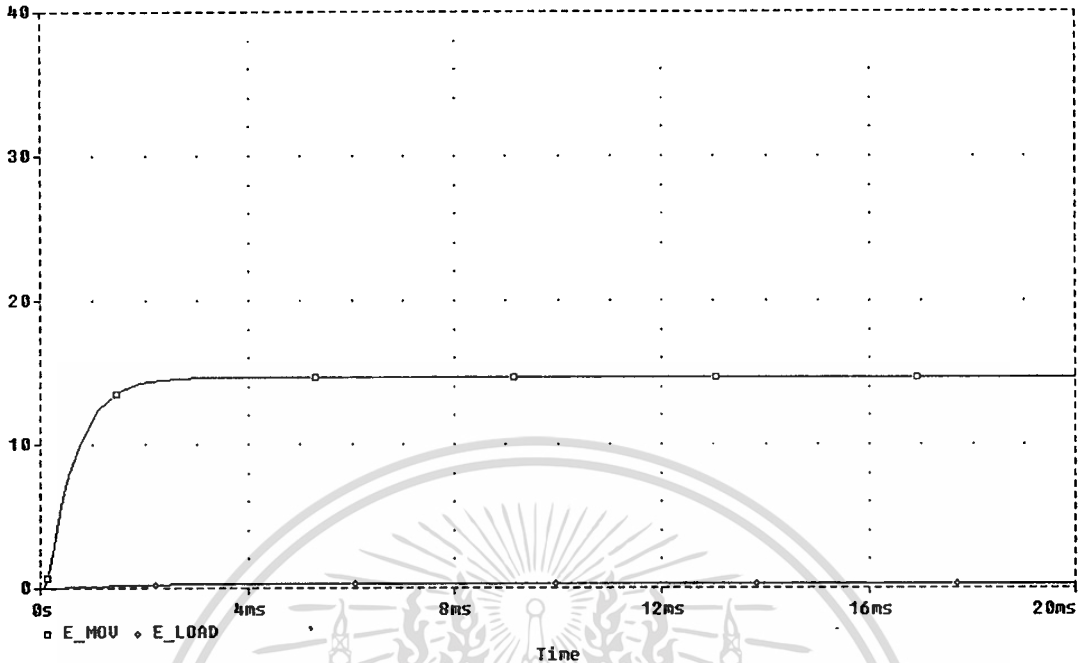
(a) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร

รูปที่ 5.3 ระดับพลังงานสะสมที่ได้จากการเลียนแบบตำแหน่งในการติดตั้งและระยะที่เหมาะสม

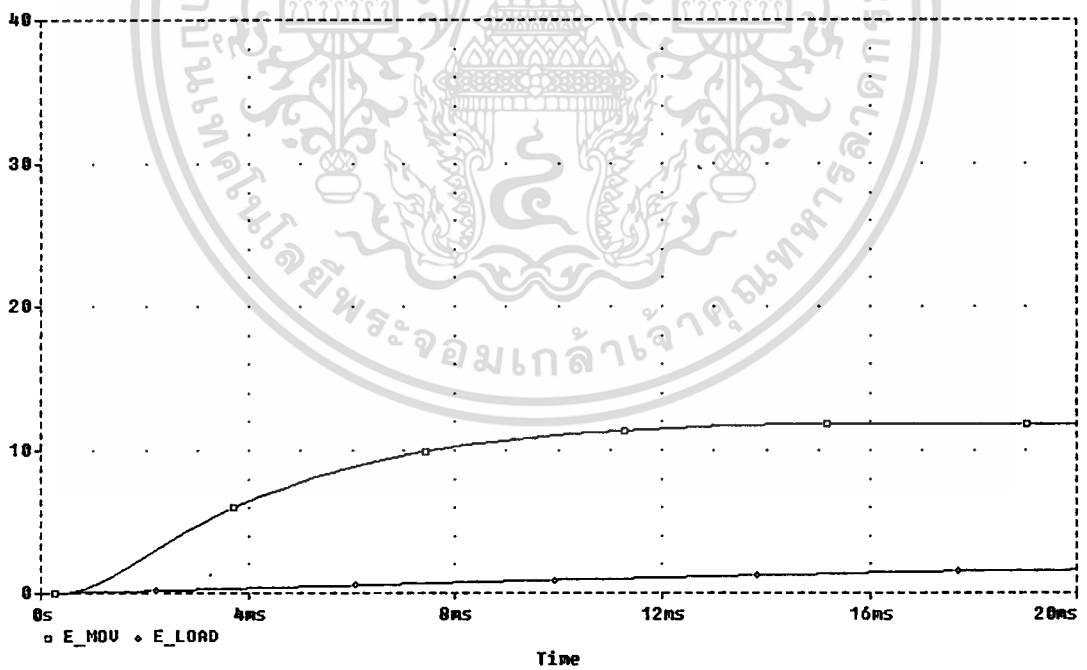
เมื่อติดตั้ง B32K130 ด้วยรูปคลื่น 8/20 3kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าของสาย AP-FSF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 3 กิโลเมตร



(c) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.3 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 ตำแหน่งในการติดตั้งและระยะห่างที่เหมาะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ จำลองด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1 kA

ตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.4 – 5.5 แสดงผลการเลียนแบบการติดตั้งอุปกรณ์ ขจัดเสิร์จในรูปของแรงดันไฟฟ้า กระแสสูงสุดที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จและโหลด 600 Ω รวมทั้งพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1 kA ใช้สายโทรศัพท์ชนิด DW และ AP-FSF พิจารณาระยะห่างในการติดตั้งจากแหล่งกำเนิดเท่ากับ 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร เลือกใช้อุปกรณ์ขจัดเสิร์จเป็น B32K130

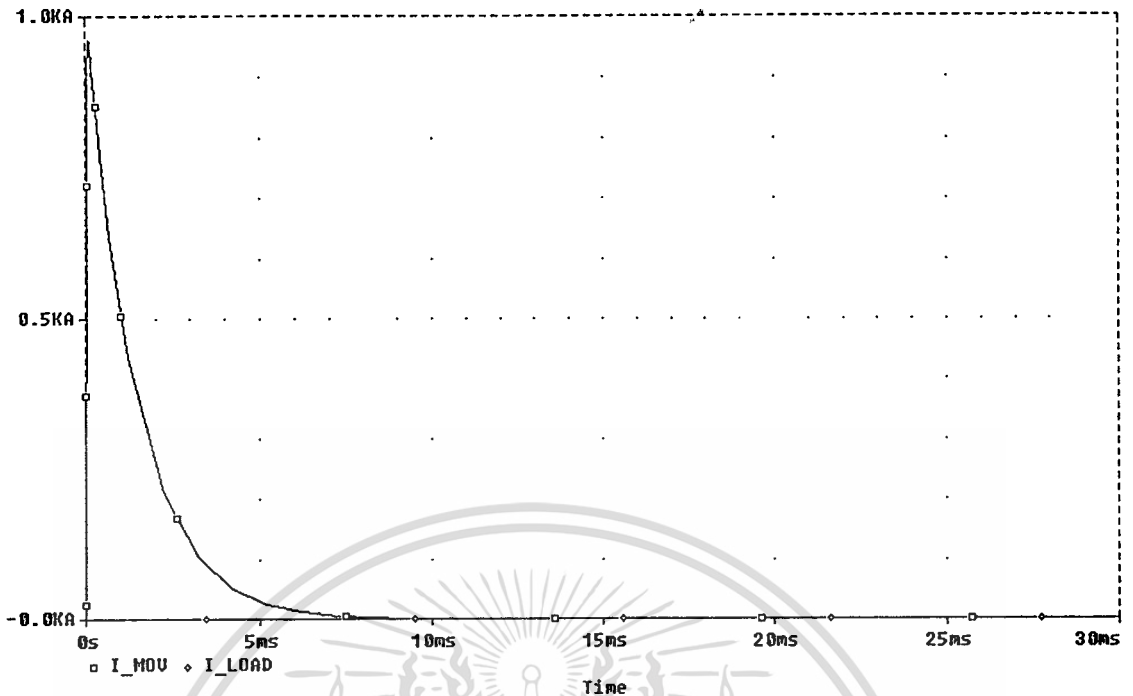
จากผลการเลียนแบบการทำงานแสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ระยะ 6 กิโลเมตร จากแหล่งกำเนิดเสิร์จ คือ โกลีกับโหลด 600 Ω มากที่สุดจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด 600 Ω ต่ำที่สุด รวมทั้งพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จต่ำสุดด้วย ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะสอดคล้องกันทั้งสายโทรศัพท์ชนิด DW และ AP-FSF

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับตารางที่ 5.3 พบว่าผลการเลียนแบบด้วยรูปคลื่นทั้ง 2 สอดคล้องกันถึงแม้ว่ารูปคลื่น 10/1000 μ s มีความเวลาการเกิดที่ยาวกว่า

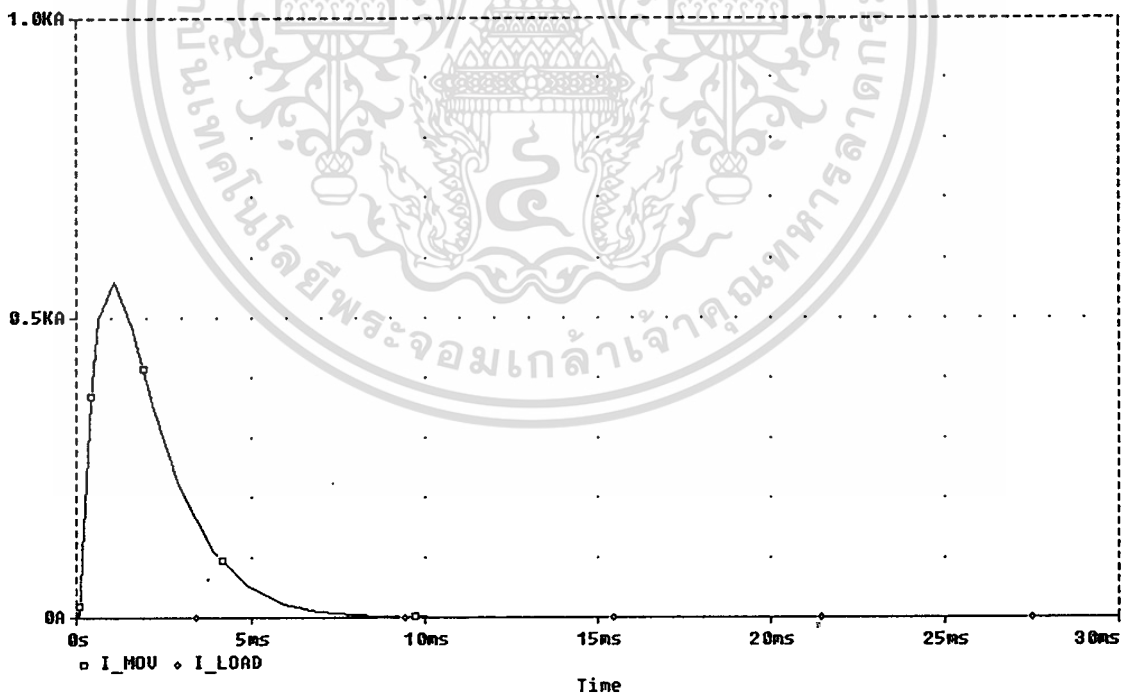
ตารางที่ 5.4 ผลการเลียนแบบตำแหน่งในการติดตั้งและระยะห่างที่เหมาะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ ในรูปของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานสะสม ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร โดยใช้ B32K130

ชนิดสาย	ระยะการติดตั้ง (km)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)		พลังงานสะสม (J)	
			MOV	600 Ω	MOV	600 Ω
DW	1	314.50	998.10	0.524	418.23	1.27
	2	311.49	904.24	0.519	417.99	1.28
	3	306.94	765.01	0.511	416.38	1.29
	4	300.91	607.16	0.502	414.98	1.33
	5	295.40	479.79	0.492	409.02	1.42
	6	299.96	372.22	0.480	400.25	1.66
AP-FSF	1	313.28	961.72	0.522	425.64	1.27
	2	307.89	795.49	0.513	421.54	1.30
	3	299.03	581.51	0.498	411.56	1.35
	4	290.03	373.49	0.483	404.00	1.59
	5	281.39	236.85	0.469	391.38	2.67
	6	277.36	196.37	0.462	386.33	3.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร



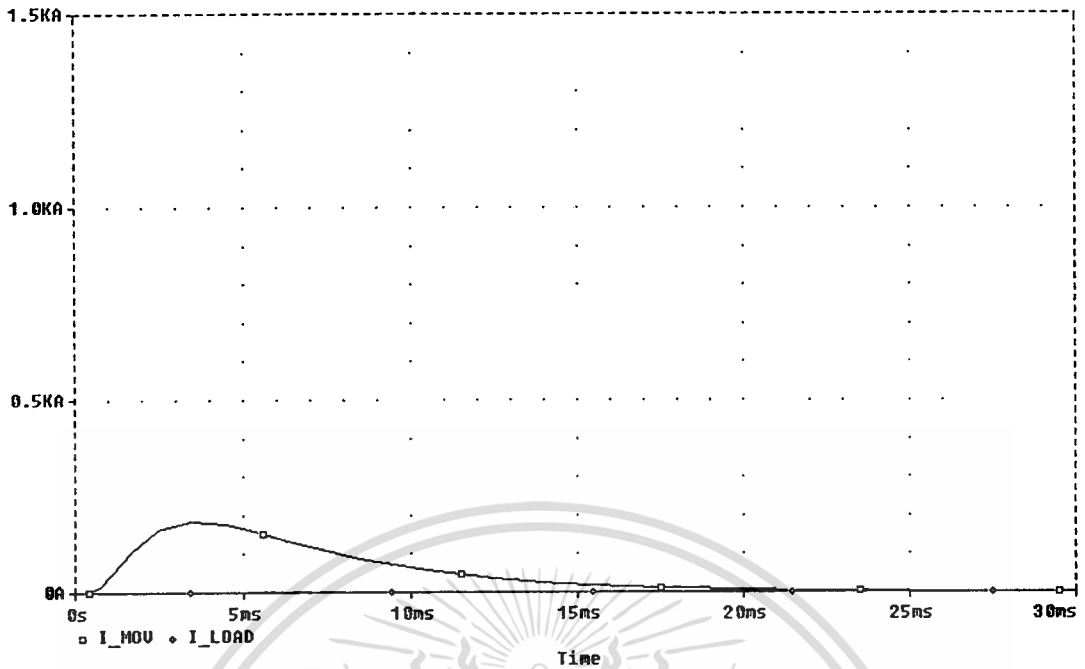
(b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 3 กิโลเมตร

รูปที่ 5.4 ระดับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเลียนแบบตำแหน่งในการติดตั้งและระยะที่เหมาะสม เมื่อ

ติดตั้ง B32K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 3 kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าของสาย AP-FSF

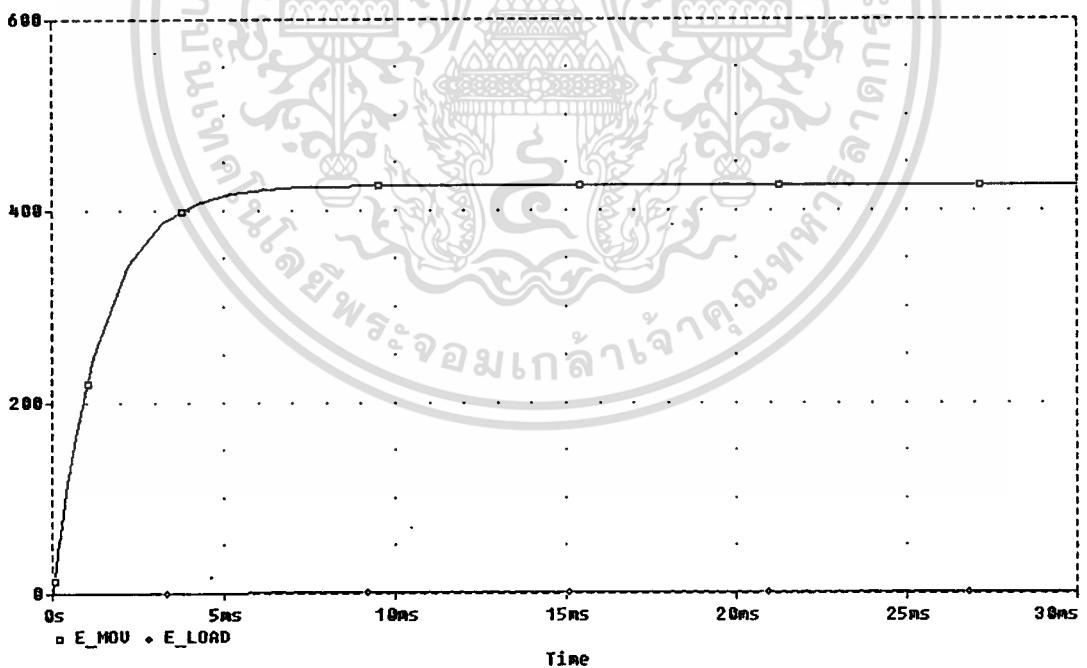
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจันทบุรีและศูนย์เทคโนโลยีพลังงานเพื่อชุมชน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

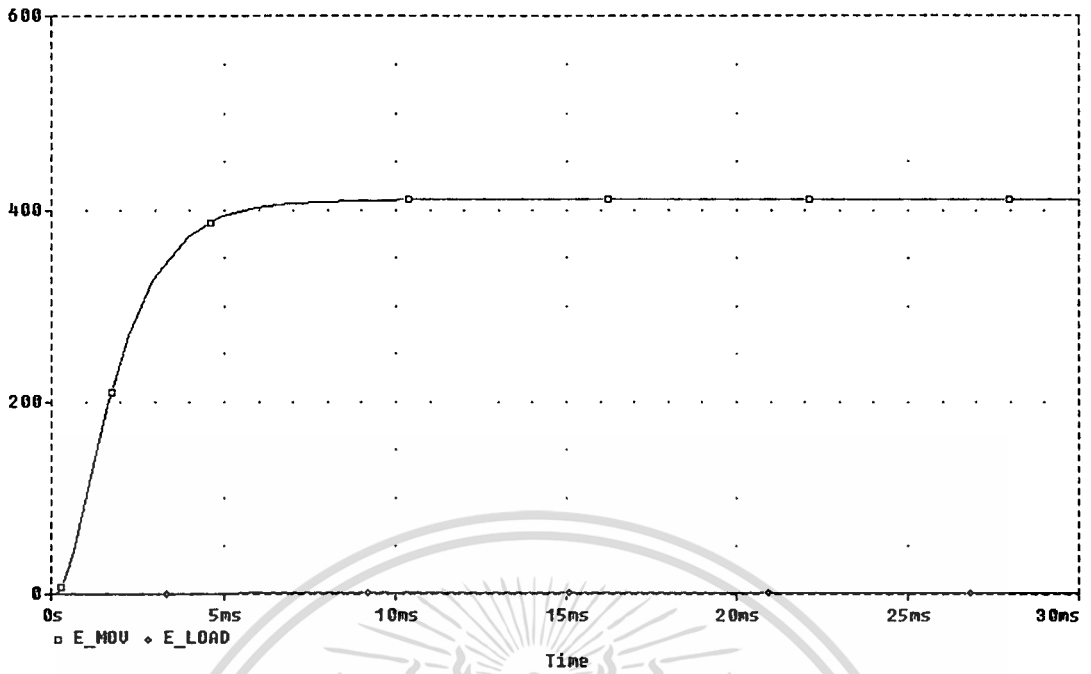
รูปที่ 5.4 (ต่อ)



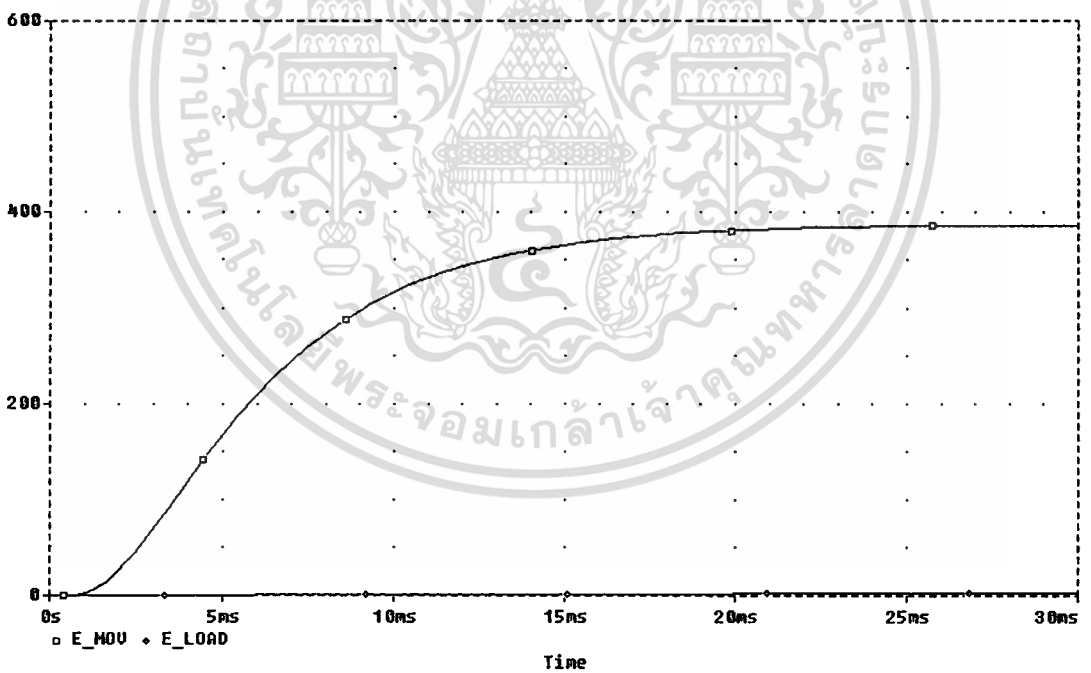
(a) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร

รูปที่ 5.5 ระดับพลังงานสะสมที่ได้จากการเขียนแบบตำแหน่งในการติดตั้งและระยะที่เหมาะสม เมื่อติดตั้ง B32K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 3 kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าของสาย AP-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 3 กิโลเมตร



(c) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.5 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ขนาดของอุปกรณ์เสริม จำลองด้วยคลื่น $8/20 \mu s$ 3 kA

ตารางที่ 5.5 – 5.6 และรูปที่ 5.6 – 5.13 แสดงผลการเลียนแบบขนาดของอุปกรณ์ ขจัดเสริม ในรูปของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์ขจัดเสริมและโหลด 600Ω รวมทั้งพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสริมด้วยรูปคลื่น $8/20 \mu s$ 3 kA พิจารณาระยะห่างในการติดตั้งจากแหล่งกำเนิดเท่ากับ 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร ใช้สายโทรศัพท์ชนิด DW และ AP-FSF เลือกใช้ขนาดอุปกรณ์ขจัดเสริมตามตารางที่ 5.1

จากผลการเลียนแบบการทำงานแสดงให้เห็นว่า ขนาดของอุปกรณ์ป้องกันมีผลต่อ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์ขจัดเสริม และโดยเฉพาะพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ป้องกัน กล่าวคือ ถ้าตัวอุปกรณ์ป้องกันมีพลังงานสะสมมากกว่าที่ผู้ผลิตกำหนด ก็จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันเสียหายได้ จากตารางที่ 5.5 และ 5.6 พบว่าอุปกรณ์ป้องกันเสริมสามารถทำงานได้โดยไม่เสียหายที่รูปคลื่น $8/20 \mu s$ 3 kA และ B80K130 จะให้ผลการป้องกันที่ดีที่สุด



ตารางที่ 5.5 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์จัดเสีร้งในรูปของ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานสะสมด้วยนรูปคลื่น $8/20 \mu s$ 3 kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร โดยใช้สายโทรศัพท์ชนิด DW

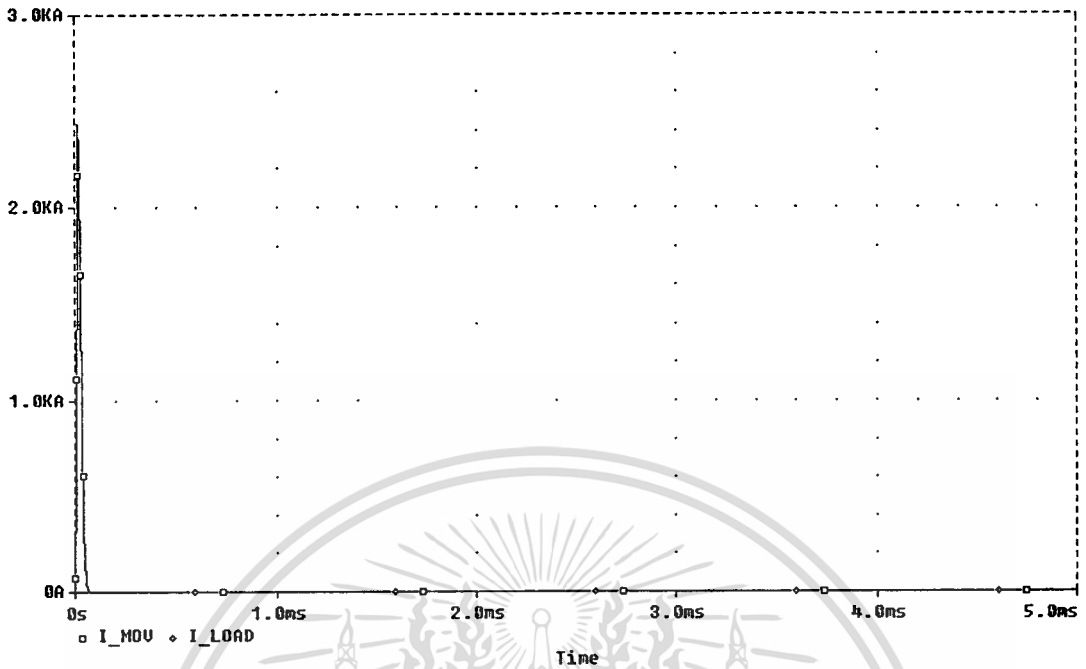
ชนิดสาย	ชนิดอุปกรณ์จัดเสีร้ง	ระยะการติดตั้ง (km)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)		พลังงานสะสม (J)	
				MOV	600 Ω	MOV	600 Ω
DW	B32K130	1	347.70	2,450.0	0.579	19.00	0.013
		2	306.30	717.90	0.511	16.96	0.501
		3	292.00	247.60	0.471	15.90	0.134
		4	269.60	100.70	0.448	14.90	0.266
		5	280.50	54.40	0.434	14.10	0.452
		6	245.20	30.50	0.422	13.60	0.695
	B40K130	1	329.90	2430.0	0.549	18.06	0.013
		2	296.08	736.50	0.493	16.55	0.048
		3	276.39	245.88	0.461	15.29	0.126
		4	264.98	105.09	0.442	14.44	0.257
		5	257.58	53.93	0.429	14.06	0.448
		6	252.03	30.48	0.420	13.48	0.689
	B60K130	1	311.65	2,440.0	0.519	17.69	0.012
		2	284.58	737.21	0.474	15.88	0.046
		3	268.84	250.67	0.448	14.99	0.123
		4	258.75	102.66	0.431	14.28	0.252
		5	252.45	53.04	0.421	13.81	0.437
		6	247.78	30.73	0.413	13.28	0.671
B80K130	1	299.68	2,410.0	0.499	16.65	0.011	
	2	268.55	743.47	0.448	15.32	0.043	
	3	252.29	257.721	0.421	14.71	0.114	
	4	242.32	02.52	0.404	13.42	0.232	
	5	236.72	52.94	0.395	12.97	0.389	
	6	232.85	30.97	0.388	12.55	0.614	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

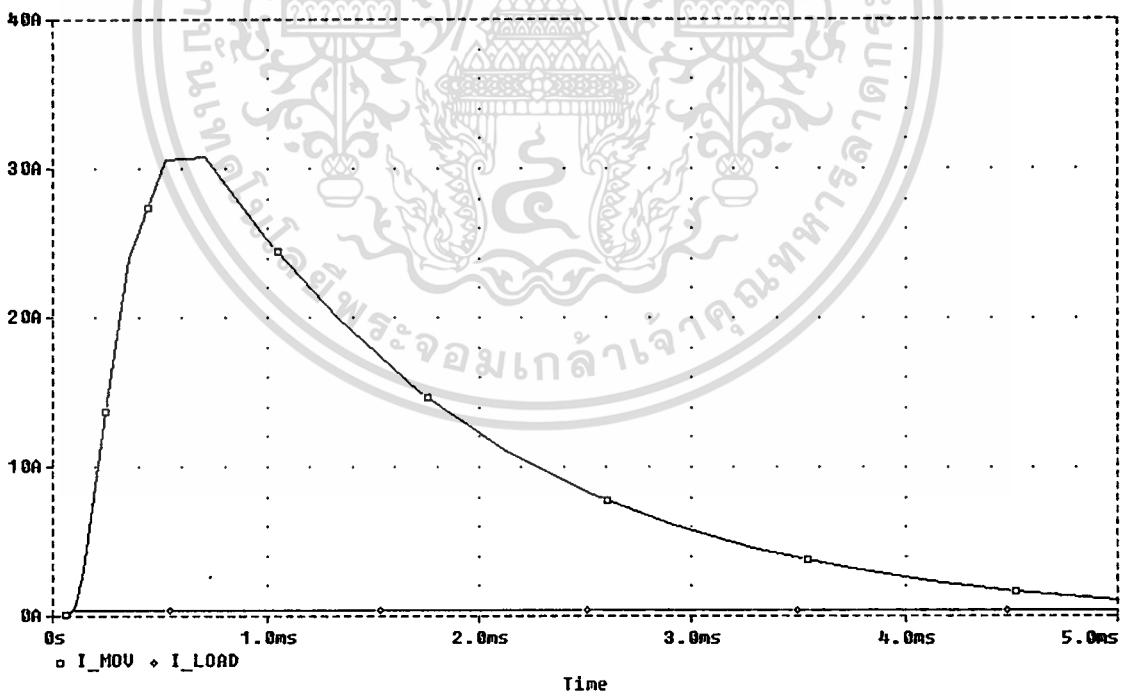
ตารางที่ 5.6 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์จัดเสิร์จในรูปของ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานสะสมด้วยรูปคลื่น $8/20 \mu s$ 3 kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร โดยใช้สายโทรศัพท์ชนิด AP-FSF

ชนิดสาย	ชนิดอุปกรณ์ จัดเสิร์จ	ระยะการ ติดตั้ง (km)	แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า สูงสุด (A)		พลังงาน สะสม (J)	
				MOV	600 Ω	MOV	600 Ω
AP-FSF	B32K130	1	324.87	1,380.0	0.541	17.88	0.025
		2	283.34	264.41	0.472	15.96	0.127
		3	265.29	80.58	0.442	14.61	0.329
		4	254.99	32.85	0.425	13.67	0.659
		5	248.39	16.61	0.414	12.75	1.100
		6	243.56	9.52	0.406	11.89	1.640
	B40K130	1	311.64	1,410.0	0.519	17.50	0.024
		2	277.40	262.76	0.462	15.46	0.119
		3	261.81	79.95	0.436	14.51	0.329
		4	252.77	33.00	0.421	13.59	0.656
		5	246.72	16.61	0.411	12.74	1.090
		6	242.23	4.48	0.404	11.85	1.640
	B60K130	1	297.29	1,390.0	0.495	16.62	0.023
		2	269.58	266.23	0.449	14.99	0.115
		3	255.87	76.75	0.426	14.08	0.322
		4	248.24	32.52	0.41	13.35	0.641
		5	242.97	16.63	0.405	12.56	1.070
		6	238.82	9.40	0.398	11.69	1.600
	B80K130	1	283.45	1,420.0	0.472	15.81	0.021
		2	252.56	263.06	0.421	14.14	0.107
		3	239.98	78.98	0.399	13.31	0.294
		4	233.24	32.80	0.389	12.58	0.583
		5	228.92	161.61	0.381	11.89	0.986
		6	225.77	9.46	0.376	11.17	1.480

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร



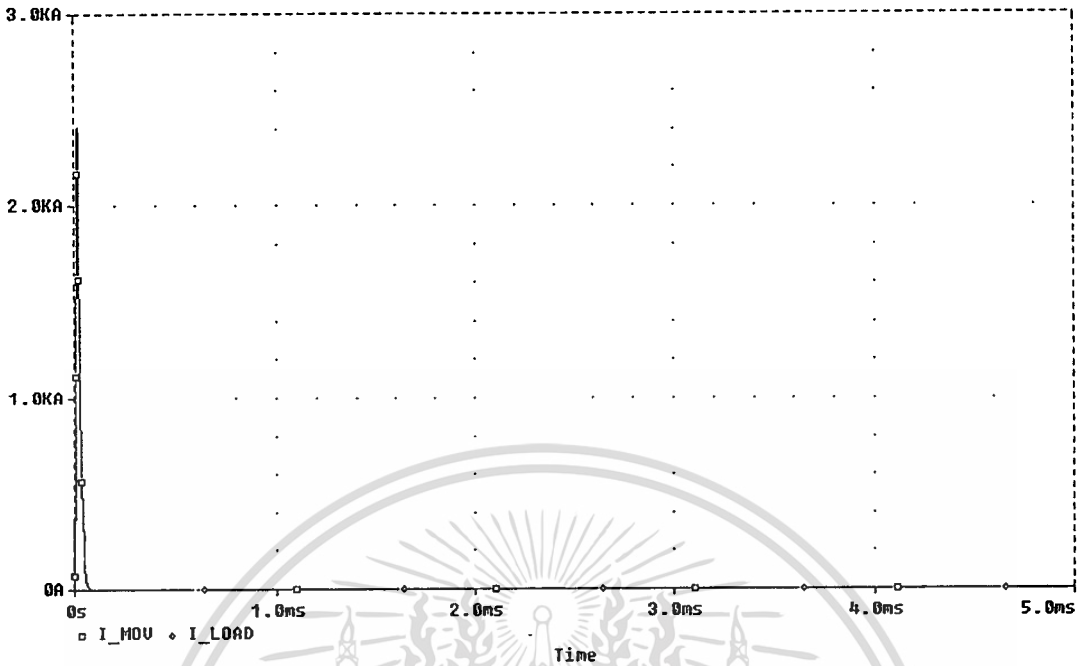
(b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.6 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์จัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น $8/20 \mu s$ 3 kA

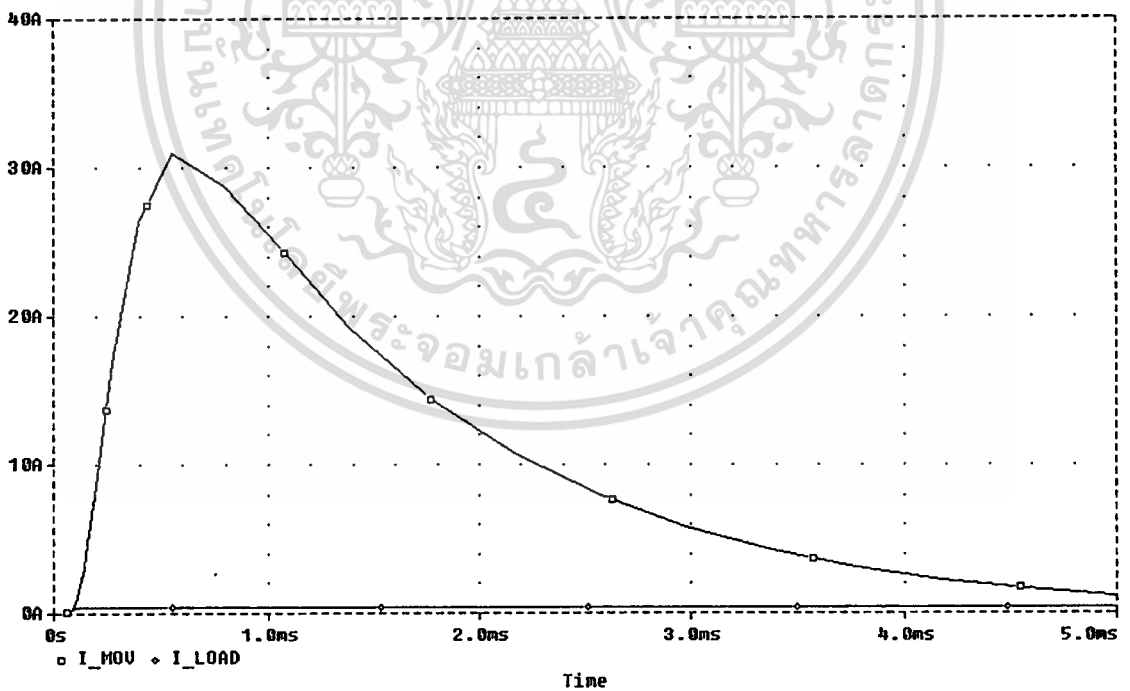
ในรูปของกระแสไฟฟ้สูงสุดสาย DW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร

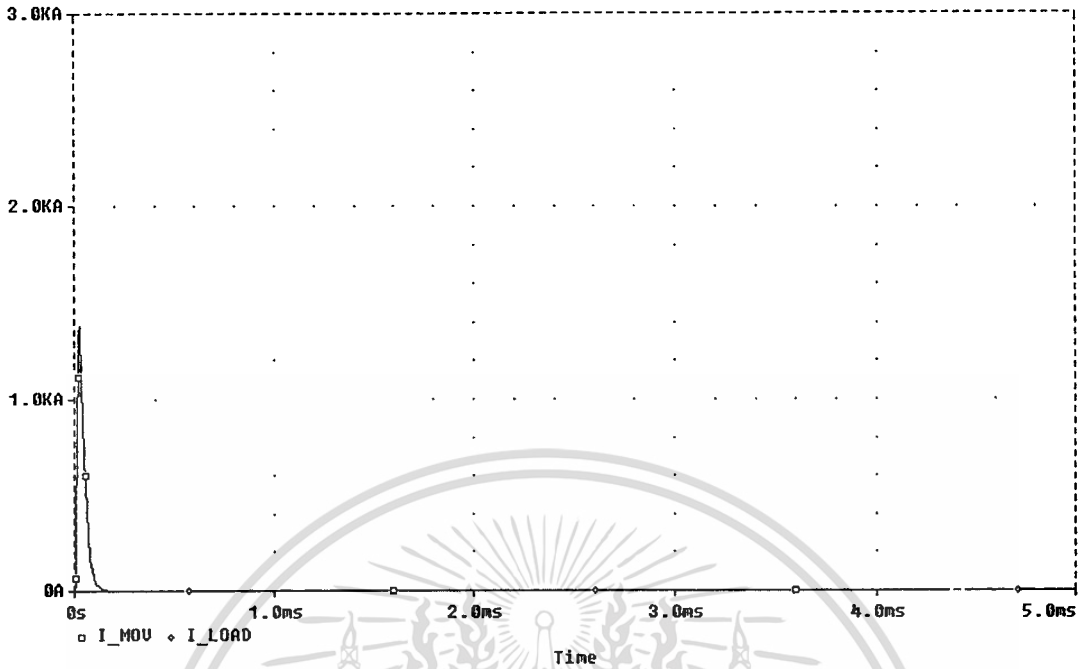


(b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

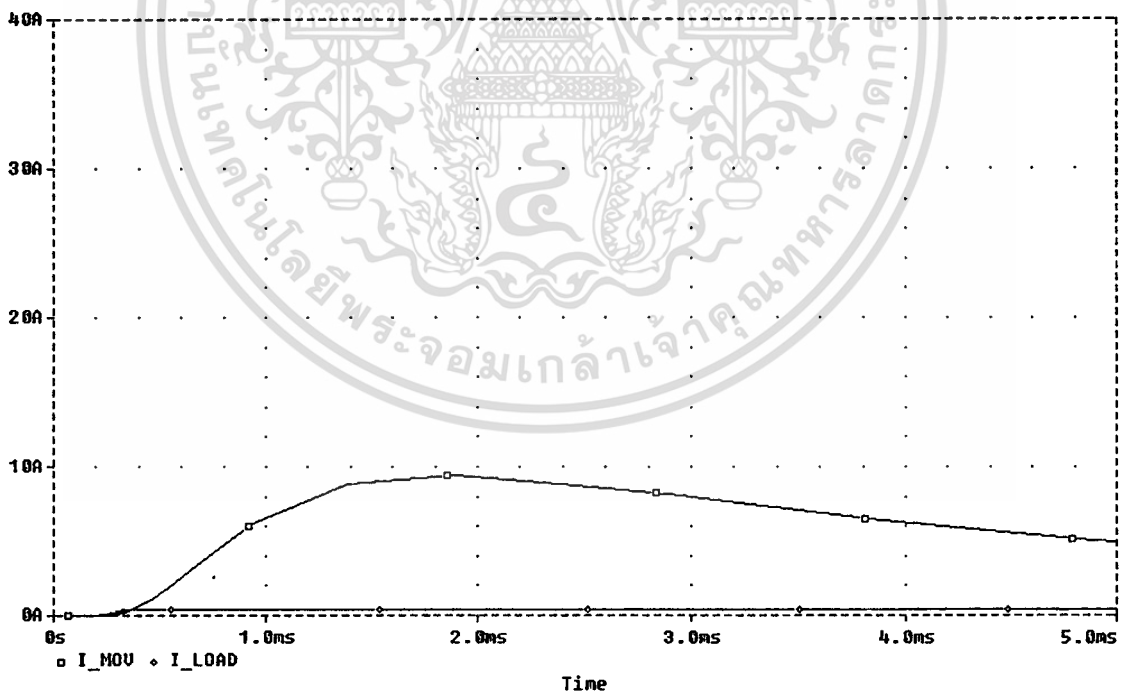
รูปที่ 5.7 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์จัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น $8/20 \mu s$ 3 kA

ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย DW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร



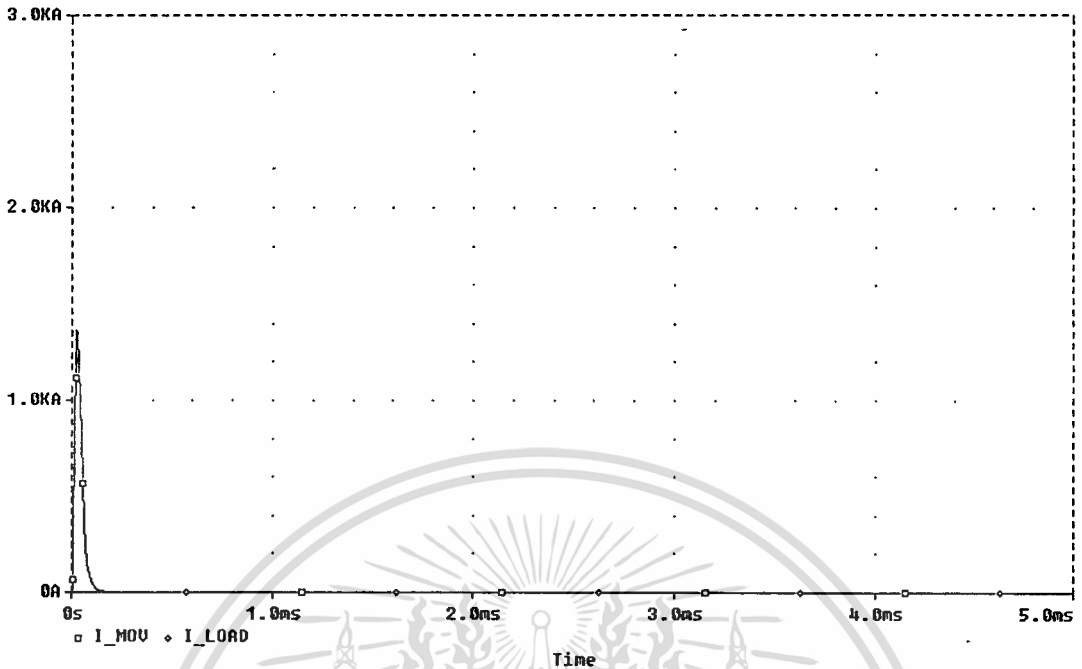
(b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.8 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น $8/20 \mu s$ 3 kA

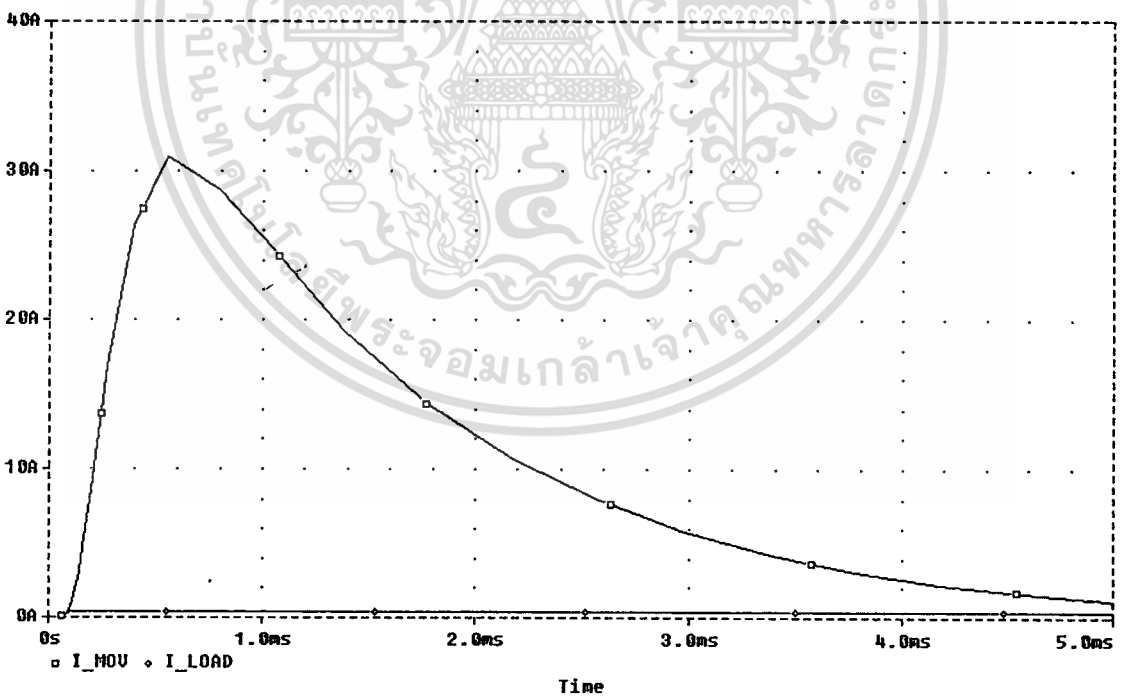
ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย AP-FSF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร

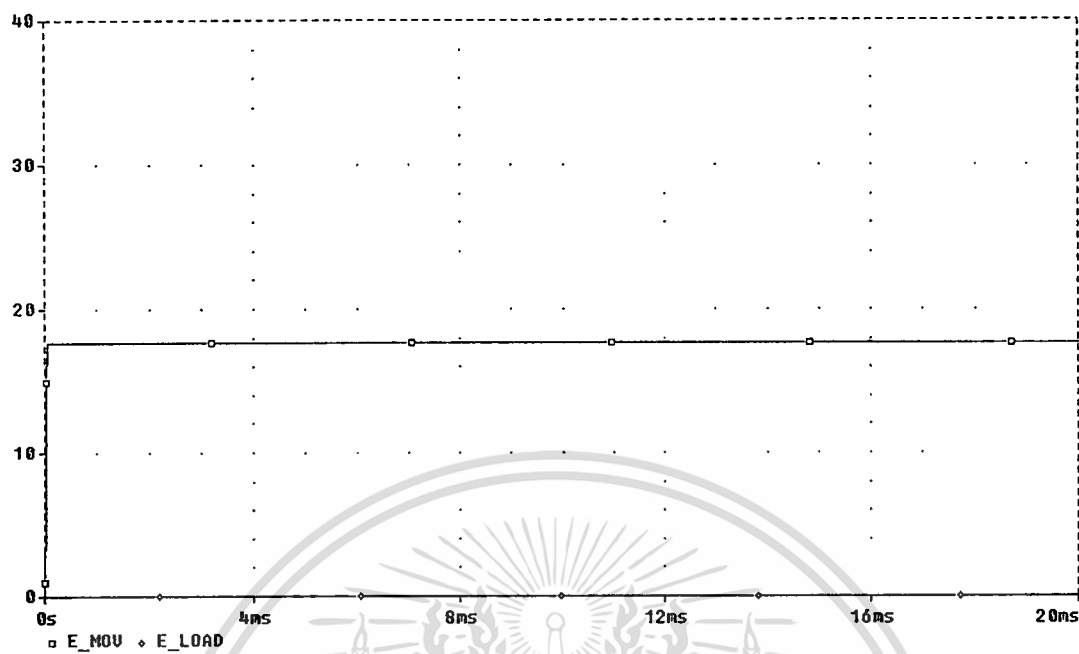


(b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

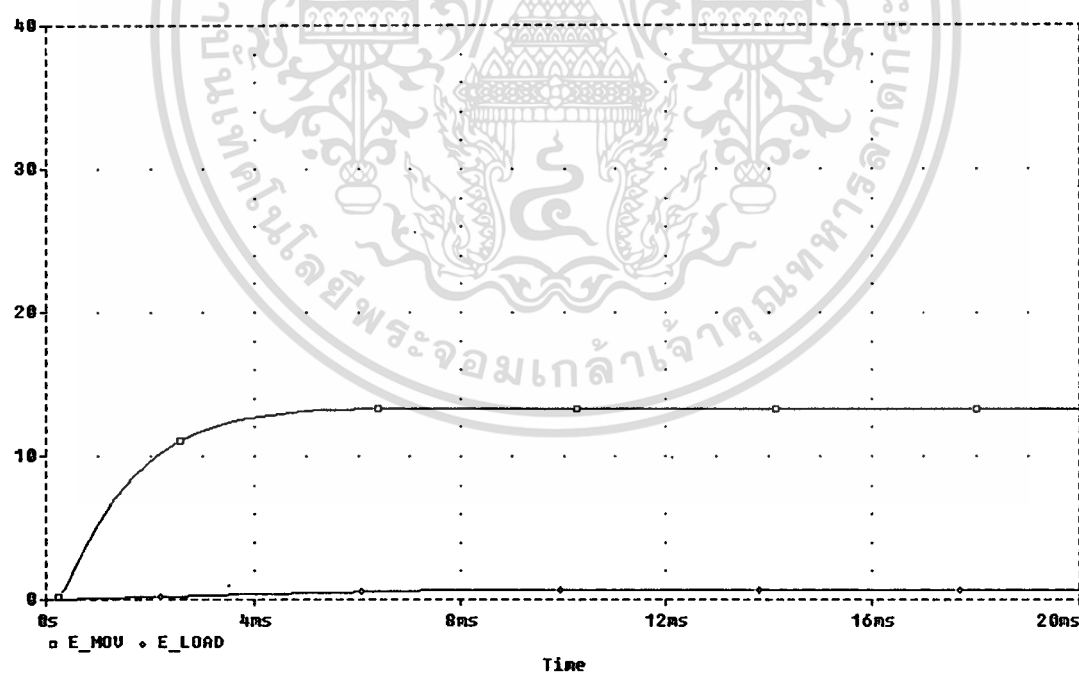
รูปที่ 5.9 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น $8/20 \mu s$ 3 kA

ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย AP-FSF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร

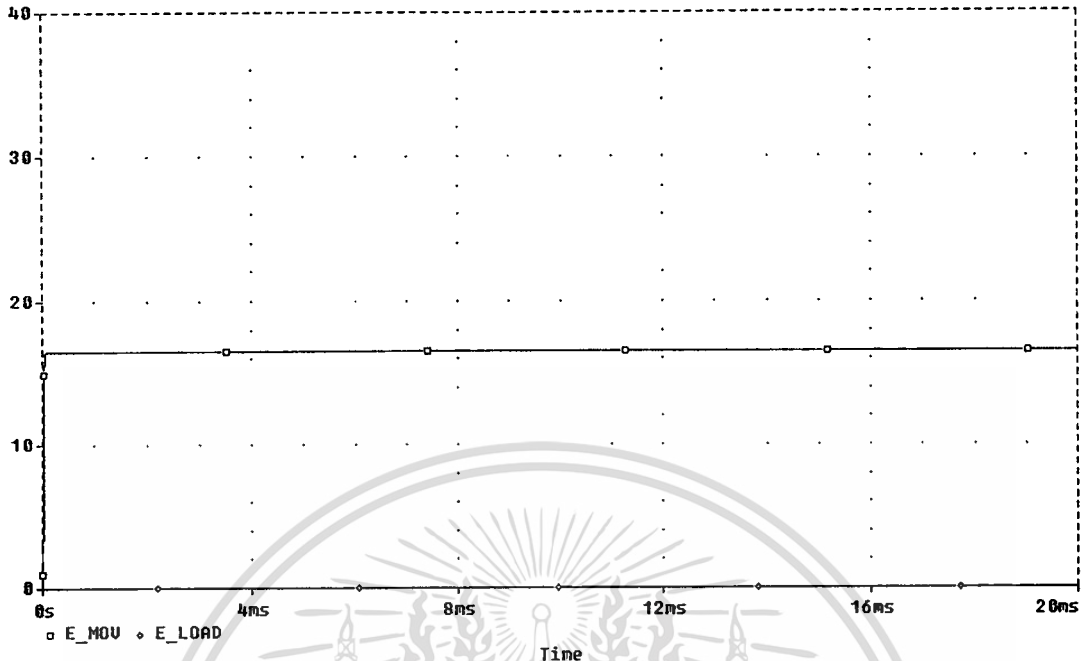


(b) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

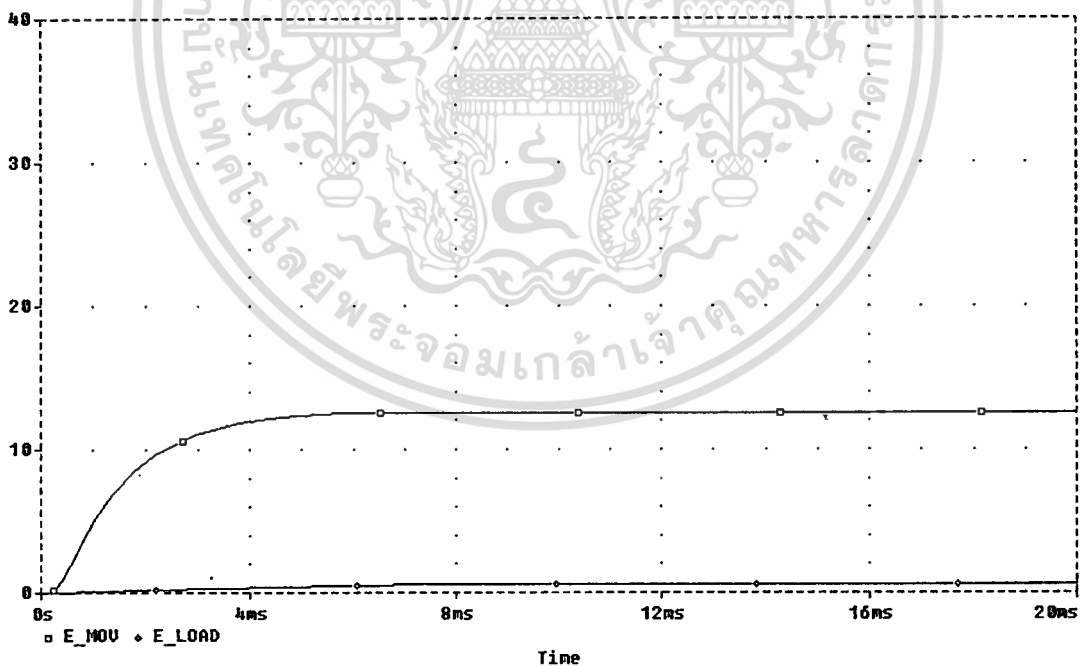
รูปที่ 5.10 ผลการเปลี่ยนแปลงขนาดอุปกรณ์จัดเก็บ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA

ในรูปของพลังงานสะสมของสาย DW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร

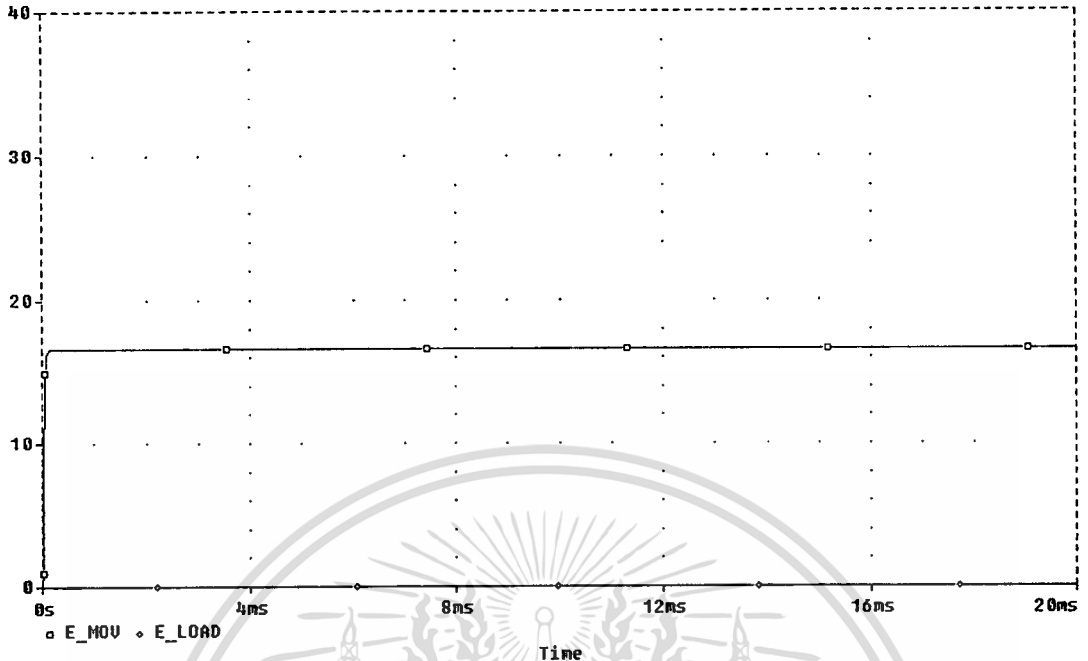


(b) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

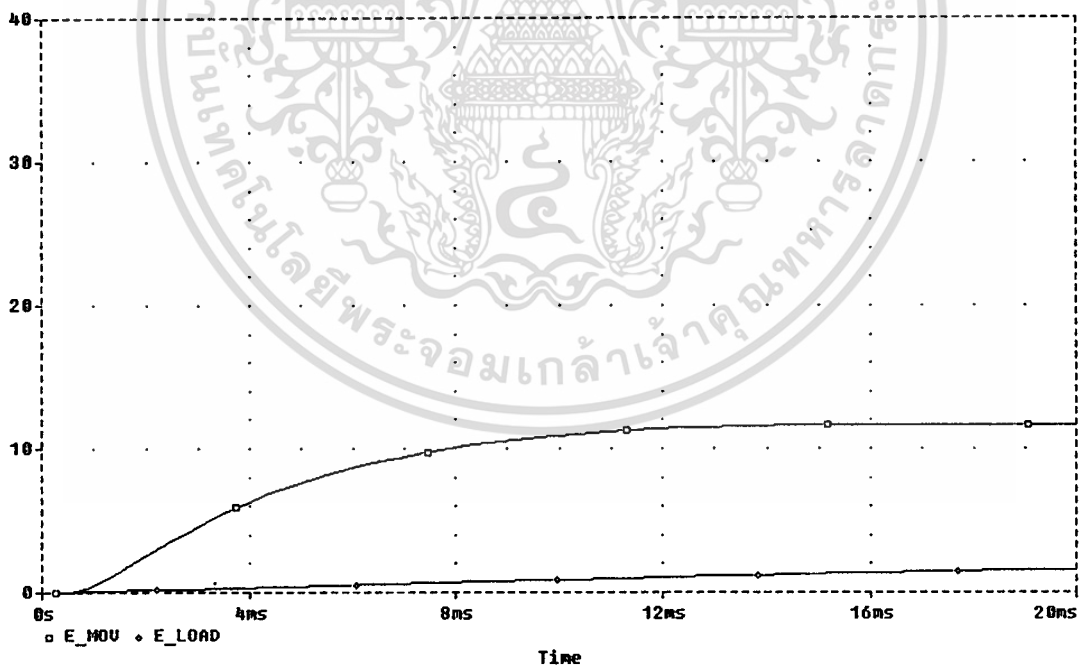
รูปที่ 5.11 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์จัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น $8/20 \mu s$ 3 kA

ในรูปของพลังงานสะสมของสาย DW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร



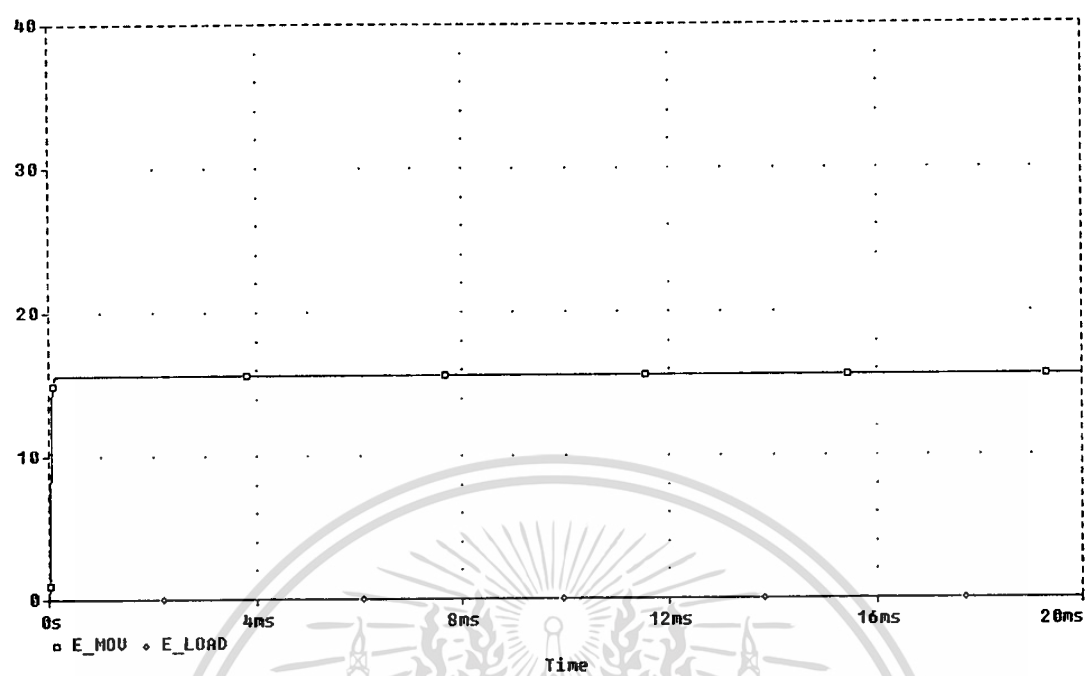
(b) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.12 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น $8/20 \mu s$ 3 kA

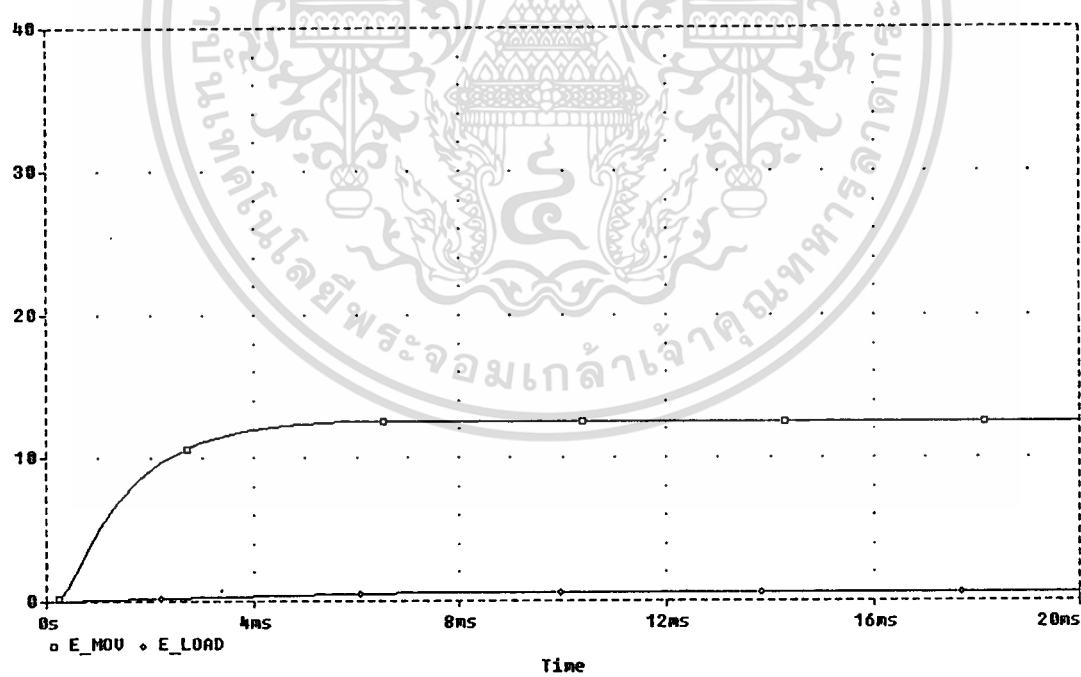
ในรูปของพลังงานสะสมของสาย AP-FSF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร



(b) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.13 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3 kA

ในรูปของพลังงานสะสมของสาย AP-FSF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 ขนาดของอุปกรณ์เสริม จำลองด้วยคลื่น 10/1000 μ s 1 kA

ตารางที่ 5.7 – 5.8 และรูปที่ 5.14 – 5.21 แสดงผลการเลียนแบบขนาดของอุปกรณ์ ขจัดเสริมในรูปของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์ขจัดเสริมและโหลด 600 Ω รวมทั้งพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสริมด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1 kA พิจารณาระยะห่างในการติดตั้งจากแหล่งกำเนิดเท่ากับ 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร ใช้สายโทรศัพท์ชนิด DW และ AP-FSF เลือกใช้ขนาดอุปกรณ์ขจัดเสริมตามตารางที่ 5.1

จากผลการเลียนแบบการทำงานแสดงให้เห็นว่า ขนาดของอุปกรณ์ป้องกันมีผลต่อ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์ขจัดเสริม และโดยเฉพาะพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ป้องกัน กล่าวคือ ถ้าตัวอุปกรณ์ป้องกันมีพลังงานสะสมมากกว่าที่ผู้ผลิตกำหนด ก็จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันเสียหายได้ จากตารางที่ 5.7 และ 5.8 พบว่า B32K130 และ B40K130 มีพลังงานสะสมมากกว่าที่ผู้ผลิตกำหนด จึงเกิดการระเบิดและไม่สามารถป้องกันระบบได้ แต่ B60K130 และ B80K130 สามารถทำงานได้โดยไม่เกิดการเสียหาย ซึ่ง B80K130 จะให้ผลการป้องกันที่ดีที่สุด โดยที่ผลการทดสอบสอดคล้องกันทั้งสายโทรศัพท์ชนิด DW และ AP-FSF

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับตารางที่ 5.5 – 5.6 แล้วพบว่าผลการเลียนแบบด้วยรูปคลื่นทั้ง 2 จะสอดคล้องกัน ถึงแม้ว่ารูปคลื่น 10/1000 μ s 1 kA จะมีคาบเวลาการเกิดที่ยาวกว่าก็ตาม

ตารางที่ 5.7 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์จัดเสร็จในรูปของ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานสะสมด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1 kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร โดยใช้สายโทรศัพท์ชนิด DW

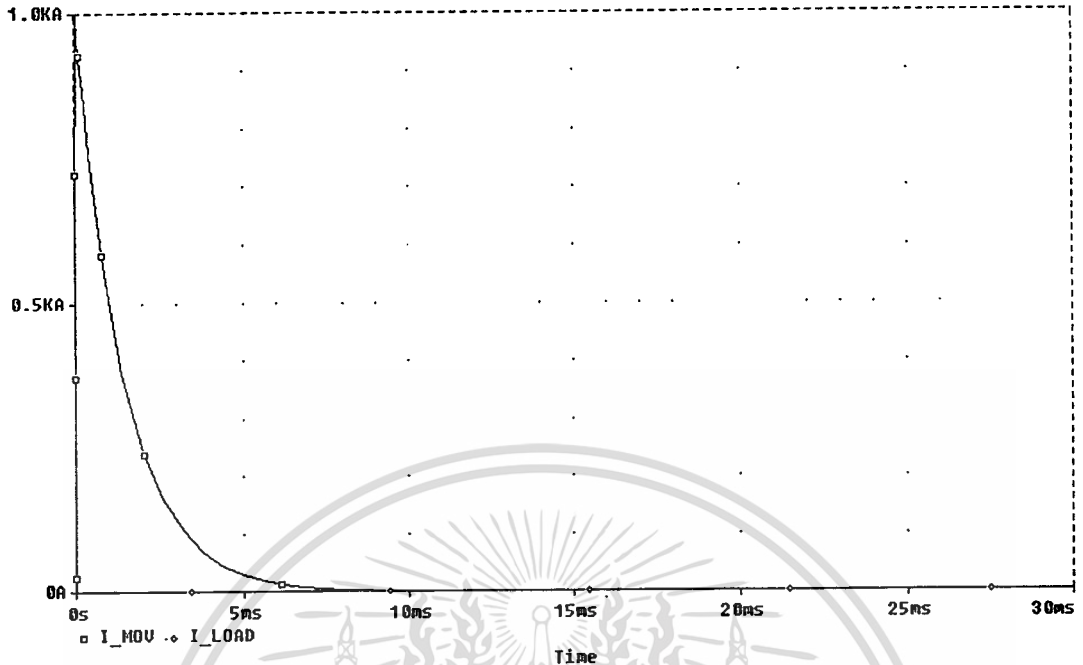
ชนิดสาย	ชนิดอุปกรณ์จัดเสร็จ	ระยะการติดตั้ง (km)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)		พลังงานสะสม (J)	
				MOV	600 Ω	MOV	600 Ω
DW	B32K130	1	314.50	998.10	0.524	418.23	1.27
		2	311.49	904.24	0.519	417.99	1.28
		3	306.94	765.01	0.511	416.38	1.29
		4	300.91	607.16	0.502	414.98	1.33
		5	295.40	479.79	0.492	409.02	1.42
		6	299.96	372.22	0.480	400.25	1.66
	B40K130	1	303.22	1,000.0	0.505	407.92	1.24
		2	300.83	905.46	0.501	407.28	1.25
		3	297.18	771.14	0.495	406.72	1.26
		4	291.86	598.65	0.486	402.39	1.30
		5	287.67	483.23	0.479	399.51	1.39
		6	280.24	376.45	0.472	390.69	1.62
	B60K130	1	290.52	1,020.0	0.484	394.23	1.19
		2	288.59	918.09	0.481	393.65	1.20
		3	285.61	778.09	0.476	390.18	1.21
		4	281.39	605.43	0.469	392.30	1.25
		5	277.95	485.89	0.463	388.18	1.34
		6	274.20	375.32	0.457	382.96	1.56
	B80K130	1	275.15	1,030.0	0.459	371.10	1.07
		2	272.70	907.69	0.455	371.06	1.08
		3	269.18	759.77	0.449	370.35	1.09
		4	265.22	612.49	0.442	369.16	1.13
		5	261.22	482.33	0.435	363.34	1.20
		6	249.43	377.90	0.429	362.48	1.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

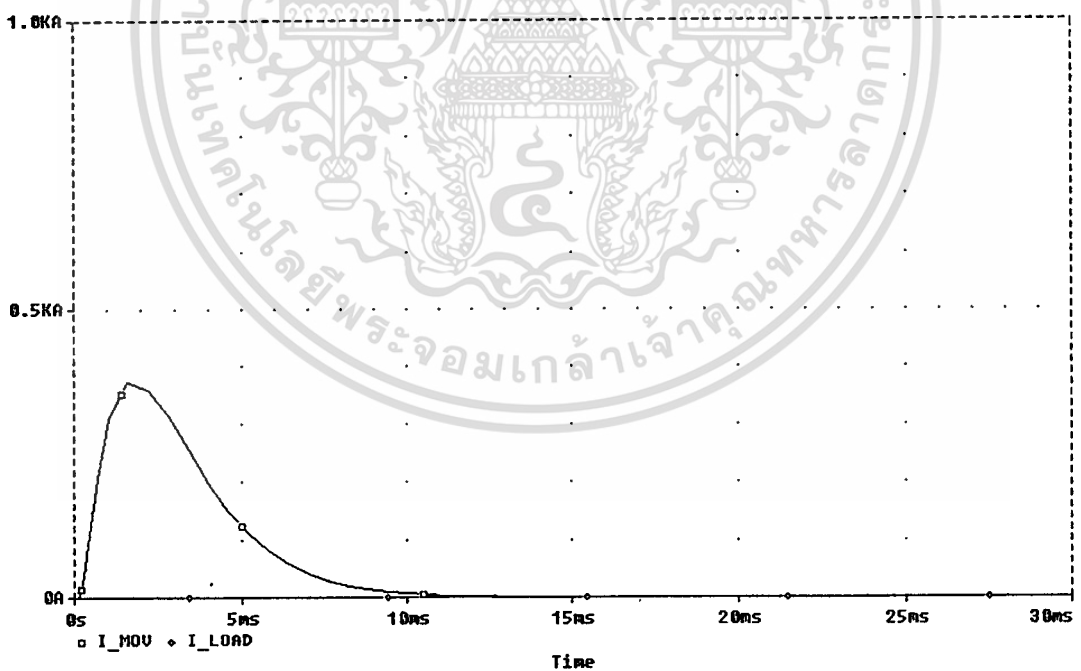
ตารางที่ 5.8 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จในรูปของ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานสะสมด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1 kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร ถึง 6 กิโลเมตร โดยใช้สายโทรศัพท์ชนิด AP-FSF

ชนิดสาย	ชนิดอุปกรณ์ ขจัดเสิร์จ	ระยะการ ติดตั้ง (km)	แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า สูงสุด (A)		พลังงาน สะสม (J)	
				MOV	600 Ω	MOV	600 Ω
AP-FSF	B32K130	1	313.28	961.72	0.522	425.64	1.27
		2	307.89	795.49	0.513	421.54	1.30
		3	299.03	581.51	0.498	411.54	1.35
		4	290.03	373.49	0.483	404.00	1.59
		5	281.39	236.85	0.469	391.38	2.67
		6	277.36	196.37	0.462	386.33	3.51
	B40K130	1	302.91	989.21	0.505	414.39	1.24
		2	297.21	772.07	0.495	408.34	1.26
		3	290.54	580.28	0.484	406.20	1.33
		4	283.42	390.57	0.472	403.96	1.58
		5	277.70	269.11	0.463	393.28	2.30
		6	272.53	188.59	0.454	387.37	3.46
	B60K130	1	299.48	961.75	0.482	400.96	1.19
		2	296.04	796.78	0.477	395.97	1.21
		3	290.16	580.68	0.467	395.20	1.27
		4	274.66	388.03	0.458	392.54	1.51
		5	269.69	289.28	0.449	390.73	2.22
		6	269.48	196.13	0.442	373.41	3.35
	B80K130	1	273.94	962.92	0.457	370.79	1.07
		2	269.47	711.97	0.449	370.44	1.09
		3	263.26	546.83	0.439	365.17	1.14
		4	257.88	387.78	0.429	364.45	1.35
		5	253.02	272.43	0.422	359.45	2.00
		6	248.31	196.07	0.414	347.20	3.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร



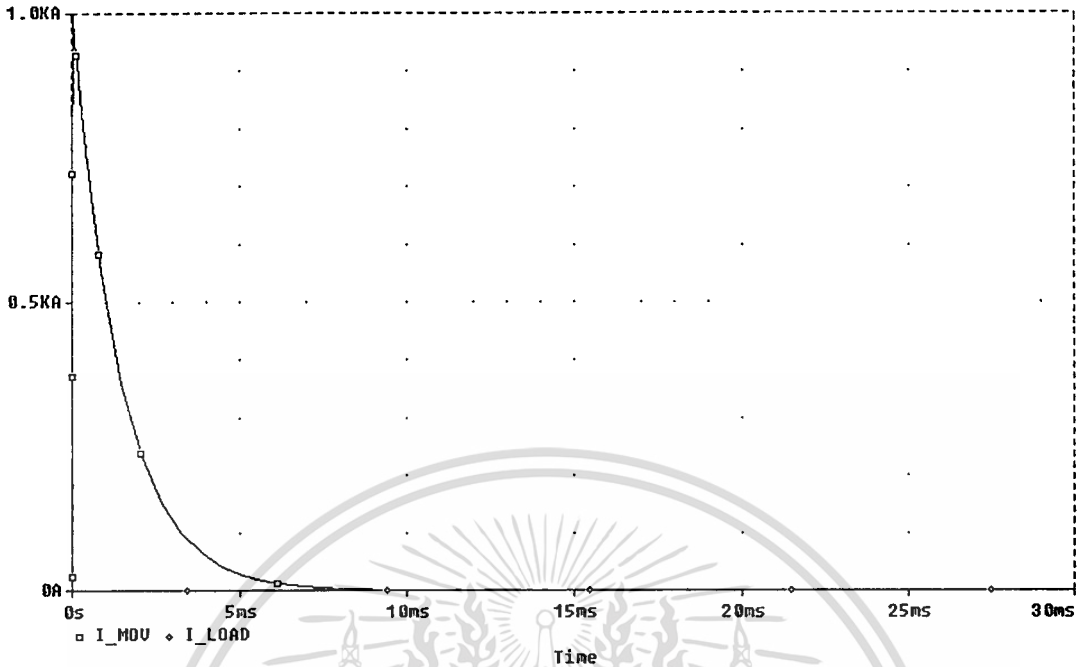
(b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.14 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s

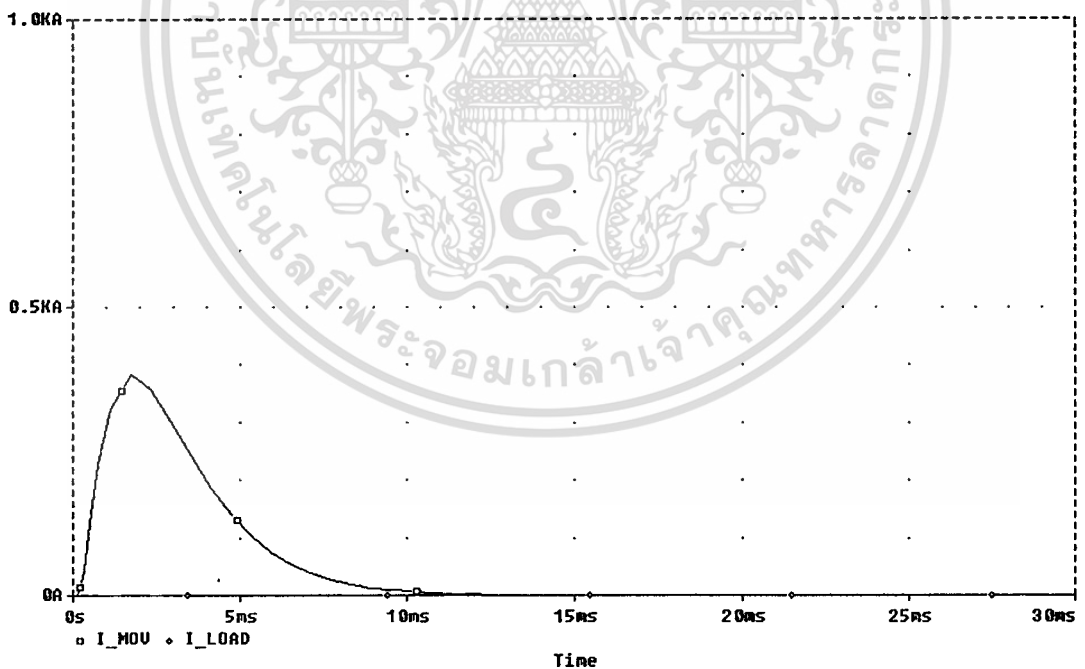
3 kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย DW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร

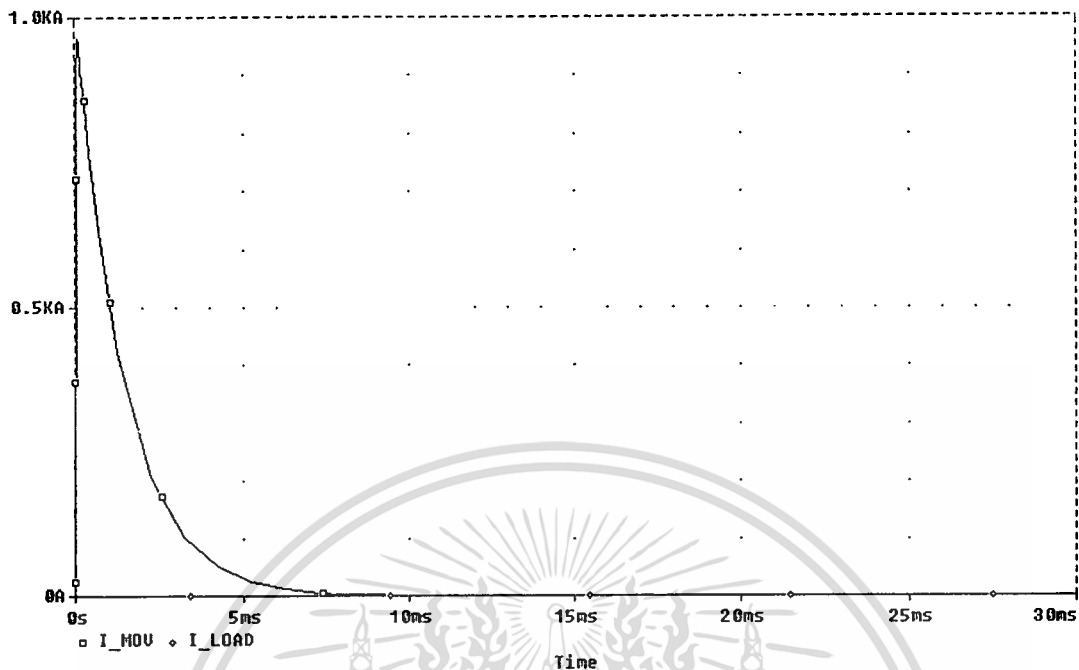


(b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

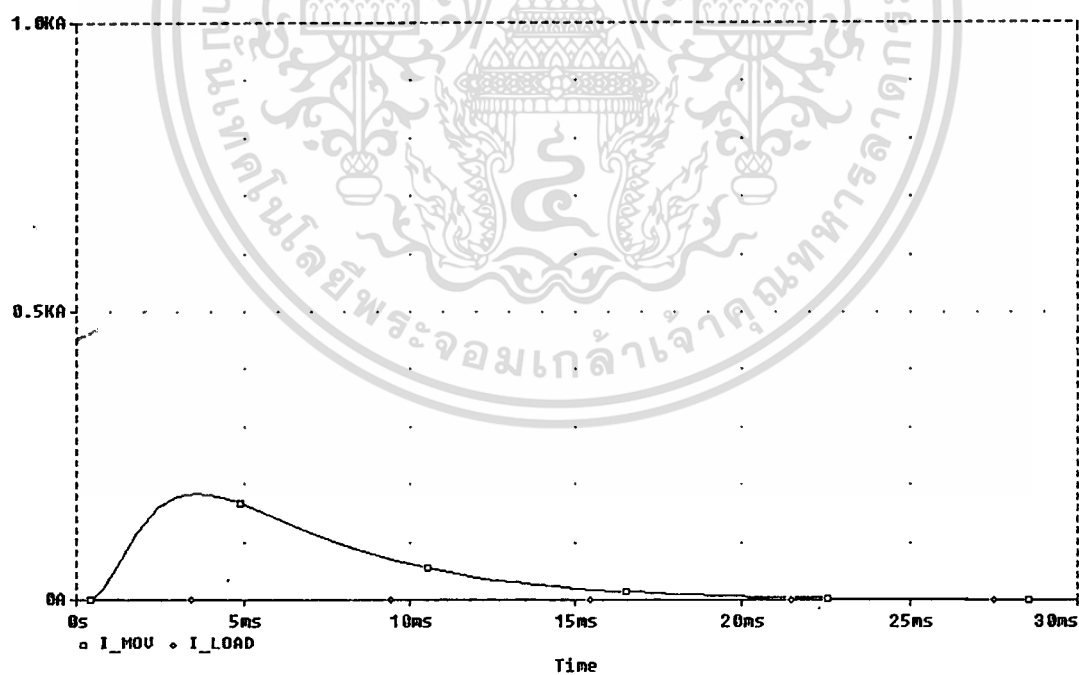
รูปที่ 5.15 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s

3 kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย DW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร



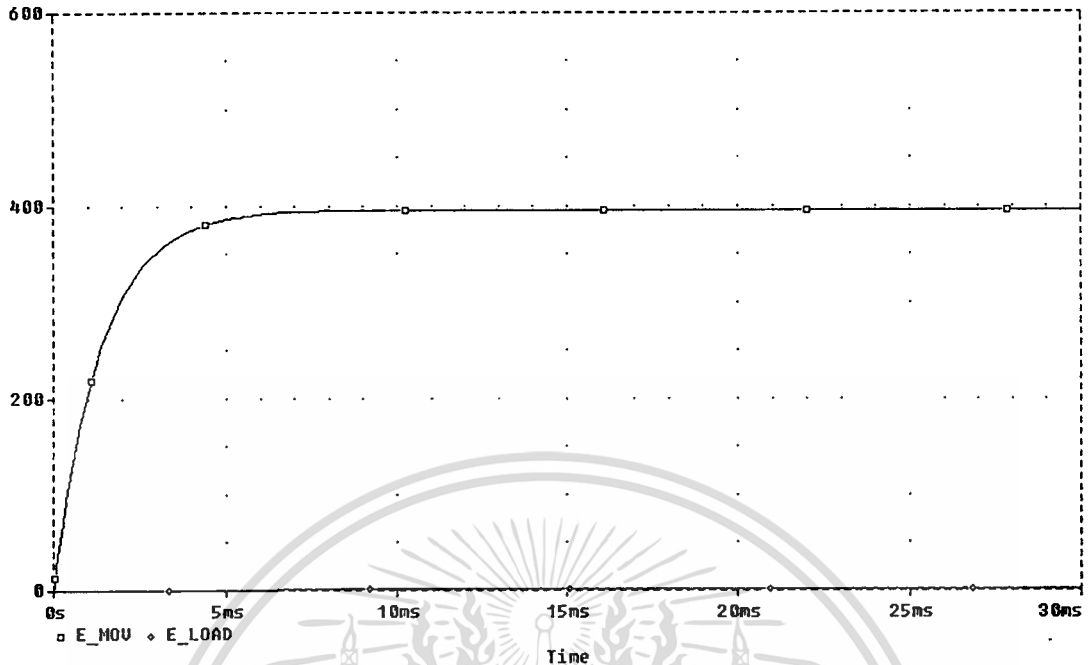
(b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.17 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s

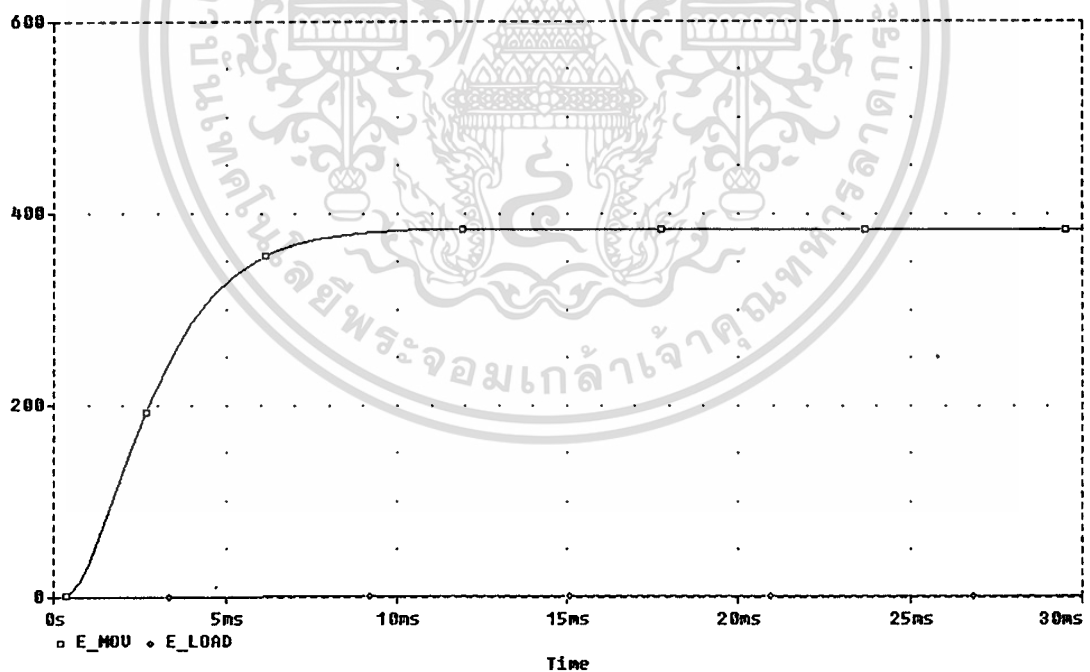
3 kA ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสาย AP-FSF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร

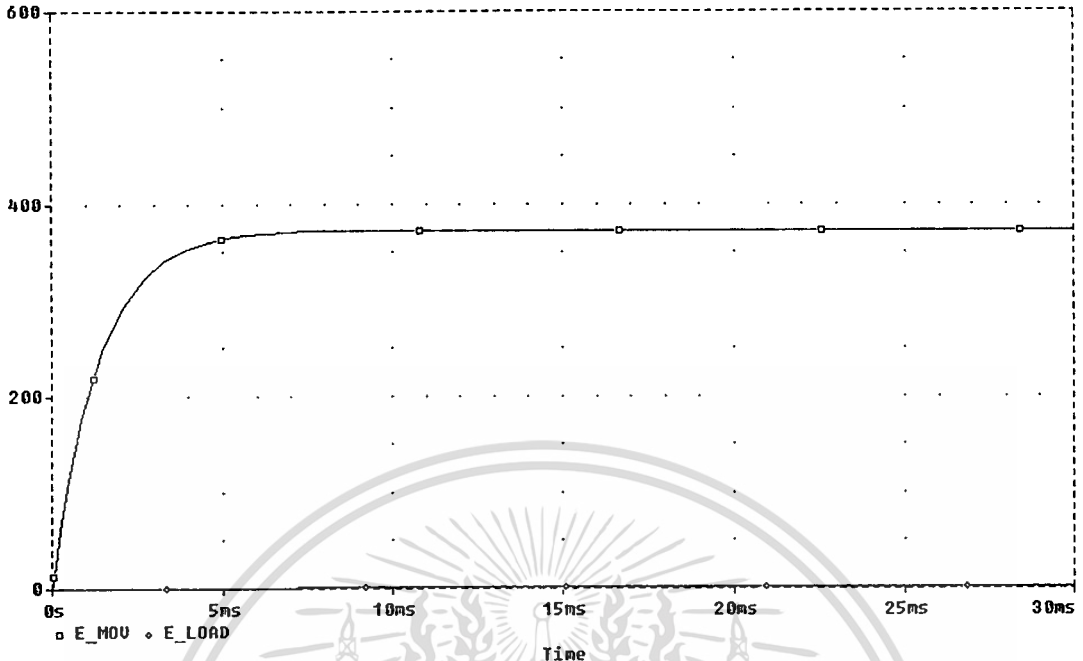


(b) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

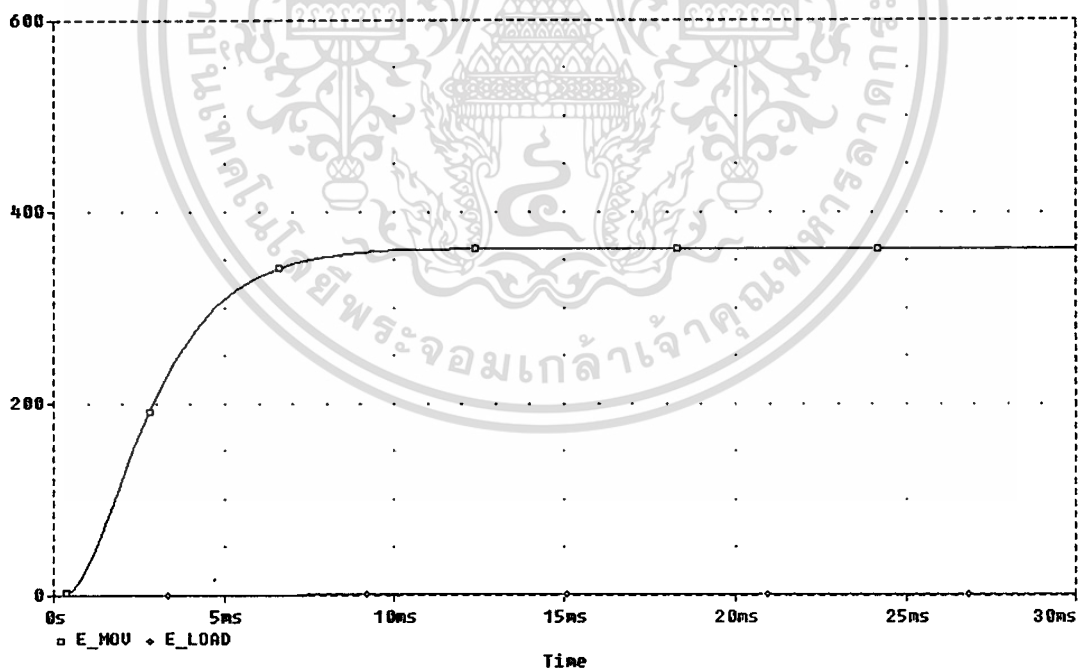
รูปที่ 5.18 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์จัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s

3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย DW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร



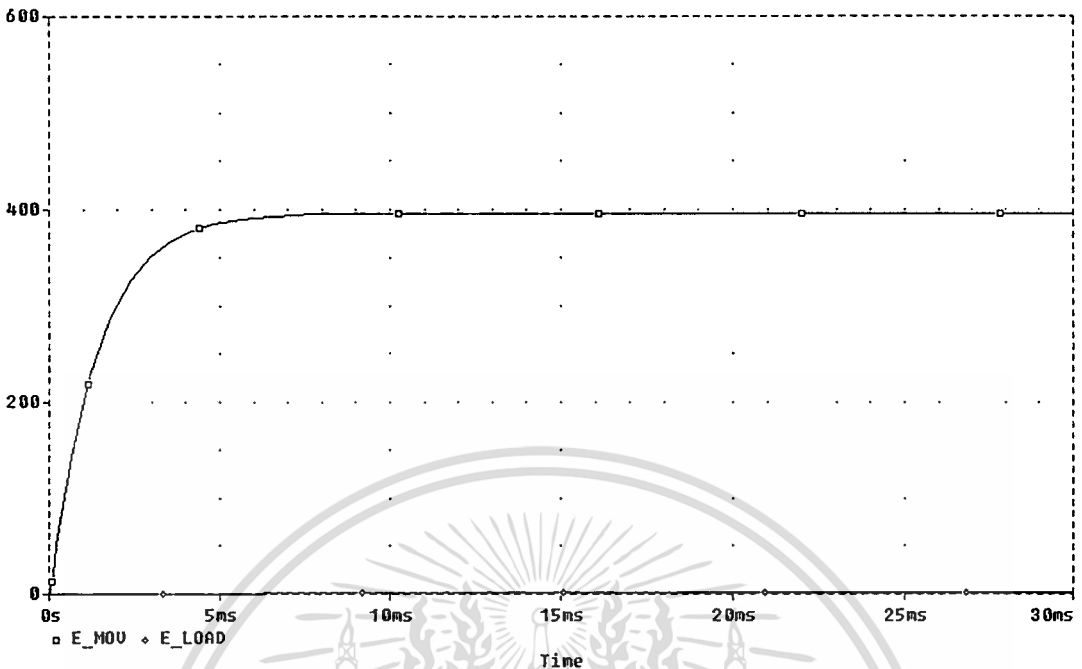
(b) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.19 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์จัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s

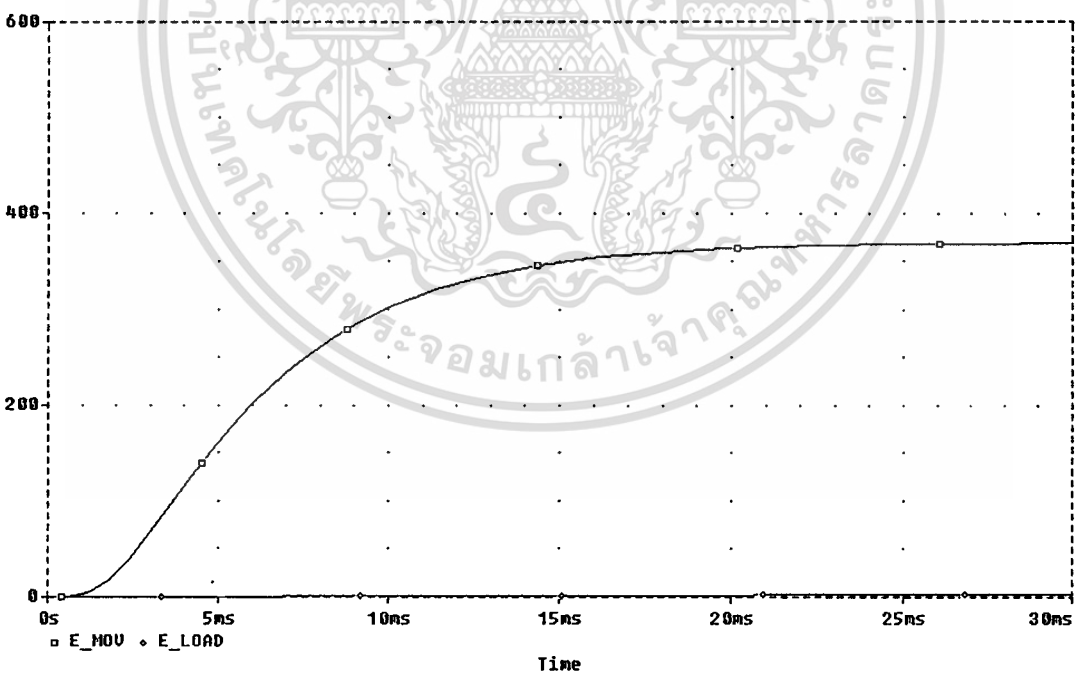
3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย DW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร



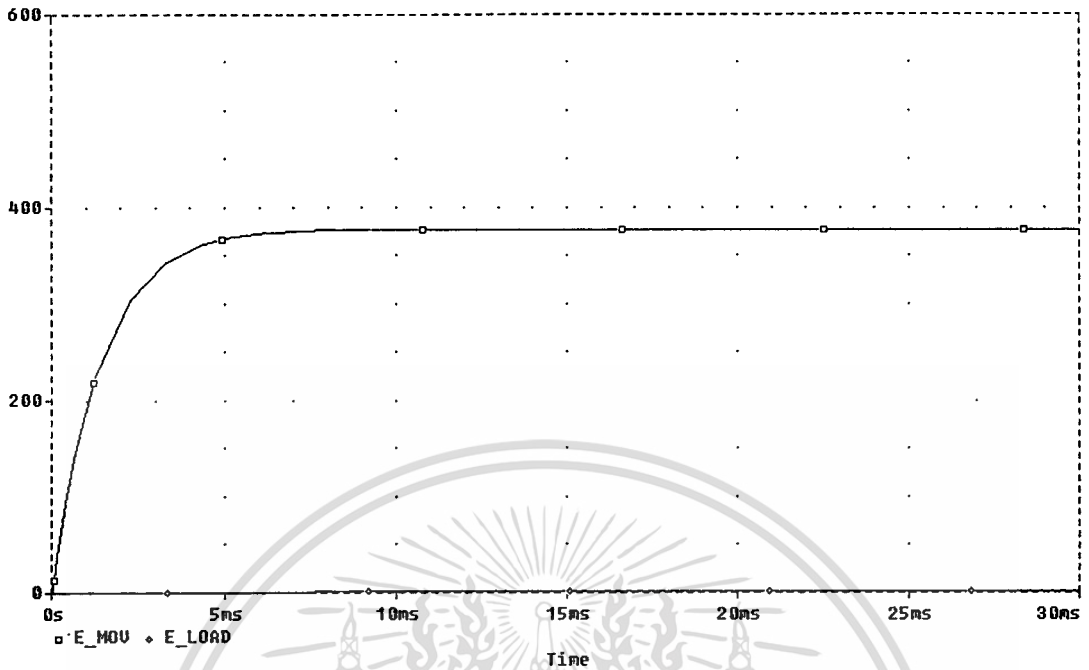
(b) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.20 ผลการเขียนแบบขนาดอุปกรณ์จัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B60K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s

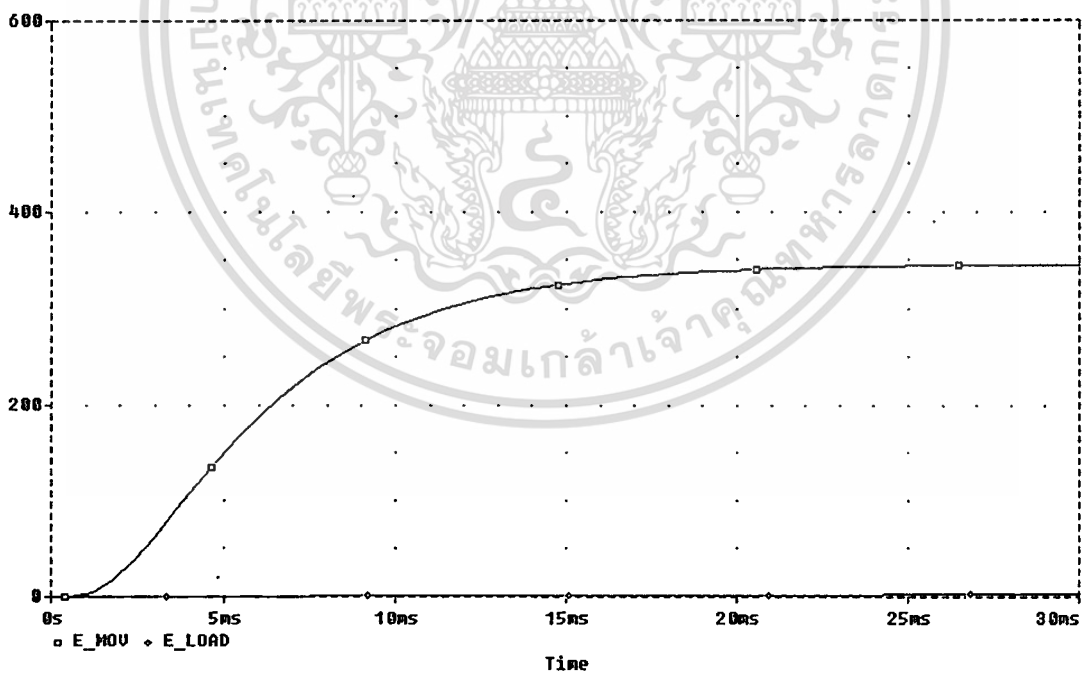
3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย AP-FSF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 1 กิโลเมตร



(b) พลังงานสะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะการติดตั้ง 6 กิโลเมตร

รูปที่ 5.21 ผลการเลียนแบบขนาดอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อติดตั้ง B80K130 ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μs

3 kA ในรูปของพลังงานสะสมของสาย AP-FSF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 สรุปผลการวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการป้องกันเสิร์จระหว่าง SUBSCRIBER จนถึง EXCHANGE เลือกใช้เมทอลออกไซด์วาริสเตอร์ เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ โดยอาศัยคุณลักษณะของเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์ที่เป็นตัวต้านทานที่มีความสัมพันธ์แรงดันกับกระแสเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น คือ มีความต้านทานสูงที่แรงดันไฟฟ้าปกติ และมีความต้านทานต่ำ เมื่อแรงดันสูงผิดปกติ (เสิร์จ) เกินแรงดัน threshold ซึ่งจะควบคุมให้แรงดันเสิร์จมีค่าเข้าใกล้แรงดันปกติมากที่สุด โดยทำการเลียนแบบการทำงานของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จด้วยโปรแกรม PSPICE ศึกษาผลของตำแหน่งในการติดตั้ง ระยะห่าง การติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จจากแหล่งกำเนิดเสิร์จ รวมถึง ความเหมาะสมในการเลือกใช้ขนาดของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ

จากผลการเลียนแบบการทำงานของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ พบว่า ระยะห่างในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เป็นตัวแปรหนึ่งส่งผลถึงการป้องกันเสิร์จจาก SUBSCRIBER ถึง EXCHANGE กล่าวคือ เมื่อระยะการติดตั้งเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือ อิมพีแดนซ์ของระบบเพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายของกระแสเสิร์จในระบบลดลง จากตารางที่ 5.3 – 5.4 พบว่า ที่ระยะห่าง 6 กิโลเมตรจากแหล่งกำเนิดเสิร์จ แรงดันเสิร์จที่ โหลด 600 Ω มีค่าต่ำสุด แต่ในทางปฏิบัติแล้ว เราไม่สามารถคาดคะเนตำแหน่งของการเกิดเสิร์จได้ว่า เกิดใกล้หรือไกล จากโหลด ดังนั้น จึงควรติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จไว้ใกล้กับโหลดภาระที่จะป้องกันมากที่สุด

ขนาดของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดที่จะทำให้การป้องกันจากเสิร์จนั้น ประสพผลหรือไม่ เนื่องจากขนาดของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ จะแปรผันตรงกับพลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ เมื่อได้รับเสิร์จ และการที่จะดูว่า อุปกรณ์ขจัดเสิร์จสามารถป้องกันได้โดยไม่ระเบิด ก็พิจารณาจากพลังงานสะสม ณ ตอนนั้นว่า เกินกว่าที่ทางผู้ผลิตกำหนดไว้หรือไม่ จากการจำลองผลแสดงให้เห็นว่า ที่รูปคลื่นเสิร์จ 8/20 μs 3kA อุปกรณ์ขจัดเสิร์จทุกตัว สามารถป้องกันโหลดได้โดยไม่ระเบิด แต่ที่รูปคลื่น 10/1000 μs 1kA ซึ่งมีเวลาหน้าคลื่นสั้นและมีคาบเวลาการเกิดที่ยาว จึงถูกนำมาจำลองเป็น “worst case” สำหรับระบบโทรศัพท์ [1] พบว่า B32K130 และ B40K130 มีพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จต่ำกว่าที่ทางผู้ผลิตกำหนด ทั้งสายส่งชนิด DW และ AP-FSF จึงสามารถป้องกันเสิร์จจากระบบได้ ผลการจำลองในตารางที่ 5.5 – 5.8 พบว่า ทั้ง B60K130 และ B80K130 ให้ผลของแรงดันเสิร์จ กระแสเสิร์จสูงสุด และพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จต่ำใกล้เคียงกัน แต่ B80K130 ให้ผลการป้องกันเสิร์จดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบราคาของ B60K130 ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 mm. และ B80K130 ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 mm. แล้วพบว่า

B60K130 มีราคาถูกกว่ามาก ดังนั้น เมื่อนำ B60K130 มาติดตั้งไว้ใกล้กับโหลด 600 Ω จะทำให้การป้องกันเสิร์จเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดและเหมาะสมกับค่าใช้จ่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. B. Standler, "Protection of electronic circuits from overvoltages," John Wiley & Sons, 1989.
- [2] S. B. Smith and R.B. Standler, "Effects of surges on electronics appliance," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, pp. 1275-1282, July 1992.
- [3] F. D. Martzloff, "Coordination of surge protectors in low-voltage AC power circuits," IEEE Trans. Power Apparatus and System Vol. PAS-99, pp. 129-133, Feb 1980.
- [4] V. P. Rabde, "Metal oxide varistors as surge suppressors," IEEE Int. Conf. on Electromagnetic Interference and Compatibility, pp.445-449, 1995.
- [5] ANSI/IEEE C62.41-1991, IEEE Recommended Practice on surge voltages in low-voltage AC power circuits.
- [6] Technical Product Information : Passive components, Siemens Matsushita Components Corp., 1998.
- [7] Transient voltage suppression device, Harris Corp.
- [8] IEC 60-2 (1973), High voltage test techniques - Part 2 : Test procedures.
- [9] IEEE std. 4-1978, Standard Techniques for High voltage testing.
- [10] IEC 801-4 (1988), Electromagnetic Compatibility for Industrial process measurement and control equipment – Part 4 : Electrical Fast transient/Burst requirements.
- [11] ถวิล พึ่งมา "ระบบขุมสายโทรศัพท์แบบดิจิทัล" ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2535
- [12] ชวัลชัย เลื่อนจวี "เทคโนโลยีโทรศัพท์" พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2531

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมการเลียนแบบการทำงาน

1. โปรแกรมจำลองผลตำแหน่งในการติดตั้ง และระยะห่างที่เหมาะสม ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 Km. โดยใช้ B32K130 เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ และสายส่งชนิด AP-FSF

I1 1 0

+EXP 0 3.04k 0 3usec 14usec 7.88usec

T1 2 3 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=1000 R=90.2 L=750u G=0 C=56p

NLUMP=10

R1 1 2 2

R2 4 5 1u

R3 3 0 600 .

C1 4 0 4400p

L1 3 4 20n

MOV 5 0 B32K130 PARAMS:TOL=-10

.TRAN 20ns 30000us

.PROBE

.END

2. โปรแกรมจำลองผลตำแหน่งในการติดตั้ง และระยะห่างที่เหมาะสม ด้วยรูปคลื่น 8/20 μ s 3kA ที่ระยะการติดตั้ง 6 Km. โดยใช้ B32K130 เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ และสายส่งชนิด AP-FSF

```

I1      1 0
+EXP 0 3.04k 0 3usec 14usec 7.88usec

T1      2 3 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=6000 R=541.2 L=750u G=0 C=56p
NLUMP=10

R1      1 2 2
R2      4 5 1u
R3      3 0 600
C1      4 0 4400p
L1      3 4 20n
MOV     5 0 B32K130 PARAMS:TOL=-10
.TRAN 20ns 30000us
.PROBE
.END

```

3. โปรแกรมจำลองผลตำแหน่งในการติดตั้ง และระยะห่างที่เหมาะสม ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 Km. โดยใช้ B32K130 เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ และสายส่งชนิด AP-FSF

```

I1      1 0
+EXP 0 1019 0 3.827usec 0 1404usec

T1      2 3 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=1000 R=90.2 L=750u G=0 C=56p
NLUMP=10

R1      1 2 2
R2      4 5 1u
R3      3 0 600
C1      4 0 4400p
L1      3 4 20n
MOV     5 0 B32K130 PARAMS:TOL=-10
.TRAN 20ns 30000us
.PROBE
.END

```

4. โปรแกรมจำลองผลตำแหน่งในการติดตั้ง และระยะห่างที่เหมาะสม ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1kA ที่ระยะการติดตั้ง 6 Km. โดยใช้ B32K130 เป็นอุปกรณ์ขั้วเดินจริง และสายส่งชนิด AP-FSF

```

I1      1 0
+EXP 0 1019 0 3.827usec 0 1404usec
T1      2 3 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=6000 R=541.2 L=750u G=0 C=56p
NLUMP=10
R1      1 2 2
R2      4 5 1u
R3      3 0 600
C1      4 0 4400p
L1      3 4 20n
MOV     5 0 B32K130 PARAMS:TOL=-10
.TRAN 20ns 30000us
.PROBE
.END

```

5. โปรแกรมจำลองผลตำแหน่งในการติดตั้ง และระยะห่างที่เหมาะสม ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 Km. โดยใช้ B60K130 เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ และสายส่งชนิด DW.

```

I1      1 0
+EXP 0 1019 0 3.827usec 0 1404usec

T1      2 3 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=1000 R=28.5 L=750u G=0 C=56p
NLUMP=10

R1      1 2 2
R2      4 5 1u
R3      3 0 600
C1      4 0 15000p
L1      3 4 27n
MOV     5 0 B60K130 PARAMS:TOL=-10
.TRAN 20ns 30000us
.PROBE
.END

```

6. โปรแกรมจำลองผลตำแหน่งในการติดตั้ง และระยะห่างที่เหมาะสม ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1kA ที่ระยะการติดตั้ง 6 Km. โดยใช้ B60K130 เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ และสายส่งชนิด DW.

```

I1      1 0
+EXP 0 1019 0 3.827usec 0 1404usec
T1      2 3 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=6000 R=171 L=750u G=0 C=56p
NLUMP=10
R1      1 2 2
R2      4 5 1u
R3      3 0 600
C1      4 0 15000p
L1      3 4 27n
MOV     5 0 B60K130 PARAMS:TOL=-10
.TRAN 20ns 30000us
.PROBE
.END

```

7. โปรแกรมจำลองผลตำแหน่งในการติดตั้ง และระยะห่างที่เหมาะสม ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1kA ที่ระยะการติดตั้ง 1 Km. โดยใช้ B60K130 เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ และสายส่งชนิด AP-FSF

```

I1      1 0
+EXP 0 1019 0 3.827usec 0 1404usec
T1      2 3 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=1000 R=90.2 L=750u G=0 C=56p
NLUMP=10
R1      1 2 2
R2      4 5 1u
R3      3 0 600
C1      4 0 15000p
L1      3 4 27n
MOV     5 0 B60K130 PARAMS:TOL=-10
.TRAN 20ns 30000us
.PROBE
.END

```

8. โปรแกรมจำลองผลตำแหน่งในการติดตั้ง และระยะห่างที่เหมาะสม ด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s 1kA ที่ระยะการติดตั้ง 6 Km. โดยใช้ B60K130 เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ และสายส่งชนิด AP-FSF

```

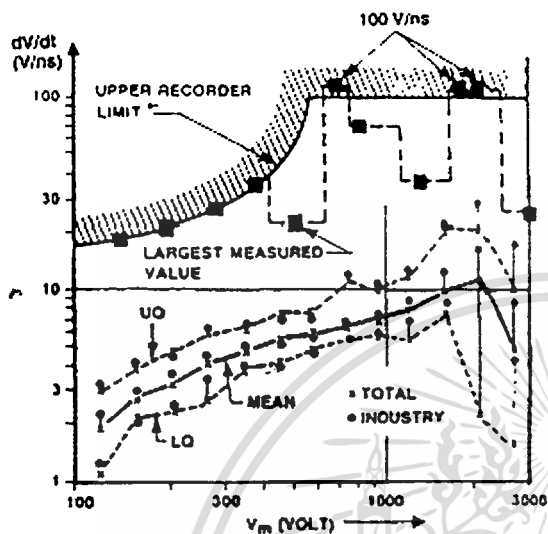
I1      1 0
+EXP 0 1019 0 3.827usec 0 1404usec
T1      2 3 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=6000 R=541.2 L=750u G=0 C=56p
NLUMP=10
R1      1 2 2
R2      4 5 1u
R3      3 0 600
C1      4 0 15000p
L1      3 4 27n
MOV     5 0 B60K130 PARAMS:TOL=-10
.TRAN 20ns 30000us
.PROBE
.END

```

ภาคผนวก ข

IEEE
C62.41-1991

IEEE RECOMMENDED PRACTICE ON SURGE VOLTAGES IN



NOTE: Upper limits of the rate of change shown in this figure were added to the original data from Goedbloed [B14]. The recorder did not always measure the maximum value of dv/dt .

Fig 5
Statistical Evaluation of Recorded dv/dt Data,
as a Function of the Maximum Transient
Amplitude

This approach is justifiable for a resistive load, where the power dissipated in the resistor is V^2/R . For a nonlinear surge-protective device, the relationship is not so simple. Furthermore, the concept of recording the "energy measure" may promote the arbitrary reporting of "surge energy" by assuming a value for the impedance and then quoting results in joules.

While there is definite merit in an attempt to describe the capability of a surge for delivering energy to circuit components, readers should realize that "energy" reports have to be evaluated with a clear understanding of the underlying assumptions. The "energy in the surge" cannot be determined from measurements of voltage alone (Standler, 1989 [B83]). As progress continues in the development of power-system disturbance monitors, the data base could be expanded by making appropriate

measurements of the surge current diverted by generic surge-protective devices installed at the point of monitoring (Martzloff, 1985 in discussion of [B29]; Standler, 1987 [B85]).

A distinction should be made between surges of high amplitude with short duration and surges of high amplitude with long duration. The first have the potential of upsetting equipment operation but involve little energy, while the second of these have the potential for high levels of energy deposition.

6.5.6 Effects of Location, Loads, and Mode of Coupling. Disturbance recording results are not very sensitive to the location of the disturbance monitor within a building, with the exception of the fast transients (Martzloff, 1990 [B48]). However, the changes in the loads will affect the response of a system to impinging surges. The mode of coupling is important and has not been well defined in the earlier surveys (Martzloff and Gruzs, 1988 [B61]). In addition to the issue of citing results as L-L, L-N, L-G, or N-G voltage measurements, another issue that has not been addressed is that of voltage differences appearing between the power-system conductors and conductors from other systems, such as a communication system, a control system, or even building steel. Voltage differences between systems can occur during power-system faults and lightning discharges; the present data base does not recognize these. See *utilities interconnections and interactions* in Appendix B23 for a more comprehensive discussion.

7. Recommended Selection of Representative Surges

7.1 General. The data base summarized in Section 6, along with anecdotal information, illustrates the wide variety of surges that can be expected to occur in low-voltage ac power systems. Evaluation of the ability of equipment to withstand these surges, or of the performance of surge-protective devices, can be facilitated by a reduction of the data base.

It is unnecessary to subject equipment to surges that would duplicate field-measured surges, since these measurements are site dependent (Martzloff and Gruzs, 1988 [B61]) and are likely to change with time.

The reduction process leads to selecting a few representative surges that will make subsequent laboratory tests uniform, meaningful, and reproducible. Since the environment is subject to change both for the better and the worse, it would be prudent to use these representative surges as a baseline environment. However, this simplification should not bar any user from performing evaluations for different surge-environment conditions if knowledge is available for a particular environment (over a sufficient period of time, such as one or more years) and the requirements warrant the cost and effort of additional tests.

To assist equipment designers and user in making appropriate choices, this recommended practice outlines several exposure levels among several location categories that will be defined further in this section. A combination in the selection of location category and exposure level will then provide the appropriate degree of compromise between a conservative overdesign and a cost-conscious reduction of margins.

The objective of this recommended practice is to lead to an appropriate choice among the levels cited on the basis of the rationale presented here. However, the goal is not to assign arbitrarily any given level to a generic class of equipment. This assignment remains the prerogative and the responsibility of the users and the manufacturers of specific equipment classes.

7.2 Simplification of the Data Base. This recommended practice provides a matrix from which a selection can be made and therefore a common base of reference for specifying equipment performance requirements. Note that the specification of these individual equipment requirements is outside of the scope of this document. However, a first and necessary step in the process of addressing concerns of surge effects on equipment is to determine, by design review or by tests, the susceptibility or vulnerability of the equipment to impinging surges.

The process of simplifying the complex environment involves three further steps:

- (1) Identify the environment (outside or inside building) and operating conditions in unprotected circuits.

- (2) Select a minimum number of surge waveforms that are representative of the postulated environment. This recommended practice provides the basis for this selection.

- (3) The last step will depend on the point of view of the designer or the user of the equipment of interest. Two cases should be considered:

Case 1: When the equipment is sensitive to voltage or current peaks and durations (equipment upset or damage is the concern here), the significant parameters are primarily the amplitude and duration of the surge.

Case 2: When the equipment is sensitive to the rate of change in the voltage of the mains (equipment upset is the major concern here), the significant parameter is primarily the rate of change. Rate-of-change effects can cause equipment upset for surge amplitudes far below those involved in hardware damage, even for amplitudes that do not exceed the envelope of the power frequency sine wave.

Fig 1 presents a schematic and simplified view of relationships between time, voltage, current, and the rates of change. An additional concern is the number of occurrences. The rate of occurrences is a significant parameter when the equipment is sensitive to the number of surges occurring in a given time period. Some equipment or its protective circuits may eventually fail as a result of being degraded by multiple surges that, individually, would not cause failure.

The three steps of the simplification process are discussed in detail in 7.3, 7.4, and 7.5. These selections will ultimately be used as the basis for specifying surge tests. Therefore, they should be limited to a reasonable number to avoid impractical test requirements.

7.3 Rate of Occurrence and Voltage Levels in Unprotected Circuits

7.3.1 General. The rate of occurrence of surges varies over wide limits, depending upon the particular power system. Prediction of the rate for a particular system is always difficult and frequently impossible. The rate is related to the level of the surges; low-level

surges are more prevalent than high-level surges.

It is essential to recognize that a surge voltage observed in a power system can be either the original surge or the remnant resulting from the sparkover of some clearance or the operation of a protective device in the system. Hence, the term "unprotected circuit" should be understood to be a circuit in which no known low-voltage protective device has been installed, but in which the *sparkover of clearances* will eventually limit the maximum voltage of the surges.

The distribution of surge levels, therefore, is influenced by the surge-producing mechanisms as well as by the sparkover level of clearances (between energized parts, as well as between energized parts and ground) and the operation of unidentified protective devices. It is important to recognize the effect of the increasing number of surge-protective devices installed in and around equipment (see *changes in the environment* in Appendix B3).

This distinction between actual driving voltage and voltage limited by sparkover is particularly important at the interface between outdoor equipment and indoor equipment. Outdoor equipment may have higher clearances, hence higher sparkover levels; 10 kV may be typical, but 20 kV is possible (peak values for a $1.2/50 \mu\text{s}$ wave). At the service entrance, watt-hour meters may include protective gaps between phase conductors and ground with sparkover levels in the range of 8 kV. In contrast, most indoor wiring devices used in 120 V, 240 V, and 480 V systems have sparkover levels between phases or between phase and ground of about 6 kV. Therefore, this 6 kV level can be selected as a typical but not a guaranteed limit for the magnitude of surges in an indoor power system.

NOTE: This 6 kV limit is stated as an upper limit that is unlikely to be exceeded in typical low-voltage, indoor environments, for the reasons stated. It is not to be construed as a mandatory surge withstand requirement for all load equipment.

7.3.2 Rate of Occurrence Versus Voltage Level. Data collected from many sources (see the data base in Appendix A) have led to the log-log plot shown in Fig 6. This plot shows the crest values of surges, regardless of their waveform and location of recording, from a composite of all recordings reported in the literature, as indicated in Fig A9 of Appendix A.

The data reported by many observers at the sites they monitored show decreasing numbers of occurrence for higher crests, with a slope that is independent from the site. The absolute number of occurrences, however, varies from site to site. Thus, if a limited set of recordings can establish the rate of occurrences for the more probable events at low amplitudes, then the events of higher amplitude that are less likely to occur might be extrapolated or estimated from the general slope (Goldstein and Speranza, 1982 [B15]).

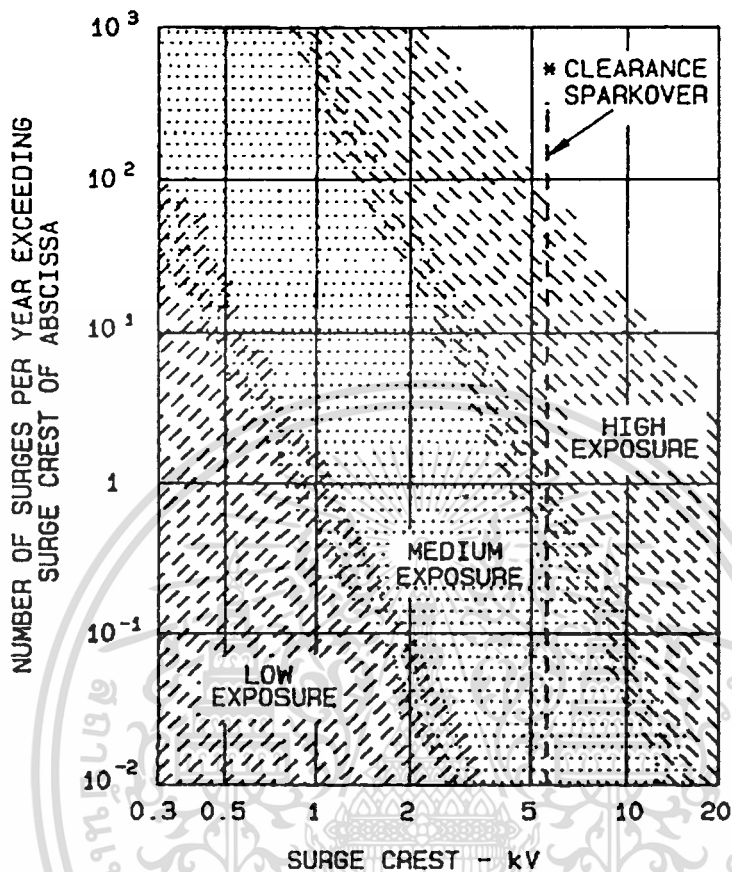
The three regions shown in Fig 6 and labeled low, medium, and high exposure present the data in empirical form that is applicable, if some knowledge is available or if some assumption is made on the "exposure level" of the site, as defined below.

7.3.3 Exposure Levels. The exposure level of the environment can be related to exposure of the power system to induced surges. The following descriptions are offered on the exposure levels:

- (1) *Low Exposure.* Systems in geographical areas known for low lightning activity, with little load or capacitor switching activity.
- (2) *Medium Exposure.* Systems in geographical areas known for medium to high lightning activity, or with significant switching transients. Both or only one of these causes may be present, as it is difficult to separate them in reviewing the results of monitoring disturbances.
- (3) *High Exposure.* Those rare installations that have greater surge exposures than those defined by Low Exposure and Medium Exposure. The more severe conditions result from extensive exposure to lightning or unusually severe switching surges.

The high-exposure level needs to be recognized, but it should not be indiscriminately applied to all systems. Such general application would penalize the majority of installations, where the exposure is lower (see *amplitudes of strikes* in Appendix B1).

Several major sources of surges have been identified: the definition of "exposure" depends on which source is involved. The frequency of occurrence and level of lightning



NOTES: (1) In some locations, sparkover of clearances may limit the overvoltages.

(2) This figure shows one measure of surge severity. Other possible measures include peak current, rise time, and energy transfer.

Fig 6

Rate of Surge Occurrences Versus Voltage Level at Unprotected Locations

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

surges are influenced by isokeraunic levels (Figs 7 and 8) and flash densities.⁹ The nature of the power distribution system (overhead open lines, overhead twisted lines, cables) and grounding practices will also influence the level of these surges.

The frequency of occurrence and level of power-system switching surges depend on the mode of operation of the utility supplying the user. For instance, the presence of switched capacitor banks is likely to affect the level of surges impinging at the service entrance.

The frequency of occurrence and level of load-switching surges depend on the nature and impedance of the adjacent loads being switched, as well as their electrical distance (see *surge impedance and source impedance* in Appendix B19) from the point of interest, rather than the geographic situation or the utility practice.

Thus, the exposure levels shown in Fig 6 cover a wide range of situations and represent relative rather than absolute levels. The sparkover of wiring devices indicates that while a 6 kV withstand capability may be enough to ensure device survival indoors, a withstand capability of 10 kV or greater may be required outdoors. This practical approach has been applied in proposing the matrix of levels in Section 9 for standard waveforms and in Section 10 for additional waveforms.

7.4 Recommended Waveforms

7.4.1 General. Progress has been made in techniques for the recording of surges since the 1960s; the greater availability and improvements of waveform-recording instruments will further enhance the data base in the future. At the present time, however, the wide variety of events reported in the data base may be simplified into three types of surges. These three types will be described in detail in the following subsections; briefly, they are categorized as follows:

- (1) Oscillatory surges of relatively high frequency, generally labeled "Ring Wave." Those at the higher end of the frequency range have limited energy deposition capability, but may have high peak voltages. Those at the lower end of

the frequency range may have higher energy deposition capability but lower peak voltages.

- (2) High-energy surges of various waveforms generally accepted as representing appropriate stress levels associated with nearby direct lightning discharges, fuse operation, or capacitor switching.
- (3) Bursts of very fast surges, associated with local load switching, with little energy but capable of producing serious interference or upset.

In this section, a qualitative description and justification is presented for these three types of surges. Section 8 provides recommendations on the planning for surge immunity; Sections 9 and 10 provide precise numerical definitions and waveforms intended for planning surge tests or computer simulations of systems performance under surge conditions.

7.4.2 Ring Waves. Measurements in the field and in the laboratory indicate that most surge voltages propagating in indoor low-voltage systems have oscillatory waveforms (Martzloff and Hahn, 1970 [B22]; Allen and Segall, 1974 [B2]; Wernström et al., 1984 [B34]; Goedbloed, 1987 [B14]). A surge impinging on the system, even if initially unidirectional, excites the natural resonance frequencies of the system (Martzloff, 1990) [B48]. As a result, not only are the surges typically oscillatory, but surges may have different amplitudes and waveforms at different places in the system. The frequency of oscillation of these surges ranges from less than 1 kHz (primarily capacitor switching) to more than 500 kHz (primarily local oscillations).

Thus, more than one ring wave may be necessary to represent this type of surge. In the 1980 edition of this document, a "Ring Wave" was defined with a 0.5 μ s rise time and decaying oscillation at 100 kHz, each peak being 60% of the amplitude of the preceding peak of the opposite polarity. A ring wave with a lower frequency is also proposed as an additional waveform in Section 10.

The fast rate of change of the front of the ring wave can produce the effects associated with nonlinear voltage distribution in windings. Some semiconductors are also sensitive to dv/dt effects, in particular when they are

⁹See *expected occurrence of lightning* in Appendix B for a discussion of flash density and isokeraunic levels.

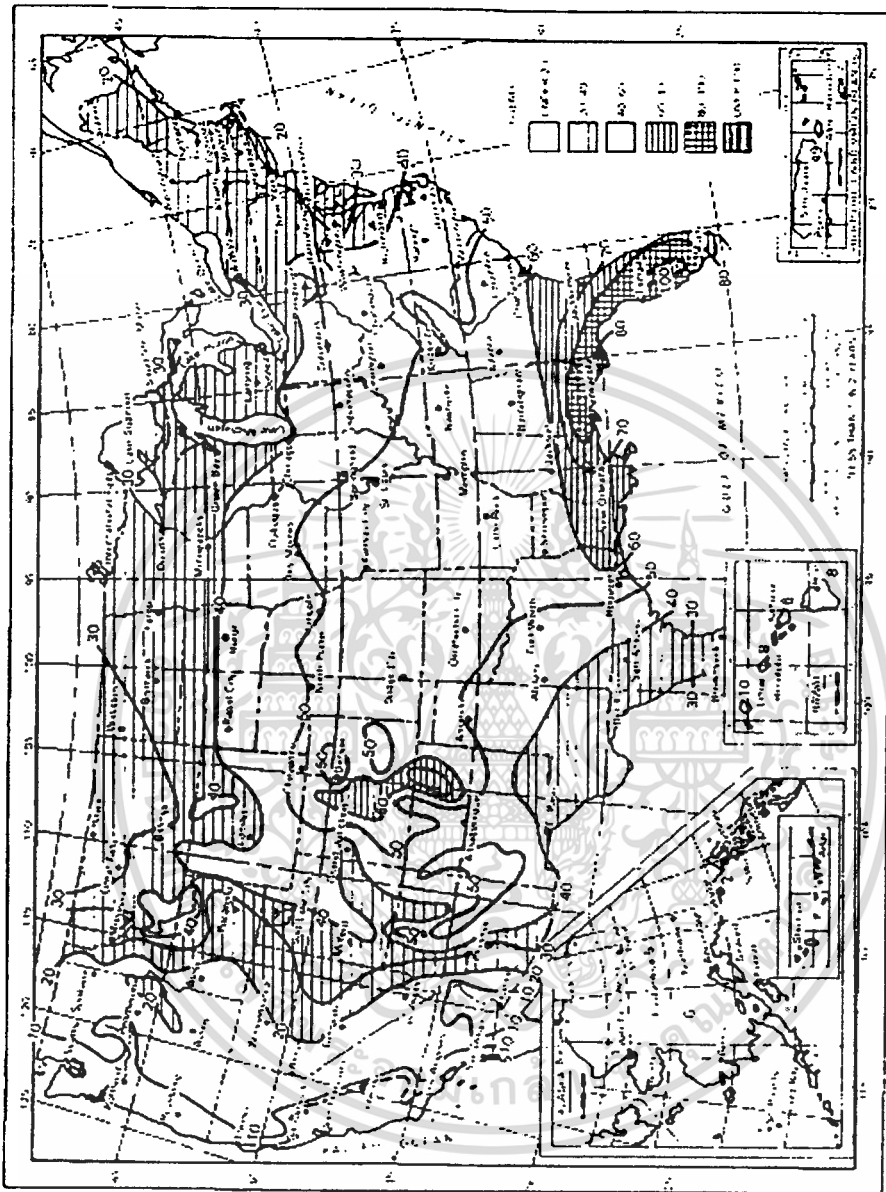


Fig 7
Isokraemic Levels for the United States

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

forced into or out of conducting states, or when a transient is applied during a particular portion of the power frequency supply cycle (see *limiting of surges* in Appendix B22).

Shorter rise times are found in many transients, but as they propagate into the wiring or are reflected from discontinuities in the wiring, the rise times become longer (Martzloff and Leedy, 1990 [B46]; Martzloff, 1990 [B48]).

The peak voltage can produce insulation breakdown in connected components and equipment, even if the energy involved in the 100 kHz Ring Wave is small. Surges with higher energy deposition capability will be represented by other waveforms.

7.4.3 High-Energy Surges. Although the data base on energy is limited, there is a need to acknowledge the occurrence of high-energy surges capable of depositing more energy than that associated with the 100 kHz Ring Wave.

Anecdotal field experience shows that surge-protective devices with limited current handling capability installed at the service entrance have a significant failure history, while applications of the same device further inside a building are generally successful. From the energy and source impedance factors discussed under 7.5, it becomes apparent that the 100 kHz Ring Wave will not deposit enough energy in surge-protective devices to produce the observed failures.

Several types of events can be the origin of high-energy surges capable of delivering significantly more damaging energy:

- (1) Lightning surges on overhead distribution systems (A)
- (2) Lightning surges originating on overhead lines and traveling in cables (B)
- (3) Surges generated by fuse operation involving trapped energy in the power system inductance (C)
- (4) Surges generated by power-factor correction capacitor switching (D)

(A) Lightning surges on overhead lines have long been represented by a voltage surge of 1.2/50 μ s and a current surge of 8/20 μ s (IEEE C62.1-1984, (7)), which is described as "impulse" in IEC Document 99 [B97], and as the Combination Wave in the present document. These two waveforms have long been used, are readily generated in many laborato-

ries, and are an appropriate simplification of the environment near the service entrance of a building connected to an overhead distribution system. They also have substantial energy deposition capability, when applied from a generator with inherent capability to supply a voltage as well as a current waveform (IEEE C62.45-1987 [8]), to provide representative stress to connected equipment.

Because of the relatively short front time of 8 μ s, such a postulated current surge would not propagate very far into a building. The voltage drop associated with the propagation of a high-amplitude current surge front (thus high di/dt) in the inductive impedance of the wiring would require a driving voltage at the service entrance high enough to cause sparkover of the clearances (Martzloff, 1983 [B43]). This limitation sets the basis of the selection of waveforms associated with the location categories discussed in 7.7 and makes their maximum amplitude less dependent on the system voltage than on the actual clearances.

(B) Lightning surges traveling in underground systems involve longer durations. Lightning surges that have traveled along a long cable have wave fronts with a slope less steep than that of the initiating wave, as a result of the propagation characteristics of the cable. The peak of the initiating surge is likely to reflect the operation of a surge arrester at the interface of the overhead system and the cable.

(C) Surges generated by fuse operation involving long cables are unidirectional surges lasting several hundred microseconds, depending on the inductance of the cable and the transformer feeding the fault being cleared by the fuse (Meissen, 1983 [B25]).

(D) Capacitor switching surges and some other switching surges involve damped oscillations at low frequency (a few hundred hertz to a few kilohertz) lasting for a few milliseconds at most (Boehne and Low, 1969 [B5]; Wiitanen et al., 1971 [B35]; Martzloff, 1986 [B22]). From the point of view of energy exchange, such a long oscillation could be simplified as the envelope of the oscillation. Such an envelope would have a duration in the same order of magnitude as the surges generated by fuse operation.

These last three types of surges, (B), (C), and (D), have maximum amplitudes reflecting the system voltage rather than clearances, in

contrast to the (A) surges. A simplified common representation might be adequate for these three phenomena.

For instance, the 10/1000 μ s unidirectional waveform has long been specified for surge protection requirements in the communications and process control industries (IEEE Std 518-1982, [10]), and a 100/1300 μ s waveform has been recommended in several IEC draft documents on electromagnetic compatibility. Thus, the present recommended practice added two additional waveforms of longer duration: a unidirectional surge (10/1000 μ s) and a low-frequency 5 kHz Ring Wave if the application warrants such waveforms.

It is not uncommon for the frequency of a capacitor switching surge to be much less than 5 kHz, as low as 300 Hz. The lower the frequency, the greater the available energy. This energy may be too great for a surge-protective device attempting to clamp that surge, particularly if the switching device should restrike during opening and little impedance exists between the switching device and the protective device.

The difficulty, however, is that the data base on these longer waveforms is limited concerning representative source impedances or available currents for these long-duration surges. Meaningful testing can be achieved only if source impedance or short-circuit current are defined in addition to a voltage waveform.

Therefore, at the present state of knowledge, this recommended practice can only urge designers and users to consider the specific application environment and call for additional waveforms if their knowledge of the environment justifies the added complication of testing for these additional waveforms.

In the absence of measurements on actual occurrences, some theoretical considerations on *surge impedance and source impedance* provide guidance on what the appropriate values may be for the source impedance or the available current.

For long waves in power-system cables, with travel times longer than the front time of the surge, the source impedance would be the characteristic impedance of the cable, typically 10 Ω to 100 Ω for power-system cables, as opposed to higher values for overhead open-wire lines. However, if the travel times are shorter than the front time of the surge, then the

inductive impedance would prevail, and its value may be as low as a fraction of an ohm at the lower frequencies implied by such long waves.

For surges generated by fuse operation, the maximum fault current involved in the trapped energy ($1/2 Li^2$) has the value corresponding to the let-through current of the fuse in question (not the available fault current), as well as the system inductance, including the cable and the transformer feeding the fault. The let-through current is typically between 100 and 1000 A in residential or commercial circuits and possibly higher in industrial circuits.

For capacitor switching surges, the impedance of the complete circuit would be the combined impedance of the capacitor bank (source) and the series impedance between the point of switching and the point of interest (not the characteristic impedance). A few examples of this situation may be found in the literature.

7.4.4 Fast Transients. Circuit opening by air-gap switches (relays and contactors) has long been recognized as producing a succession of clearings and reignitions that generate bursts of fast-ringing surges in the circuits being switched (Mellitt, 1974 [B26]; Minegishi et al., 1989 [B27]). These transients have sometimes been associated with arcing phenomena under the label of "showering arc." Under the name of "Electrical Fast Transients (EFT)," IEC 801-4 (1988) [5] requires a test involving bursts of surges with 5 ns rise time and 50 ns duration at various severity levels.

The new version of surge withstand capability (SWC) tests (IEEE C37.90.1-1989 [6]), intended for protective relays and relay systems, also includes a fast transient specification. The waveform for the SWC test calls for a rise time of less than 10 ns and a duration of 150 ns, not very different from the 5 ns and 50 ns of the EFT. (The upset aspects are primarily associated with the rise time, so that the difference between a duration of 50 ns and 150 ns should not be a significant difference.)

Furthermore, the SWC test is primarily intended for the high-voltage substation environment, while the EFT test is intended for general industrial equipment. Therefore, this recommended practice encourages the use of the EFT test over the SWC test. Actually, when

tolerances are taken into consideration, differences in the effect of one waveform versus the other may not be very significant. Adopting the EFT waveform to represent the environment next to switching devices appears to be a reasonable choice of selection, in harmony with international standards, for equipment subjected to that environment.

In contrast to the other waveforms discussed previously, the duration of these fast transients is short compared to the travel time in building wiring systems (50 ns is the time required to travel 10 m). Therefore, transmission line concepts are applicable to describe the propagation of these transients in building wiring and large equipment. This fact has two implications in including these fast transients in the description of the surge environments:

- (1) The characteristic impedance of low-voltage wiring systems inside a building is typically 100 Ω to 300 Ω for L-N or L-L configurations, and typically 25 Ω to 75 Ω for LL-G or LN-G configurations (see Appendix B5 for a discussion of the terms *differential mode and common mode* in the context of this document). This impedance will limit the current associated with these fast transients.
- (2) After only a short distance traveling in the wiring, the amplitude, as well as the rate of rise, of these fast transients is attenuated (Martzloff and Wilson 1987 [B45]; Martzloff and Leedy, 1990 [B47]). Furthermore, even a small resistive or capacitive load at the end of the transmission line can reduce the arriving surge (Martzloff, 1990 [B48]). Thus, the design of the equipment and its method of connection to the mains, as well as the internal capacitance to ground, has a greater effect on the equipment withstand capability than changes in the waveform and amplitude of the impinging fast transients.

Therefore, fine detail in the specification of a fast transient waveform is not significant to the actual performance of the equipment; the only justification for a specific description of the waveform is the acknowledged need for uniformity in test procedures. The EFT seeks to emulate a phenomenon that occurs in

repeated groups of pulses that may vary in amplitude and duration over an indefinite period of time. It is not an attempt to reproduce the surges as they appear on the mains interface, as other surges waveforms do; it is a practical compromise for evaluating equipment immunity to fast transients.

This recommended practice emphasizes the importance of maintaining a clear distinction between the concepts of a *description* of a surge occurrence and a *test specification*. The preceding discussion of how the EFT test relates to the environment but is not to be taken as "representing" the environment is a good example of the need to maintain this distinction.

NOTE: Endorsing the EFT test procedure should not lead to the misinterpretation that there are such frequent and widespread fast transients with 4 kV peaks in low-voltage ac power circuits.

The only prevailing consideration is that passing the EFT test, when required for equipment acceptance, seems to result in improved equipment reliability. A good example for the need to consider fast transients is the case of two pieces of electronic equipment operating from the same receptacle, thus closely coupled. Disconnecting power from one while maintaining power to the other can subject the powered equipment to high-frequency transients such as the EFT (see *description versus specification* in Appendix B4).

Thus, a recommendation for considering the EFT as an additional waveform is directly related to a test demonstrating equipment immunity to upset by fast transients, rather than an inference that this specific waveform can be found in the environment. Fast transients do occur during contact arcing, and digital circuits are fast enough to respond (in an unwanted manner) to these fast transients. Detailed specifications on the test procedure are given in IEC 801-4 (1988) [5]. Waveforms are described in Sections 8 and 10; some implications of the test procedure are discussed under *EFT test* in Appendix B6.

7.5 Amplitude, Energy, and Source Impedance. For each waveform selected as one of the possible representations of the surge environment, the peak open-circuit voltage and the peak short-circuit current should be stated to provide a complete and meaningful description.

Occasionally, attempts will be made to describe surges in terms of "energy" to help select the rating of a candidate surge-protective device. However, this concept can be a misleading oversimplification because the energy distribution among the circuit elements involved in a surge event depends on the impedance of the source (including the ac mains) as well as on the impedance of the surge-protective device called upon to divert the surge (Standler, 1989 (B83)). There is no independent, meaningful, and self-contained description of a surge in terms of energy alone. The energy delivered to the end-equipment is the significant factor, but it depends on the distribution between the source and the load (equipment or surge-diverting protective device, or both).

In a gap-type protective device, the low impedance of the arc after sparkover forces most of the surge energy to be dissipated elsewhere. In a clamping protective device, by its very nature, a substantial share of the surge energy is dissipated in the protective device. It is therefore essential to the effective use of suppression devices that a realistic assumption be made on the source impedance of the surge whose effects are to be evaluated or duplicated by tests.

Note that the voltage waveforms proposed in this section are intended to represent the waveform that a surge source would produce across an open circuit. The waveform will change when the source is connected to a finite impedance load, and the degree to which it is lower is a function of the source impedance (see *surge impedance and source impedance* in Appendix B).

The devices should be able to withstand the current injected through them by the surge source. A test generator of too high an impedance may not subject the device under test to sufficient stress, while a generator of too low an impedance may subject protective devices to unrealistically severe stress. A test voltage wave specified without reference to source impedance could imply zero source impedance—one capable of producing that voltage across any impedance, even a short circuit. That would imply an infinite surge current, clearly a situation as unrealistic as an excessively high generator impedance.

The amplitude of a surge, as recorded in site surveys, is often cited in volts and is a signifi-

cant parameter for high-impedance equipment exposed to the surge at that site. However, the voltage amplitude of a surge observed at a specific site is dependent on the interaction of the source and the load connected at that time, because the series impedance upstream from the point of observation and the shunt impedance downstream from the point of observation act as a voltage divider. Unfortunately, there is very little data on actual surge currents.

The capability of a surge event to deliver a surge current to a device connected in shunt across the line at a specific point of the installation is the significant concern for low-impedance equipment exposed to that surge event. The interaction of source, mains, and load is relevant to this issue because of the current-limiting action of the source and mains impedances. The effective resistance of surge-protective devices, V/I , is typically less than 1Ω . The effective source impedance (defined as the ratio of open-circuit voltage and short-circuit current) is typically larger than that of the protective device, ranging from a few ohms to a few tens of ohms.

One approach to providing meaningful description of the surges is to cite an open-circuit voltage, applicable to high-impedance circuits, and a short-circuit current, applicable to low-impedance circuits, as discussed in 7.7.

7.6 Rate of Voltage Change. As indicated by the schematic representation of Fig 1, the rate of change of a transient voltage is a significant parameter for equipment susceptible to upset caused by the coupling of fast transients into logic circuits.

The available data base on this aspect of surges is still scant, but some recent surveys include this parameter in their results (Fig 5). The preceding discussion of the EFT test concept also gives perspective on the issue. Recommending consideration of this EFT test, when appropriate, will also focus on susceptibility to rate of change.

7.7 Location Categories. Because of the wide range of possible source impedances and the difficulty of selecting a specific value, three broad categories of circuit locations have been defined in this document. These categories represent the vast majority of locations, from those near the service entrance to those remote from it.

LOW-VOLTAGE AC POWER CIRCUITS

For surges impinging the building and originating in the utility supply, the source impedance may be considered constant, while the series impedance of the mains increases from the outside to locations well within the building. Open-circuit voltages (load impedance of high values) for surges other than the fast transients show little variation within a building because simple wiring provides little attenuation (Martzloff, 1990 [B48]).

The increasing mains impedance between the service entrance and the point of connection to a piece of equipment will have an effect on the surge current. This impedance places a limit on the maximum rate of current change that can occur in the wiring because rapid changes of current require a driving voltage that would result in wiring sparkover at the source, thus cutting off the surge before it can travel further into the building.

Fig 9 illustrates the application of three location categories to the wiring of a power system. These three location categories may appear similar to three of the four overvoltage categories defined in IEC 664 (1980) [4]. However, the categories of IEC 664 (1980) [4] are voltage categories, while the location categories defined here are impedance (or current) categories. (See *installation categories* in Appendix B10 for the differences and similarities of the voltage and current staircases according to the two concepts.)

Location Category C is likely to be exposed to substantially higher voltages than Location Category B because the limiting sparkover occurs at higher values. In particular, the limiting effect of spark gaps or other clamps that might exist in the watt-hour meter or further downstream is not available in Location Category C. The high-exposure rates of Fig 6 could apply, with open-circuit voltages in excess of 10 kV and discharge currents of 10 kA or more. Field experience provides some information: secondary arresters having a 10 kA, 4/10 μ s rating (Section 8.6.1 of IEEE C62.1-1984 [7]) have been applied for many years in Location Category C and have demonstrated their capability for effectively diverting most surge currents associated with that environment. This observation provides a reasonable upper boundary to the levels of surges expected in typical Location Category C environments. Of course, direct lightning strikes at the point of interest would produce larger voltages and

currents (Cianos and Pierce, 1972 [B9]; Martzloff, 1980 [B42]; Chowdhuri, 1989 [B8]).

In the tables of Sections 9 and 10, three Location Categories, A, B, and C, are considered. Although a Location Category C device could be used in place of Location Category A or B devices, this is generally not necessary. The majority of applications involve indoor environments downstream from a service entrance connection, remote from the stress levels involved in Location Category C. Thus, the description of the Location Category C environment should not be indiscriminately turned into a required performance specification for all equipment, just for the sake of conservative design. For a given exposure level, voltages are the same in Location Categories A and B; only the current levels change, decreasing from Location Category B to Location Category A.

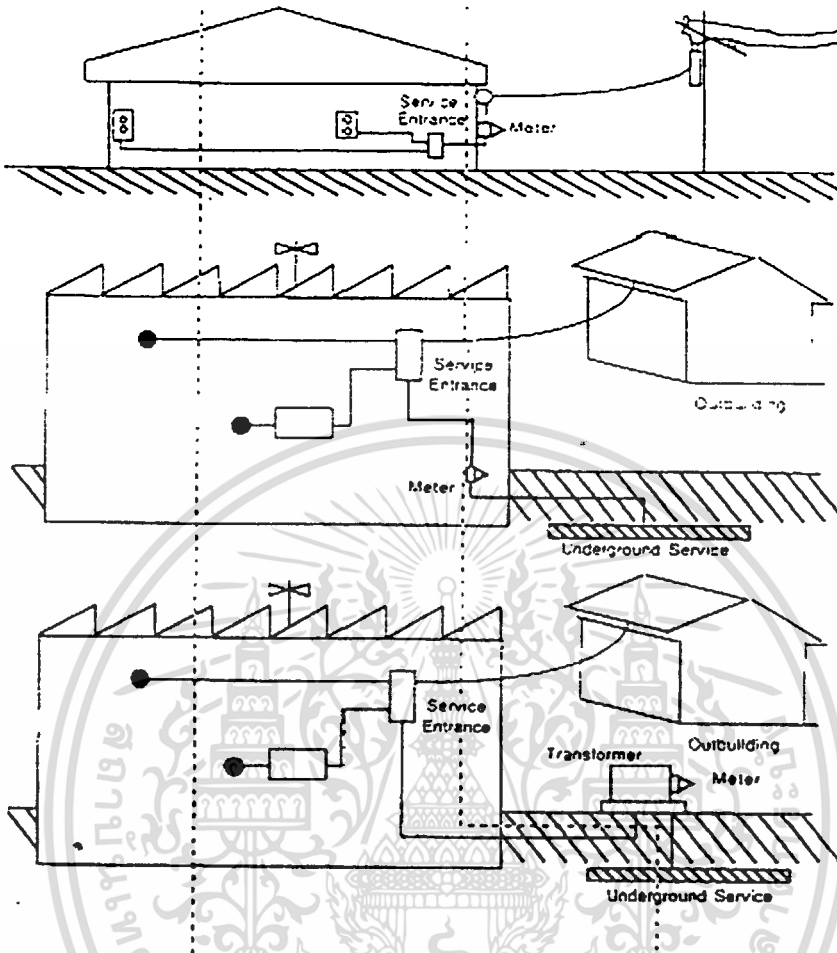
8. Recommended Planning for Surge Immunity

8.1 General. This section presents recommendations on steps to be taken to achieve surge immunity for equipment connected to low-voltage ac power circuits (mains). This approach implies recognition of the relation of equipment susceptibility, environment hostility, and degree of reliability required for the equipment.

The typical waveforms discussed in Section 7 will be used as specific recommendations for a representation of the basic environment with two standard waveforms (Section 9) and three additional waveforms (Section 10).

It should be noted that recommendation of test waveforms alone is not an equipment performance specification. Other documents, based on the waveforms recommended herein, have been or will be developed to describe the performance of equipment or protective devices in low-voltage ac power circuits. Test procedures for the standard waveforms are described in detail in IEEE C62.45-1987 [8].

8.2 Reconciling Equipment Susceptibility and Environment Hostility. Survival or undisturbed operation of equipment in the surge environment that has been described (and simplified) in Section 7 presents a technical as



A
Outlets and long branch circuits
All outlets at more than 10 m (30 ft)
from Category B
All outlets at more than 20 m (60 ft)
from Category C

B
Feeders and short branch circuits
Distribution panel devices
Bus and feeder industrial plants
Heavy appliance outlets with "short"
connections to service entrance
Lighting systems in large buildings

C
Outside and service entrance
Service drop from pole to building
Run between meter and panel
Overhead line to detached building
Underground line to well pump

Demarcation between Location Categories B and C is arbitrarily taken to be at the meter or at the mains disconnect (ANSI/NFPA 70-1990 [2], Article 230-70) for low-voltage service, or at the secondary of the service transformer if the service is provided to the user at a higher voltage.

Fig 9
Location Categories

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

well as an economic challenge. An approach that would attempt to provide sufficient surge withstand capability of all equipment for the worst possible environment may be uneconomical and perhaps not technically feasible.

Depending on the operational requirements of the equipment on the one hand, and the type of environment in which the equipment will be used on the other hand, a designer can make an effective protection match. Two steps are necessary in achieving the match. The first step is to recognize the type of environment in which the equipment will be installed. The next step is to select the appropriate characteristics for the interface: surge-protection levels matched to the needs of the equipment, and surge handling capability matched to the severity of the environment.

Immunity of equipment against surges impinging on the mains interface can be economically achieved by designing the equipment on the basis of a realistic description of the surge environment. The design activity includes coordination of the inherent surge withstand capability of the internal circuit components of the equipment, as required by the equipment function, with the surge response voltage of any front-end protective devices, with all of this done for a set of specific environments.

For very simple systems, it may be sufficient to compare the performance of the protective device to the withstand capability of the functional component. For more complex or nonlinear systems, and for surge-protective circuits, testing is always necessary. The behavior of nonlinear circuits is difficult to predict, and their interaction with surges on the one hand and complex electronic equipment on the other hand is even more so. Consequently, verification by test is unavoidable. To assist in this process, Sections 9 and 10 provide precise definitions (waveforms, tolerances, equations for modeling) of the various representative waveforms that have been identified in Section 7.

8.3 Worst-Case Design and Economic Trade-Off. Surge testing on the mains interface of equipment is generally performed to determine the surge withstand capability of the equipment that will be exposed to the surge environment expected at that interface. From the wide variety of field experiences described

in Section 6, representative waveforms have been recommended in Section 7 in order to reduce the test program to a manageable number of test requirements.

Excessively conservative planning will drive the requirements toward specifying the largest number of possible types of surge waveforms and the highest levels of stress, presumably to achieve maximum reliability of the equipment. Such overdesign of equipment surge protection may result in poor economy and a false sense of security.

Specifying only the maximum stress in a test program based on the most severe environment level specification may not provide complete protection and should be avoided for two reasons:

- (1) Failure may occur at levels lower than that of a single test at maximum stress, therefore incomplete information would be obtained on the level at which failures start occurring.
- (2) Worst yet, blind spots may exist in the performance of the equipment, where the test outcome is a success at the highest stress level, but a lower stress level would produce a failure or upset. There is a tendency to believe that more current or voltage will produce the more devastating results. This is not necessarily true. Frequently, a high-energy surge can cause a protective device to react more quickly than a low-energy surge.

In general, a trade-off based on risk analysis is an inescapable element of equipment design and specification. Furthermore, the level of immunity of any specific equipment within a particular design (catalog number and vintage) is not a single-value parameter, but is represented by some statistical distribution. In addition, the amplitude of the surges that can be expected on the mains is also a statistical distribution. Therefore, reconciling the equipment susceptibility with the surge environment level involves the probabilistic intersection of two distributions, as illustrated by Fig 10.

The range of electromagnetic environments in which a particular piece of equipment will be called to operate can vary widely. Some equipment is intended for a specific environ-

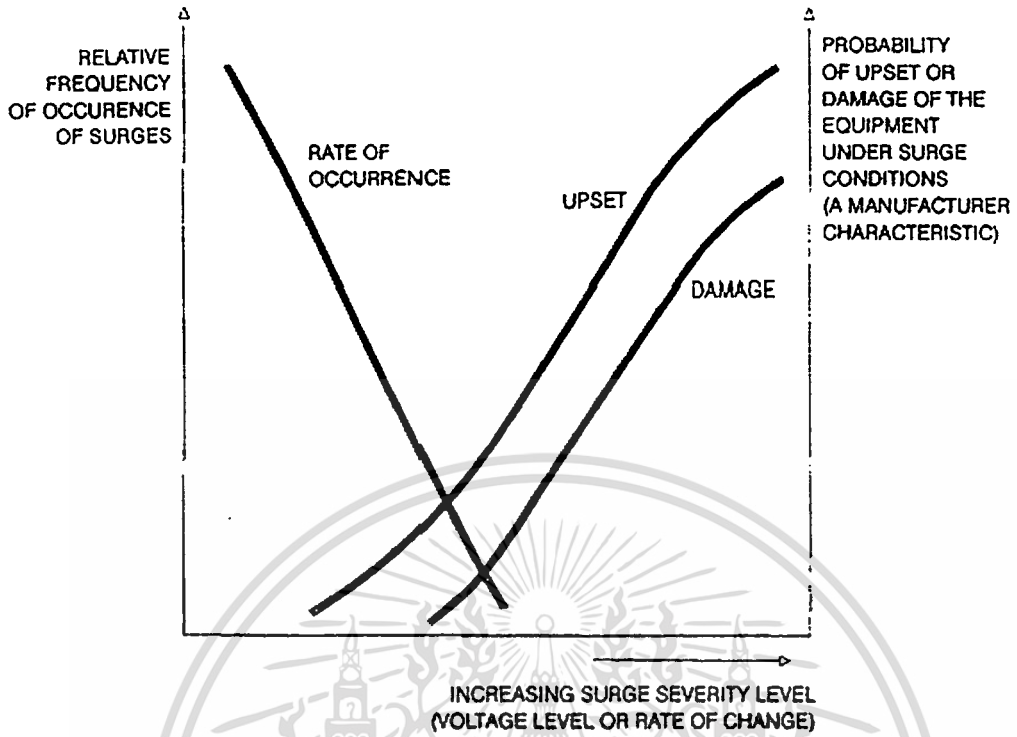


Fig 10
Concept of Surge Immunity

ment while other equipment can be applied in a variety of environments. In addition, the particular environment may in fact change over time, as a function of a number of factors, including geographic, seasonal, and annual changes in local lightning incidence. Another change over time concerns the existing complement of nearby electric and electronic equipment that may generate interfering or damaging surges.

For industrial equipment, industry groups and various standardizing bodies often provide guidance in the selection of EMI severity levels that the equipment has to endure, of which the surge environment discussed here is a subset. In both areas of commercial and consumer goods, however, manufacturers often make their own trade-offs between excessive malfunctions or damage on the one hand and excessive costs on the other. One

solution to this ongoing dilemma is to design products whose basic surge immunity is coordinated with low or medium exposure levels, while offering options, upgrades, or additional protection for more hostile environments.

Independent of the immunity level built in or supplied optionally to provide performance without upset or damage, protection of some kind is often included to guard against so-called consequential damage, such as fires or explosions, while nevertheless allowing the victim equipment itself to fail.

It is to assist making evaluations among these and other alternatives, for equipment of all types, that this section on planning for surge immunity has been prepared.

8.4 Surge Effects. The nature and functional purpose of the equipment influence the judgment of what will be considered an acceptable

LOW-VOLTAGE AC POWER CIRCUITS

or unacceptable effect of a surge. When the consequences of a failure are not safety related but only represent an economic loss, it may be appropriate to trade off the cost of protection against the likelihood of a failure caused by a high-energy, but rarely encountered, surge. This rarity can take two different aspects "when?", or "where?"

- During operation of the vast majority of equipment in service, surges with relatively high levels of voltage or current can occur on rare occasions, such as that caused by lightning or multiple restrikes during de-energization of capacitor banks—the question is when?
- Among all equipment in service, a few rare installation sites are frequently and consistently afflicted by surges like local switching surges, for instance, power-factor correction capacitor banks—the question is where?

The consequences of a surge impinging on the mains interface can be classified in four broad categories, as discussed in the following list, each having several aspects.

- (1) *No observed change.* This absence of visible change would demonstrate that the equipment is actually immune to the surge level in question; however, appearances can be deceiving. The equipment can continue normal performance within specified limits, thus meeting the criterion of "No loss of function or performance." Yet significant consequences are possible: degradation of performance still within limits but foreboding larger degradation, latent failure of a component, or an unforeseen consequence elsewhere in the equipment environment (IEEE C62.45-1987 [8]).
- (2) *Upset.* This consequence can be a self-recoverable upset by design of the software and therefore not immediately apparent, or may be a permanent upset requiring operator intervention or programmed automatic action occurring after some time delay. Many documents on test methods suggest three classes for this type of consequence, as follows:

- (a) Minor: Acceptable temporary loss of function, but no faulty operation.
 - (b) Major: Temporary faulty operation or performance (which is self-recoverable)
 - (c) Critical: Faulty operation or performance that requires operator intervention or system reset. Another consequence that may be classified in this category is an upset caused by sparkover of air clearances without permanent degradation of adjacent solid insulation.
- (3) *Damage.* This consequence includes the subtle as well as the obvious. As discussed under (1) above, damage may occur without being detected unless special assessment of the equipment condition is performed. One of the most vexing problems in insulation testing is the risk of creating an incipient defect by applying a surge test.
 - (4) *Consequential Damage.* This consequence includes the possibility that equipment subjected to a surge may cause damage to its surroundings well beyond the importance of the damage or upset done to the equipment itself. Ignition of a fire or an explosion could occur. Damage may result from unseen hardware upset, during which data become corrupted data that may subtly degrade other elements in the data base, with the user left unaware of the situation.

Criteria for acceptance or rejection have to take into consideration these different consequences. For instance, upset may be ruled out until a specified level of severity is reached, above which occurrence of an upset is declared acceptable; at some higher severity level, damage may be ruled acceptable, provided that safety not be jeopardized and no consequential damage occurs. In any event, it is imperative that data validity, where applicable, be verified following each test to ensure that data base damage has not occurred.

Furthermore, the level at which an upset or damage occurs depends on the mission of the equipment. For this reason, universal levels of withstand should not be assigned to all equipment. Hence, the values of *environment levels* proposed in the next sections should not

be blindly construed as test severity levels requirements.

8.5 Selection of Waveforms. Five types of surge waveforms are described in general terms in 7.4. Two of these are recommended as standard waveforms and three as additional waveforms. Table 2 presents a summary of these waveforms, showing in which Location Categories they are applicable. Further information on the standard waveforms is presented in Section 9, and on the additional waveforms in Section 10. These two sections provide precise definitions, including tolerances on the performance of test equipment and equations for the nominal waveforms. The tolerances are intended to help assure reproducible waveforms among different laboratories and to provide a realistic perspective on the limitations of generation and measurement of test surges. The equations are intended for computer simulations of surge protection circuits and for design of surge generators. The history of the definitions of

these waveforms is discussed in Standlor, 1989 [B68].

NOTE: The fact that five waveforms are listed in this document should not be construed as a requirement that all equipment be subjected to all five types of surges. The 100 kHz Ring Wave and the Combination Wave are recommended as basic design and test surges. The additional waveforms (the EFT, the 10/1000 μ s Wave, and the 5 kHz Ring Wave) need only be included when sufficient evidence is available to warrant their use.

In this manner, a transition is made between the *description* of the surge environment, which was the first objective stated in the scope of this recommended practice, and the *recommendation* of specific test waveforms, which is the second objective. The *amplitude* of the test surges is still a characteristic selected by the parties involved, taking into consideration the environment exposures listed in the tables of Sections 9 and 10. In the selection of these levels, the concept of Transient Control Level (Fisher and Martzloff, 1976 [B53]) could provide guidance on the determination of the design margins and test procedures.

Table 2
Summary of Applicable Standard* and Additional Waveforms†
for Location Categories A, B, and C

Location Category (3)	100 kHz Ring Wave (Table 3)	Combination Wave (Table 4)	5/50 ns EFT Burst (Table 7)	10/1000 μ s Wave (Table 8)	5 kHz Ring Wave (Table 9)
A	Standard	None	Additional	Additional	Additional
B	Standard	Standard	Additional	Additional	Additional
C	None	Standard	None	Additional	Additional

* Refer to Tables 3, 4, and 5 for details on the standard waveforms (Section 9).

† Refer to Tables 7, 8, and 9 for details on the additional waveforms (Section 10).

The 1980 edition of this document, as a guide, provided some schematic diagrams of pulse-shaping networks for surge generators that provided the three waveforms specified in that edition.

Experience has shown that improvised surge generators, while they can produce stresses useful for in-house immunity evaluation (Buschke, 1988 [B71]), can also produce waveforms that may not be easily reproduced in other laboratories. The output waveforms of generators built from a published circuit are often dominated by parasitic components and do not produce the desired waveforms. Improvised generators may also lack critical safety

features. Therefore, this revised document provides precise information on desired waveforms, but no longer provides descriptions of circuits for surge generators.

9. Definition of Standard Surge-Testing Waveforms

9.1 General. The two recommended standard waveforms are the 100 kHz Ring Wave and the 1.2/50 μ s–8/20 μ s Combination Wave. The parameters of these two standard waveforms are summarized in 9.1.1 and 9.1.2. Plots of the

LOW-VOLTAGE AC POWER CIRCUITS

three nominal waveforms (one for the Ring Wave, two for the Combination Wave) are shown in Figs 11–13. Criteria for selection of the peak voltages and currents that correspond to various environmental exposures are discussed in 9.2 with reference to Tables 3, 4, and 5. The implications for test conditions are discussed in 9.3. A detailed description, including tolerances, of these two standard waveforms is given in 9.4. Equations describing the waveforms are given in 9.5.

9.1.1 100 kHz Ring Wave. A plot of the nominal Ring Wave is shown in Fig 11, and further details are given in 9.4.1. No short-circuit current waveform is specified for the 100 kHz Ring Wave. A peak short-circuit current, however, is proposed in 9.2, according to the location category. The nominal ratio of peak open-circuit voltage to peak short-circuit current (effective impedance) is specified to be 12Ω for simulation of Location Category B environments or 30Ω for simulation of Location Category A environments. The nominal amplitude of the first peak of either the open-circuit voltage or the short-circuit current is selected by the parties involved (see 9.2), according to the severity desired.

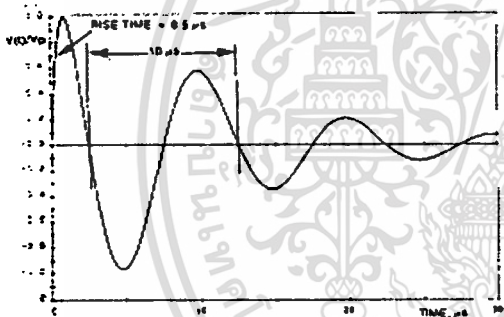


Fig 11
100 kHz Ring Wave

9.1.2 Combination Wave. The Combination Wave involves two waveforms, an open-circuit voltage and a short-circuit current, shown in Figs 12 and 13 respectively. Further details are given in 9.4.2. The Combination Wave is delivered by a generator that applies a $1.2/50 \mu\text{s}$ voltage wave across an open circuit and an $8/20 \mu\text{s}$ current wave into a short cir-

cuit. The exact waveform that is delivered is determined by the generator and the impedance to which the surge is applied.

The value of either the peak open-circuit voltage or the peak short-circuit current is to be selected by the parties involved (see 9.2), according to the severity desired. The nominal ratio of peak open-circuit voltage to peak short-circuit current is 2Ω for all severity levels.

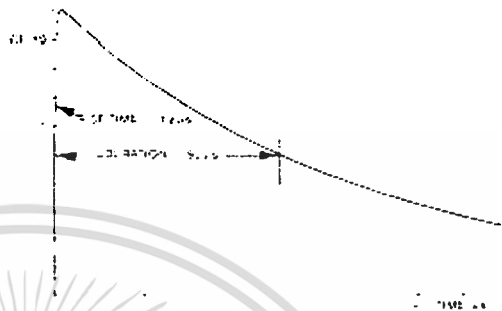


Fig 12
Combination Wave, Open-Circuit Voltage

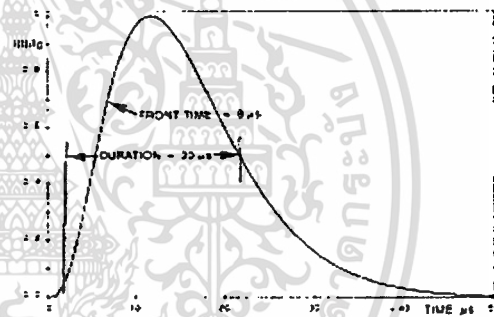


Fig 13
Combination Wave, Short-Circuit Current

9.2 Selection of Peak Values of Standard Waveforms. Tables 3, 4, and 5 include a multilevel matrix of location categories, types of surges, and peak voltages and currents provided as a guide toward the selection of an appropriate set of design parameters or tests. It is emphasized that Tables 3, 4, and 5 can only provide a menu. *They are not intended to be mandatory requirements.*

Table 3
Standard 0.5 μ s–100 kHz Ring Wave
Voltages and Current Surges Expected in Location Categories* A and B[†]
Low, Medium, and High Exposures[‡]
Single-Phase Modes:[§] L-N, L-G, and [L&N]-G
Polyphase Modes: L-L, L-G, and [L's]-G
(See Table 5 for N-G Mode)

Location Category*	System Exposure [‡]	Peak Values**		
		Voltage (kV)	Current (kA)	Effective Impedance (Ω) [¶]
A1	Low	2	0.07	30
A2	Medium	4	0.13	30
A3	High	6	0.2	30
B1	Low	2	0.17	12
B2	Medium	4	0.33	12
B3	High	6	0.5	12

* See 7.7 for definition and discussion of Location Categories.

[†] No provision is made for a 100 kHz Ring Wave in Category C.

[‡] See 7.3.3 for definition and discussion of system exposure.

[§] See IEEE C62.45-1987 [8] for discussion of coupling modes.

** The three values shown for each location category, for the three system exposures within the location category, have been set by consensus to provide guidance and uniformity in test procedures. Other levels may be negotiated between the parties involved.

[¶] In making simulation tests, use the voltage values shown for the open-circuit voltage of the test generator or the current values shown for the short-circuit current of the test generator (with coupling network and back filter in place).

^{¶¶} The effective impedance of the surge source, emulated by the test generator, is defined as the ratio of the peak voltage to the peak current. It has the dimension of a resistance, but is not a pure resistance (see 9.4.1).

Table 4
Standard 1.2/50 μ s–8/20 μ s Combination Wave
Voltages and Current Surges Expected in Location Categories* B and C[†]
Low, Medium, and High Exposures[‡]
Single-Phase Modes:[§] L-N, L-G, and [L&N]-G
Polyphase Modes: L-L, L-N, L-G, and [L's]-G
(See Table 5 for N-G Mode)

Location Category*	System Exposure [‡]	Peak Values**		
		Voltage (kV)	Current (kA)	Effective Impedance (Ω) [¶]
B1	Low	2	1	2
B2	Medium	4	2	2
B3	High	6	3	2
C1	Low	5	3	2
C2	Medium	10	5	2
C3	High	20	10	2

* See 7.7 for definition and discussion of Location Categories.

[†] No provision is made for a Combination Wave in Category A; however, equipment connected to short branch circuits may be exposed to a moderate level of Combination Wave surges (UL 1449-1988 [B96]).

[‡] See 7.3.3 for definition and discussion of system exposure.

[§] See IEEE C62.45-1987 [8] for discussion of coupling modes.

** The three values shown for each location category, for the three system exposures within the location category, have been set by consensus to provide guidance and uniformity in test procedures. Other levels may be negotiated between the parties involved.

[¶] In making simulation tests, use the voltage values shown for the open-circuit voltage of the test generator or the current values shown for the short-circuit current of the test generator (with coupling network and back filter in place).

^{¶¶} The effective impedance of the surge source, emulated by the test generator, is defined as the ratio of the peak voltage to the peak current. It has the dimension of a resistance, but is not a pure resistance (see 9.4.2).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 5
Neutral-Ground Mode

Standard Representative Waveforms and Levels for Maximum Voltage and Current Surges Inside Buildings for N-G Mode, Depending on Applicable Neutral Earthing or Bonding Practice^{††}

Neutral Grounding Practice	Distance From Entrance or Surge Source	System Exposure ^b	Applicable Surge			
			0.5 μ s–100 kHz		1.2/50 μ s–8/20 μ s	
			Peak Voltage (kV)	Effective Impedance (Ω) ^{**}	Peak Voltage (kV)	Effective Impedance (Ω) ^{**}
Neutral earthed at service entrance	Close	All	None	None	None	None
	Nearby	All	<i>1</i>	<i>30</i>	None	None
	Far	All	<i>3</i>	<i>40</i>	None	None
Neutral not earthed at service entrance	All	Low	<i>2</i>	<i>12</i>	<i>2</i>	<i>2</i>
	All	Medium	<i>4</i>	<i>12</i>	<i>4</i>	<i>2</i>
	All	High	<i>6</i>	<i>12</i>	<i>6</i>	<i>2</i>

[†]The values for peak voltage and effective impedance have been set in italic type to emphasize that there is no data base to support these values. Instead, these numbers and waveforms have been selected by consensus to provide uniformity in test procedures. Those values are not intended to be mandatory requirements.

^{††}Bonding the neutral to the equipment grounding conductor (protective earth) and to the building ground at the service entrance, or at a separately derived ac power source, effectively prevents the propagation of external surges in N-G mode. This situation, including that of the separately derived ac power source, corresponds to the requirement of ANSI/NFPA 70-1990 [2]. In such installations, N-G surges may still be generated by internal load switching or by mode conversion when surge currents flow in the inductance of the neutral or grounding conductors, or both (see *differential mode and common mode* in Appendix B5). The 100 kHz Ring Wave is an appropriate representation of inductive voltages in the wiring.

[‡]When the neutral is not bonded to the equipment grounding conductor (protective earth) nor to the building ground at the service entrance, N-G surges can be expected in a manner similar to those defined for the L-L, L-N, or L-G modes, as shown in Tables 3 and 4. This more severe situation will be encountered in installations not subject to ANSI/NFPA 70-1990 [2]. It is standard practice in some European countries (see *differential mode and common mode* in Appendix B5).

[§]See 7.3.3 for definition and discussion of system exposure.

^{**}The effective impedance of the surge source, emulated by the test generator, is defined as the ratio of the peak voltage to the peak current. It has the dimension of a resistance, but is not a pure resistance.

The recommendations of the present document address the need to make a deliberate choice, but leave the choice to the parties interested in the issues, who are presumed to have the best available knowledge of the particular situation. Because the system exposure levels may be different with respect to the source of the surges and hence the waveform, separate tables are provided for the Ring Wave and for the Combination Wave. For instance, an installation may be located in an area of high lightning activity but little switching activity (giving more weight to the Combination Wave), or vice versa.

Making such a choice, however, may be difficult. On the one hand, the nature and mission of the equipment have a strong influence on the choice. Some equipment is likely to be operated in a well-defined environment exposure and location category; others may be operated in a broad variety of exposures and

location categories. Furthermore, the consequence of a failure, and thus the selection of a degree of margin, are related to the mission of the equipment.

On the other hand, when dealing with mass-produced equipment, it would be impractical or unrealistic to tailor the equipment surge withstand specifications to a specific environment exposure and location category. In such cases, a selection must be made to cover the typical situation, not the extreme—unless life-support or similar stringent requirements mandate a conservative design.

9.3 Test Conditions

9.3.1 Powered Testing. During powered testing of equipment that is connected to the mains, it is necessary to interpose a back filter between the Equipment Under Test (EUT) and the mains and to use a coupling network between the surge generator and the EUT, as

described in IEEE C62.45-1987 [8]. The presence of the back filter and the coupling network, and the low impedance of the mains will alter the surge wave shape compared to that observed at the output terminals of the surge generator alone (Richman, 1985 [B78]).

When the intent of surge testing is to apply surges to the mains connection of the EUT while the equipment is operating, the effect of the back filter and the coupling network on the surge waveform have to be included when determining the surge wave shape. That is, the expression "open-circuit voltage" means that the EUT is not connected, but the surge coupler and back filter have to be. They are clearly parts of the surge generator, since they may affect the wave applied to the EUT.

9.3.2 Verification of the Test Generator. As a result of these effects, it is necessary that the surge waveform specifications for both the 0.5 μ s-100 kHz Ring Wave and the 1.2/50 μ s-8/20 μ s Combination Wave be satisfied accordingly. An initial verification should be made of the following conditions:

- (1) The surge generator is connected to the back filter via the coupling network in the relevant coupling mode, and
- (2) All of the conductors of the mains connection that supply the back filter, including protective ground, are disconnected from the mains and shorted together at a point upstream from the back filter.

By shorting the mains upstream from the back filter (prior to the actual powered test), the effects caused by differing impedances of the mains from one laboratory to another are avoided. Allowing the ac supply mains to be disconnected and simulating the low impedance of the mains by shorting the conductors together is the recommended procedure to determine peak voltage and current. The available short-circuit surge current and the open-circuit surge voltage (as defined above) at the EUT power line interface can be readily verified. Note, however, that this procedure establishes the voltage peak of the surge alone.

During testing of powered equipment or components, the surge waveform may be applied at any specified phase angle of the normal mains waveform, as described in IEEE C62.45-1987 [8]. The timing of the surge appli-

cation with respect to the power-frequency sine wave will then determine the peak of the total surge. Because this total surge is the significant parameter in the response and stress of a clamping type of surge-protective device, this effect must be recognized in setting the surge amplitudes for low-level surge testing. With surge levels in the kilovolt range, the variation introduced by the value of the sine-wave voltage at the instant of the surge application is less significant.

In tests where the value of di/dt is large (such as the 8/20 μ s current waveform or the 100 kHz Ring Wave with its relatively short rise time), it is particularly important to use short lengths of conductors and maintain minimum conductor loop area between the surge generator and the device under test.

9.3.3 Tolerances on the Most Important Parameter. The combination of practical tolerances on the surge generator internal components, operator settings, and instrument calibration uncertainties may produce significant variations in the results of tests performed at different sites. To reduce the effect of these unavoidable differences, the purpose of the test should be recognized when specifying the most important test parameter:

- (1) When testing insulation, the peak open-circuit voltage is the most important parameter. Therefore, the voltage should be adjusted to the desired level before connecting the EUT to the generator.
- (2) When testing energy-absorbing non-linear surge-protective devices, the short-circuit current peak is the most important parameter. However, the current flowing in the EUT should NOT be adjusted during the test to obtain a desired level.

The reason for point (2) is that the test should be performed using a generator with specified open-circuit voltage and specified short-circuit current waveforms. For the specific EUT being subjected to the specific surge environment test, the peak values of both the EUT voltage and EUT current during the test should be allowed to remain whatever they are. This matter is often misunderstood and, therefore, it cannot be overemphasized.

9.3.4 Unpowered Testing. When the 1.2/50 μ s-8/20 μ s Combination Wave is used to

test unenergized components, the same generator, with back filter in place, may still be used. However, the mains should be disconnected upstream from the back filter and all of the input power conductors shorted together and to ground.

Alternatively, the back filter and the coupling network may be removed from a surge generator that has an internal circuit to determine the presence or absence of a back filter/coupling network and to make the appropriate adjustments in the waveform. Such circuits are included in many commercially available surge generators.

9.4 Detailed Specifications of Waveforms

9.4.1 0.5 μ s–100 kHz Ring Wave. The open-circuit voltage waveform is defined by the following parameters:

Rise time: 0.5 μ s \pm 0.15 μ s

Ringing frequency: 100 kHz \pm 20 kHz

The amplitude will decay so that the amplitude ratio of adjacent peaks of opposite polarity is as follows: the ratio of the second peak to the first peak is between 40 and 110%. The ratio of the third peak to the second peak and of the fourth peak to the third peak is between 40 and 80%. A plot of the nominal 100 kHz Ring Wave is shown in Fig 11.

The rise time is defined as the time difference between the 10% and 90% amplitude points on the leading edge of the waveform. The frequency is calculated from the first and third zero-crossing after the initial peak.

The nominal amplitude of the first peak of either the open-circuit voltage, V_p , or the short-circuit current, I_p , is to be selected by the parties involved (see 9.2), according to the severity desired, with a tolerance of $\pm 10\%$.

The ratio V_p/I_p is specified as $12 \Omega \pm 3 \Omega$ for simulation of Location Category B environments or $30 \Omega \pm 8 \Omega$ for simulation of Location Category A environments. When the peak open-circuit voltage is adjusted to be exactly 5 kV, the nominal peak short-circuit current will be 500 A for Location Category B environments and 200 A for Location Category A environments. For lower peak voltages, the peak short-circuit current will be proportionately lower, so that the nominal ratio V_p/I_p remains either 12Ω or 30Ω .

No short-circuit current waveform is specified for the 100 kHz Ring Wave. A peak short-

circuit current, however, is proposed in 9.2, according to the location category. Because the purpose of this Ring Wave is not to provide high-energy stress to the equipment under test, the precise specification of the current waveform is unnecessary.

The short 0.5 μ s rise time of the leading edge of the waveform, together with a large peak current, corresponds to a large value of dI/dt , which will produce significant inductive effects in the connections of the devices under test. The voltage divider action of the surge generator impedance and the EUT impedance is likely to be significant; it is addressed by specifying the peak short-circuit current.

The first edition of this document specified a nominal rate of decay of amplitude of 60% between adjacent peaks of opposite polarity, but no tolerances were specified. It is not possible to obtain the 60% ratio of amplitude of the second to the first peak while also obtaining the 60% ratio between subsequent peaks with a simple damped cosine waveform (Standler, 1988 [B84]). As a result, the wave shape of the first cycle of the Ring Wave varied dramatically among different models of commercially available surge generators (Standler, 1989 [B86]) because different circuit designs of the wave-shaping network were used in an attempt to meet the specifications for the nominal waveform. When tolerances were added to this document, large tolerances were applied to the ratio of the first and second peaks so that a cosine waveform with an exponentially decaying amplitude would meet the requirements for the Ring Wave. Although existing generators are acceptable, it is recommended that new designs for 100 kHz Ring Wave generators use the damped cosine waveform described in 9.5. A plot of the nominal damped cosine waveform is shown in Fig 11.

There is no requirement set on the amplitude of the Ring Wave beyond the fourth peak. The amplitude of the fifth and following peaks is so much smaller than the initial peak that they should have little effect on even the most vulnerable or susceptible equipment.

The frequency of oscillation of this waveform may excite resonances in the EUT. However, this effect cannot be positively identified with the fixed-frequency Ring Wave; a swept-frequency test would be necessary for that purpose.

9.4.2 1.2/50-8/20 μ s Combination Wave.
The Combination Wave is delivered by a generator that can apply a 1.2/50 μ s voltage wave across an open circuit and an 8/20 μ s current wave into a short circuit. The exact waveform that is delivered is determined by the generator and the impedance to which the surge is applied. A plot of the nominal open-circuit voltage is shown in Fig 12 and a plot of the nominal short-circuit current is shown in Fig 13.

Open-circuit voltage waveform:
Front time: 1.2 μ s \pm 0.36 μ s
Duration: 50 μ s \pm 10 μ s

The front time for voltage waveforms is defined (IEC 60-2 (1973) (B92); IEEE Std 4-1978 (B88)) as:

$$1.67 (t_{90} - t_{30}) \quad \text{(Eq 1)}$$

where

t_{90} and t_{30} = The times of the 90% and 30% amplitude points on the leading edge of the waveform

The duration is defined as the time between virtual origin and the time of the 50% point on the tail. The virtual origin is the point where a straight line between the 30% and 90% points on the leading edge of the waveform intersects the $V = 0$ line.

Short-circuit current waveform:

Front time: 8 μ s (+1.0, -2.5) μ s
Duration: 20 μ s (+8, -4) μ s

The front time for current waveforms is defined (IEC 60-2 (1973) (B92); IEEE Std 4-1978 (B88)) as:

$$1.25 (t_{90} - t_{10}) \quad \text{(Eq 2)}$$

where

t_{90} and t_{10} = The times of the 90% and 10% amplitude points on the leading edge of the waveform

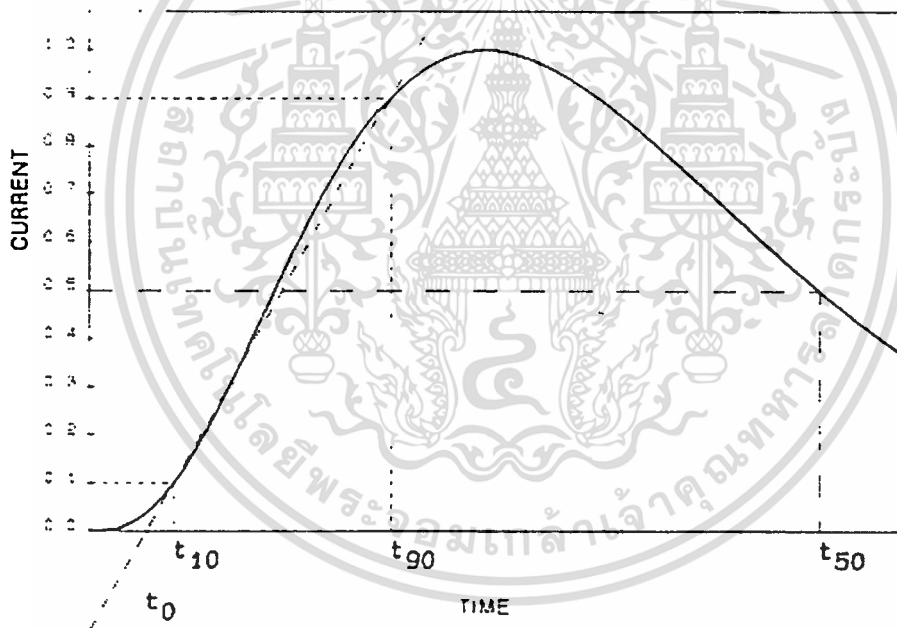


Fig 14
Features of the Nominal 8/20 μ s Waveform: Front Time, Virtual Origin, and Duration

LOW-VOLTAGE AC POWER CIRCUITS

Duration is defined as the time between virtual origin and the time of the 50% amplitude point on the tail. The virtual origin is the time that a straight line between the 10% and 90% amplitude points on the leading edge of the waveform intersects the $I = 0$ line. Fig 14 shows these features of the nominal 8/20 μ s waveform.

The value of either the peak open-circuit voltage, V_p , or the peak short-circuit current, I_p , is to be selected by the parties involved, according to the severity desired, with a tolerance of $\pm 10\%$.

The effective source impedance, the ratio V_p/I_p , is specified as $2.0 \Omega \pm 0.25 \Omega$. This ratio determines the behavior of the waveform when various loads, such as surge-protective devices, are connected to the generator.

Traditionally, the 1.2/50 μ s voltage waveform was used for testing the basic impulse level (BIL) of insulation, which is approximately an open circuit until the insulation fails. The 8/20 μ s current waveform was used to inject large currents into surge-protective

devices. Since both the open-circuit voltage and short-circuit current are different aspects of the same phenomenon, such as an over-stress caused by lightning, it is necessary to combine them into a single waveform when the load is not known in advance (Richman, 1983 [B80]; Wiesinger, 1983 [B87]).

The tolerances for the 8/20 μ s current waveform are broader than those in IEC 60-2 (1973) [B92] and IEEE Std 4-1978 [B88]. The tolerances in those standards are for an 8/20 μ s current waveform without specifying the open-circuit voltage. These other standards also do not include the effects of a back filter and a coupling network, as required here.

9.5 Equations for Standard Waveforms. Mathematical representations of the nominal waveforms are given in Table 6. These equations, and the value of the time constants, are useful for designing surge generators and for simulations of surge performance on digital computers (Standler, 1988 [B84]).

Table 6
Equations for Standard Surge-Test Waveforms

0.5 μ s-100 kHz Ring Wave	
$V(t) = A V_p \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \cos(\omega t)$	
where	
$\tau_1 =$	0.533 μ s
$\tau_2 =$	9.788 μ s
$\omega =$	$2 \pi \cdot 10^5$ rad/s
$A =$	1.690
8/20 μ s Waveform	
$I(t) = A I_p t^2 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$	
where	
$\tau =$	3.911 μ s
$A =$	0.01243 (μ s) ⁻³
1.2/50 μ s Waveform	
$V(t) = A V_p \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$	
where	
$\tau_1 =$	0.407 μ s
$\tau_2 =$	64.22 μ s
$A =$	1.537

NOTE: In all the equations above:

t = Time

V_p = Maximum or peak value of the open-circuit voltage

I_p = Peak value of the short-circuit current

A test waveform in the laboratory will, of course, not exactly match the waveform given by the equations for the nominal waveform due to the tolerances of components in pulse forming networks and parasitic inductances and capacitances in the components of both generators and test fixtures.

The loading by the EUT may cause appreciable discrepancy between the preset nominal open-circuit voltage or short-circuit current and the actual voltage across or current in the load.

This effect is the reason why surge waveform parameters are not specified with the EUT connected. In computer simulations, some of the loading effects can be taken into account by including the effective output impedance, V_p/I_p , with the ideal voltage or current source.

10. Definition of Additional Surge-Testing Waveforms

The three additional waveforms are the EFT burst, the unidirectional 10/1000 μ s wave, and the 5 kHz Ring Wave. Each of these waveforms has a unique domain of application (contactor interference, fuse operation, and capacitor switching). Consequently, the waveform definition, the amplitude selection, and the test procedures are discussed separately for each waveform in 10.1, 10.2, and 10.3. Plots of the nominal waveforms are shown in Figs 15-18. The suggested peak voltages and source impedances that correspond to various environmental exposures are shown in Tables 7, 8, and 9.

10.1 The Electrical Fast Transient (EFT).

This waveform consists of repetitive bursts, with each burst containing individual unidirectional pulses. As discussed in 7.4.4, this waveform has been proposed as a method for evaluating the immunity of equipment against interference; it is not a "representation" of the surge environment. The amplitude levels proposed for the various degrees of severity have been set by consensus as representing a realistic stress for the typical equipment exposed to the test. They should not be construed as actual voltage levels occurring in the mains.

The characteristics of this waveform and the corresponding test procedures are summarized in the following paragraphs, based on the

specifications of IEC 801-4 (1988) [5] (see *EFT Test* in Appendix B6 for details). However, readers are cautioned that IEC documents are subject to periodic revision. Therefore, any detailed plan for specific tests calling for the EFT should be based on the current version of the IEC document, not on the description provided herein.

10.1.1 Waveform Definition. The individual EFT pulses in a burst are defined as

Rise time: $5 \text{ ns} \pm 1.5 \text{ ns}$

Duration: $50 \text{ ns} \pm 15 \text{ ns}$

The rise time is defined as the time difference between the 10% and 90% amplitude points on the leading edge of the waveform.

The duration is defined as the full width at half-maximum (FWHM), that is, the time difference between the 50% amplitude points on the leading and trailing edge of each individual pulse.

Individual pulses occur in bursts with a duration of $15 \text{ ms} \pm 3 \text{ ms}$. Within each burst, the repetition rate of pulses is specified as a function of the peak open-circuit voltage:

For peaks $\leq 2 \text{ kV}$: $5 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$

For peaks $> 2 \text{ kV}$: $2.5 \text{ kHz} \pm 0.5 \text{ kHz}$

(These two values of the repetition rate are specified in IEC 801-4 (1988) [5] and only reflect limitations in inherent performance of pulse generators, not characteristics of the environment.)

The period of the repeated bursts is $300 \text{ ms} \pm 60 \text{ ms}$. A plot of a single pulse is shown in Fig 15 and the burst pattern is shown in Fig 16.

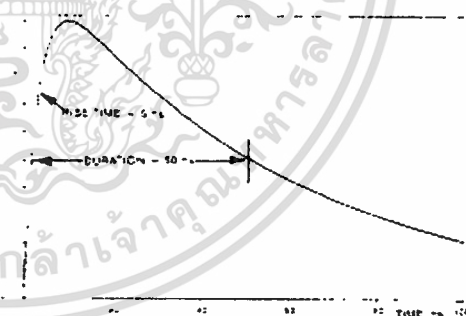
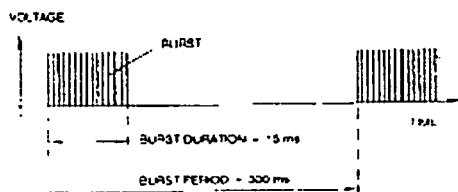


Fig 15
Waveform of the EFT Pulse

Table 7
Levels for EFT Burst

Test Severity	Peak Voltage (Open-Circuit)
I	1 kV
II	2 kV
III	4 kV

Fig 16
Pattern of EFT Bursts

10.1.2 Amplitude. The amplitude of the EFT pulses is specified by IEC 801-4 (1988) [5] as an open-circuit test voltage, while the waveform is defined when the generator is connected to a 50 Ω load. The generator is also defined as having a 50 Ω source impedance between 1 MHz and 100 MHz.

The resulting current, when the pulses are applied to the EUT according to the methods described in 10.1.3, is not defined since it will depend on the impedance exhibited by the EUT at the frequencies associated with the EFT waveform. Because the purpose of the test is to evaluate interference immunity, not energy capability, the specification of a current amplitude is not essential. Given this definition of the test level, the specific value should be selected by the parties involved, according to the severity desired, with a tolerance of $\pm 10\%$.

In IEC 801-4 (1988) [5], five test-severity levels are specified, from 0.5 kV to 4 kV open circuit, with provision of an additional, special level open to negotiations. In keeping with the approach taken in the present recommended practice, only three levels, I, II, and III, are shown in Table 7. Because the additional waveforms described in the present document are only suggestions, there is always the implicit provision that other levels may be negotiated.

10.1.3 Test Procedures. The coupling methods for the EFT test are specified in IEC 801-4 (1988) [5], from which the essential characteristics are cited in the following. Two coupling methods are specified, depending on the nature of the EUT interface cable. (See *EFT Test* in Appendix B6 for more details).

One method in particular, for single and polyphase ac interface, uses direct coupling to each of the cable conductors selected by discrete capacitors. The other method uses a "coupling clamp" that in fact also produces capacitive coupling to the interface cable on which the clamp is installed, in a global coupling mode.

Thus, both coupling methods result in having a capacitive divider (coupling capacitor and internal capacitance of the EUT) that applies the pulses at the port of the EUT (Martzloff and Leedy, 1990 [B47]). The actual value of the pulse applied at the EUT port is influenced by the internal design of the EUT; it is not a fixed parameter imposed on the EUT. Even the external arrangement of the EUT, including cable dressing and enclosure position with respect to the reference ground plane, will affect the capacitive coupling. The configuration of the test set-up, therefore, has to be clearly specified and documented.

10.2 The 10/1000 μ s Wave

10.2.1 Waveform Definition. The front time and duration, as defined in 9.4.2, are the following:

Open-circuit voltage:

Front time: 10 μ s (+0, -5) μ s

Duration: 1000 μ s (+1000, -0) μ s

Short-circuit current:

Front time: 10 μ s (+0, -5) μ s

Duration: 1000 μ s \pm 200 μ s

Some ambiguity exists in the definitions of this waveform given in other references, depending on the interpretation of the 10 μ s "front" specification (Standler, 1988 [B84]). Because the major purpose of this waveform, in the present context, is to provide an energy stress, the difference between the rise time, time to peak, or front time is negligible. A plot of the nominal current is shown in Fig 17.

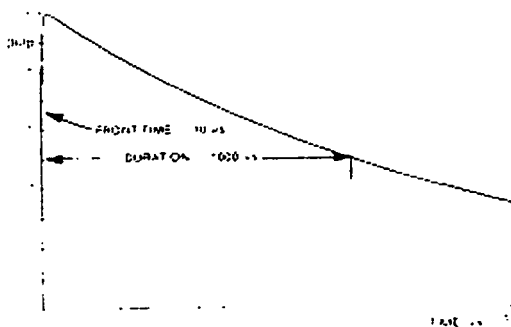


Fig 17

Waveform for the 10/1000 μ s Current Surge

10.2.2 Amplitude. There is a major difference in the application of this waveform compared to that of the two standard waveforms: the concept of Location Categories that was used for the standard waveforms is no longer applicable. (That concept is based on the limiting effect of the inductance of branch circuits at the frequencies associated with the two standard pulses, presumed to have a decreasing severity as distance from the service entrance increases.)

The long duration of the 10/1000 μ s waveform reduces the effect of inductance. However, depending on the environment exposure of the site, there is still a range of levels to be considered. Therefore, the values shown in Table 8 for the three system-exposure levels are applicable to all location categories.

The amplitude of the peak open-circuit voltage is to be selected by the parties involved according to the severity desired, with a tolerance of $\pm 10\%$.

The corresponding ratios of the peak open-circuit voltage to the peak short-circuit current, V_p/I_p , are shown in Table 8.

10.2.3 Test Procedures. IEEE C62.45-1987 [8] advises that powered testing of equipment is preferred, a method that is further recommended in the present document for the standard waveforms. However, the 10/1000 μ s test waveform is suggested primarily for its high-energy characteristic, stressing any surge-protective device that an EUT may contain.

The long duration of the wave makes a conventional back filter difficult to implement.

Three strategies may be applied to resolve this difficulty. The first would be to perform tests on unpowered equipment for the sole purpose of assessing the capability of the EUT for handling the energy associated with this waveform. If such a strategy were adopted, the amplitude of the applied surge should be that defined as V_{total} in the first footnote of Table 8, not the value of surge alone, in order to raise the voltage level to the equivalent stress.

However, the outcome of such a test does not address the concerns, discussed in IEEE C62.45-1987 [8], such as pre-surge stress, failure modes, or the need to have the EUT operational. Therefore, except when testing simple components—and fully recognizing the limitations—it is not the recommended approach.

The second strategy is based on the test method that has been proposed in a VDE¹⁰ standard [B94] that calls for application of a surge obtained by discharging a large capacitor into the EUT at the peak of the mains voltage. The exact parameters of the test circuit have been modified since the first publication of the VDE standard and may be modified again. Therefore, in spite of the strong desirability of harmonization, firm specifications for this approach cannot be defined in the present context. A brief overview and discussion of this procedure is provided under *VDE 0160 high-energy test* in Appendix B24.

The third strategy is to obtain the complete waveform (power frequency before and after the surge, as well as total surge) from a digital waveform generator, with amplification by a high-power linear amplifier. This method requires that the amplifier be capable of delivering either voltage or current peaks during the surge (depending upon the EUT impedance, in a manner similar to the standard Combination Wave), as well as the normal load current of the EUT. This strategy would be a radical departure from the classical method of using the discharge of stored energy. It would offer the advantage, once the resource of such a system becomes available to a user, of making other test waveforms easy to implement.

¹⁰VDE = Verband Deutscher Elektrotechniker e.V. IEC recommendations for immunity tests, still under development, may incorporate this procedure in future documents (Mortzloff, 1990 [B73]).

Table 8
Levels for the Additional 10/100 μ s Waveform

Exposure	Surge Voltage Peak*	Source Impedance†‡
Low (residential)	None	
Medium (commercial)	$1.0 U_{ph}$	1.0 Ω
High (industrial)	$1.3 U_{ph}$	0.25 Ω

*The surge voltage peak is proportional to the system peak voltage, U_{ph} . The values shown in this column are those of the surges alone, to be added to whatever the value of the mains voltage is for the phase angle at which the surge is applied.

†For instance, the peak total voltage applied to a piece of equipment at the end of a long cable, upon clearing of a fault by a fuse and occurring near the peak of the power-frequency sine wave, would be, for a 120 V rms L-N system and for the high exposure level:

$$V_{total} = 170 V_{(mains\ wave)} + 1.3 \times 170 V_{(surge\ alone)} = 390 V$$

‡The data base does not provide sufficient information to set an impedance value. The values shown in this table have been set by consensus as a reasonable value to provide guidance and uniformity in test procedures.

§The effective impedance of the surge source, emulated by the test generator, is defined as the ratio of the peak voltage to the peak current. It has the dimension of a resistance, but is not a pure resistance.

10.3 The 5 kHz Ring Wave

10.3.1 Waveform Definition. This waveform is defined only by its open-circuit voltage parameters:

Rise time: $1.5 \mu s \pm 0.5 \mu s$

Ring frequency: 5 kHz \pm 1 kHz

Ratio of adjacent peaks of opposite polarity: 60% to 80%

The rise time is defined as the time difference between the 10% and 90% amplitude points on the leading edge of the first peak of the waveform. The frequency is to be calculated from the first and third zero crossing after the initial peak. A plot of the nominal waveform is shown in Fig 18.

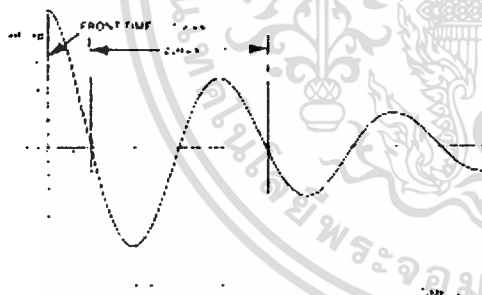


Fig 18
Waveform for 5 kHz Ring Wave

10.3.2 Amplitude. There is a major difference in the application of this waveform compared to that of the two standard waveforms: the concept of Location Categories that was used for the standard waveforms is no longer applicable. (That concept is based on the limiting effect of the inductance of branch circuits at the frequencies associated with the two standard surge test waves, which causes the amplitude of the current to decrease as distance from the source of the surge increases.)

The branch circuit inductance has a negligible effect on the propagation of this 5 kHz Ring Wave. However, there is still a range of exposure levels to be considered, depending on the system exposure of the site. Therefore, the values shown in Table 9 are applicable to all locations categories.

The effective source impedance for the test generator—the ratio of the peak open-circuit voltage to short-circuit current, V_p/I_p —is specified as $5 \Omega \pm 2 \Omega$.

The nominal amplitude of the first peak of the open-circuit voltage is to be selected by the parties involved, according to the severity desired, with a tolerance of $\pm 10\%$. This peak surge voltage is proportional to the peak of the mains voltage. The source impedance, however, should take into consideration the rating of the system elements involved in generating the switching transient. Each particular case of installation will have its own characteristics: type of switching device, system inductance, grounding, kVAR size of the bank, and how often this bank is switched.

Table 9
Levels for the Additional 5 kHz Ring Wave

Exposure	Surge Voltage Peak*	Source Impedance†
Low (far from switched banks)	None	
Medium	1.0 U_{ph}	1 to 5 Ω
High (near large switched banks)	1.8 U_{ph}	0.5 to 1 Ω

*The surge voltage peak is proportional to the system peak voltage, U_{ph} . The values shown in this column are those of the surges alone, to be added to whatever the value of the mains voltage is for the phase angle at which the surge is applied.

For instance, the peak total voltage applied to a piece of equipment in the case of a restrike occurring near the peak of the power-frequency sine wave during a capacitor switching operation would be, for a 120 V rms system and for the high exposure level:

$$V_{total} = 170 V_{(zero-voltage)} + 1.8 \times 170 V_{(surge-impulse)} = 476 V$$

†The data base does not provide sufficient information to set an impedance value. The values shown in this table have been set by consensus as a reasonable value to provide guidance and uniformity in test procedures. See under *switching surges* in Appendix B for further discussion of the parameters.

10.3.3 Test Procedures. The 5 kHz Ring Wave is defined so that it can be applied to the mains connection of the equipment while the equipment is operating. For this type of test, it is necessary to interpose a back filter between the EUT and the mains, and to use a coupling network between the surge generator and the EUT, as described in IEEE C62.45-1987 [8].

The presence of the back filter and the coupling network, and the low impedance of the mains, may alter the surge wave shape compared to that observed at the output terminals of the surge generator alone.

When the intent of surge testing is to apply surges to the mains connection of the EUT while the equipment is operating, the effect of the back filter and the coupling network on the surge waveform must be included when determining the surge wave shape. That is, the expression "open-circuit voltage" means that the EUT is not connected, but the surge coupler and back filter have to be connected. These two elements are parts of the surge generator system, since they may affect the wave applied to the EUT.

It is therefore recommended that the surge waveform specifications for the 5 kHz Ring Wave be satisfied prior to the test of the EUT when:

- (1) The surge generator is connected to the back filter via the coupling network in the relevant coupling mode, and
- (2) All of the conductors of the mains connection, including protective ground,

are temporarily disconnected from the mains and shorted together at a point upstream from the back filter.

By shorting the mains upstream from the back filter (prior to the actual powered test), the effects caused by differing impedances of the mains from one laboratory to another are avoided. Allowing the ac supply mains to be disconnected and simulating the low impedance of the mains by shorting the conductors together is the recommended procedure to determine peak voltage and current. In this manner, the available short-circuit surge current and the open-circuit surge voltage (as defined above) at the EUT power line interface can be readily verified. Note, however, that this procedure establishes the voltage peak of the surge alone. The timing of the surge application with respect to the power-frequency sine wave will then determine the peak of the total surge, which is the significant parameter in the response and stress of a clamping surge-protective device.

10.4 Equations for Additional Waveforms. Mathematical representations of the nominal waveforms are given in Table 10. These equations, and the value of the time constants, are useful for designing surge generators and for simulations of surge performance on digital computers (Standler, 1983 [B84]).

A test waveform in the laboratory will, of course, not exactly match the waveform given by the equations for the nominal waveform

due to the tolerances of components in pulse-forming networks and parasitic inductances and capacitances in the components of both generators and test fixtures.

The loading by the EUT may cause appreciable discrepancy between the preset nominal open-circuit voltage or short-circuit current and the actual voltage across or current in

the load.

This effect is the reason why surge waveform parameters are not specified with the EUT connected. In computer simulations, some of the loading effects can be taken into account by including the effective output impedance, V_p/I_p , with the ideal voltage or current source.

Table 10
Equations for Additional Surge-Test Waveforms

10/1000 μ s Waveform
$E(t) = A I_p \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_1} \right) \right) \exp \left(-\frac{t}{\tau_2} \right)$
where $\tau_1 = 3.827 \mu$ $\tau_2 = 1.464 \mu$ $A = 1.019$
5 kHz Ring Wave
$V(t) = A V_p \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_1} \right) \right) \exp \left(-\frac{t}{\tau_2} \right) \cos(\omega t)$
where $\tau_1 = 0.7356 \mu$ $\tau_2 = 280.4 \mu$ $\omega = \pi \times 10^4 \text{ rad s}^{-1}$ $A = 1.027$
EFT Waveform
$V(t) = A V_p \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_1} \right) \right) \exp \left(-\frac{t}{\tau_2} \right)$
where $\tau_1 = 3.5 \text{ ns}$ $\tau_2 = 55.6 \text{ ns}$ $A = 1.270$

NOTE: In all the equations above:

- t = Time
- V_p = Maximum or peak value of the open-circuit voltage
- I_p = Peak value of the nominal short-circuit current

ภาคผนวก ก.
ผลงานที่ตีพิมพ์

1. สุรพล บุญจันทร์ สนธยา เมืองน้อย กอบชัย เฉลียว “ผลลัพธ์การเทียบแบบเชิงเลขของระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำ” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 หน้า 66-71 มิถุนายน 2544



ประวัติผู้เขียน

นายสุรพล บุญจันทร์ เกิดเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2509 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษา
 อดุสาหกรรมศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม จากภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรม
 ศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536 ปัจจุบันทำงาน
 อยู่ในตำแหน่งอาจารย์ระดับ 6 ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
 คุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้