

ระบบป้องกัน SURGE สำหรับอาคาร

SURGE PROTECTION SYSTEM FOR BUILDING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานที่ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-938-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบป้องกัน SURGE สำหรับอาคาร

SURGE PROTECTION SYSTEM FOR BUILDING



สถานยา เมืองน้อย  
SONTAYA MUANGNOI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ.ศ.2543

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 38531

ISBN 974-622-938-9

วัน, เดือน, ปี..... 5 ส.ค. 2544

# **SURGE PROTECTION SYSTEM FOR BUILDING**



**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**

**2000**

**ISBN 974-622-938-9**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2000**

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**



|                             |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | ระบบป้องกัน SURGE สำหรับอาคาร |
| นักศึกษา                    | นายสนธยา เมื่อน้อย            |
| รหัสประจำตัว                | 41061100                      |
| ปริญญา                      | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต        |
| สาขาวิชา                    | วิศวกรรมไฟฟ้า                 |
| พ.ศ.                        | 2543                          |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ           |

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอผลการป้องกันเล็รจจากวงจรไฟฟ้าภายในอาคารในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำ โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของ Metal oxide varistor ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์ขจัดเล็รจ จำลองการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเล็รจที่ Service entrance และ Load มีระยะห่างในการติดตั้งเท่ากับ 5, 10 และ 20 เมตร เปรียบเทียบกัน พิจารณาใช้รูปคลื่นทดสอบมาตรฐาน 8/20  $\mu$ s 3 kA ตาม IEEE C62.41-1991 และรูปคลื่นจำลองกระแสฟ้าผ่า 10/350  $\mu$ s 20 kA มาเป็นรูปคลื่นเล็รจในการจำลองผล ทำการเลียนแบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice ในรูปของกระแสและพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเล็รจ ผลลัพธ์การเลียนแบบแสดงให้เห็นถึงการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเล็รจทั้ง 2 จุด ก่อให้เกิดการป้องกันที่ดีที่สุด และควรเลือกใช้อุปกรณ์ขจัดเล็รจที่ Service entrance ให้มีแรงดันในการนำต่ำกว่าที่ Load ซึ่งจะให้มีค่า Electromagnetic Compatibility ภายในอาคารดีขึ้น รวมทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายของตัวอุปกรณ์ขจัดเล็รจลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                       |                                      |
|-----------------------|--------------------------------------|
| <b>Thesis Title</b>   | Surge Protection System for Building |
| <b>Student</b>        | Mr.Sontaya Muangnoi                  |
| <b>Student ID.</b>    | 41061100                             |
| <b>Degree</b>         | Master of Engineering                |
| <b>Programme</b>      | Electrical Engineering               |
| <b>Year</b>           | 2000                                 |
| <b>Thesis Advisor</b> | Assoc.Prof.Dr.Kobchai Dejhan         |

## ABSTRACT

This paper proposes a surge protection inside building at low-voltage AC power circuit by using coordination of metal oxide varistor as surge suppressor, which are applied at service entrance and load for transmission line length at each point is 5, 10 and 20 metres. Two different surge waveforms, 8/20  $\mu$ s standard waveform as IEEE C62.41 and 10/350  $\mu$ s as a direct lightning strokes waveform, are used for this simulation. The current and energy handling capability result from PSpice simulation and the best load protection is achieved with surge suppressor in all locations. It is better to design surge suppressor at service entrance with smaller conduction voltage than one at load in order to obtain the better electromagnetic compatibility for the lower cost.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.กอบชัย เศษหาญ และรศ.สมยศ จุณณะปิยะ ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมการวิจัยรวมทั้ง อ.สุรพล บุญจันทร์ ที่กรุณาให้แนวความคิดและคำปรึกษาแนะนำในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการแก้ปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณไพบูรณ์ คู่ประกาย คุณกฤษณ์ อ่างแก้ว คุณพิพัฒน์ ตราเกียรติกุล คุณปรีญา เรื่องศิริไพศาล ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์เพื่อน ๆ น้อง ๆ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สนธยา เมืองน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

|  |      |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | III  |
| สารบัญ.....  | IV   |
| สารบัญตาราง.....   | VII  |
| สารบัญภาพ.....   | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                          | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....                                 | 1    |
| 1.3 แนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....                                  | 1    |
| บทที่ 2 เสรีจ.....   | 3    |
| 2.1 สาเหตุการเกิดเสรีจ.....                                      | 3    |
| 2.2 ความเสียหายจากเสรีจ.....                                     | 5    |
| 2.3 อัตราการเกิดเสรีจและระดับแรงดันในวงจรที่ไม่มีการป้องกัน..... | 5    |
| 2.3.1 อัตราการเกิดและระดับแรงดันเสรีจ.....                       | 5    |
| 2.3.2 ระดับเครื่องห่อหุ้ม.....                                   | 6    |
| 2.3.3 ลักษณะของรูปคลื่น.....                                     | 7    |
| 2.4 ประเภทที่ตั้ง.....   | 9    |
| บทที่ 3 การป้องกันเสรีจ.....                                     | 12   |
| 3.1 หลักการป้องกันเสรีจ.....                                     | 12   |
| 3.2 ทฤษฎีการทำงานของวาริสเตอร์.....                              | 13   |
| 3.2.1 บทนำ.....  | 13   |
| 3.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ.....                                    | 14   |
| 3.2.3 โครงสร้างขนาดเล็กของวาริสเตอร์.....                        | 15   |
| 3.2.4 ทฤษฎีการทำงาน.....   | 16   |
| 3.2.5 โครงสร้างของวาริสเตอร์.....                                | 18   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่าผิดกฎหมายและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|   |    |
|---|----|
| 3.2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้า .....   | 20 |
| 3.3 รูปคลื่นที่ใช้ในการทดสอบ.....   | 25 |
| 3.3.1 รูปคลื่นทดสอบมาตรฐาน.....   | 25 |
| 3.3.2 รูปคลื่นทดสอบเสริม.....   | 31 |
| <br>  |    |
| บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์เชิงเลข .....   | 36 |
| 4.1 การเลียนแบบการทำงาน.....  | 36 |
| 4.2 ผลลัพธ์การเลียนแบบเชิงเลข.....  | 41 |
| 4.2.1 ผลของตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ.....                          | 41 |
| 4.2.1.1 การป้องกันเสิร์จจากภายนอก จำลองด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA.....    | 41 |
| 4.2.1.2 การป้องกันเสิร์จจากภายนอก จำลองด้วยรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA..... | 44 |
| 4.2.1.3 การป้องกันเสิร์จจากภายใน จำลองด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA.....     | 47 |
| 4.2.2 ผลของระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service Entrance และ Load.....  | 50 |
| 4.2.2.1 ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่เพิ่มขึ้น                           |    |
| ทำให้การป้องกันระบบดีขึ้น ที่รูปคลื่นเสิร์จ 8/20 $\mu$ s 3 kA.....            | 50 |
| 4.2.2.2 ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่เพิ่มขึ้น                           |    |
| ทำให้การป้องกันระบบดีขึ้น ที่รูปคลื่นเสิร์จ 10/350 $\mu$ s 20 kA.....         | 57 |
| 4.2.3 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ.....                                | 64 |
| 4.2.3.1 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จแบบ Low-High                       |    |
| ทำให้การป้องกันระบบดีที่สุดที่รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA.....                 | 64 |
| 4.2.3.2 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จแบบ Low-High                       |    |
| ทำให้การป้องกันระบบดีที่สุดที่รูปคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA.....              | 71 |
| <br>  |    |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์.....   | 78 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
เอกสารอ้างอิง.....80  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|  |     |
|--|-----|
| ภาคผนวก.....                           | 81  |
| ก. ข้อมูลเชิงสถิติของการเกิดเสริม..... | 82  |
| ข. โปรแกรมการเปลี่ยนแปลงการทำงาน.....  | 90  |
| ค. การเผยแพร่งานวิจัย.....             | 100 |
| ประวัติผู้เขียน.....                   | 102 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.1 ตารางเปรียบเทียบหลักการป้องกัน.....  | 12   |
| 3.2 ขนาดทั่วไปของวาริสเตอร์.....   | 16   |
| 3.3 รูปคลื่นทดสอบมาตรฐานและรูปคลื่นทดสอบเสริมสำหรับตำแหน่งที่ตั้งต่าง ๆ.....   | 25   |
| 3.4 แรงดันและกระแสเล็รั้งที่ที่ตั้งประเภทต่างๆ ของรูปคลื่นมาตรฐาน 0.5 $\mu$ s -100 kHz.....  | 26   |
| 3.5 แสดงค่าแรงดันและกระแสเล็รั้งที่ที่ตั้งประเภทต่างๆ ของรูปคลื่นมาตรฐาน<br>1.2/50 $\mu$ s - 8/20 $\mu$ s Combination wave.....  | 29   |
| 3.6 ระดับของเบิรสต์ EFT.....   | 32   |
| 3.7 ระดับแรงดันของรูปคลื่น 10/1000 $\mu$ s.....  | 33   |
| 3.8 ระดับแรงดันของรูปคลื่น 10/1000 $\mu$ s.....  | 35   |
| 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ขจัดเล็รั้ง.....   | 37   |
| 4.2 เงื่อนไขการติดตั้งอุปกรณ์ ขจัดเล็รั้ง.....   | 38   |
| 4.3 เงื่อนไขของระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเล็รั้ง.....   | 39   |
| 4.4 เงื่อนไขของการใช้อุปกรณ์ ขจัดเล็รั้งในการทำงานร่วมกัน.....   | 40   |
| 4.5 ผลการเล็ยนแบบด้วยคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA แสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุด<br>และพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเล็รั้งที่ระยะการติดตั้ง 5 10 และ 20 เมตร<br>เมื่อมีแหล่งกำเนิดเล็รั้งจากภายนอก.....    | 41   |
| 4.6 ผลการเล็ยนแบบด้วยคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA แสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุด<br>และพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเล็รั้งที่ระยะการติดตั้ง 5 10 และ 20 เมตร<br>เมื่อมีแหล่งกำเนิดเล็รั้งจากภายนอก..... | 44   |
| 4.7 ผลการเล็ยนแบบด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA แสดงในรูปของกระแสไฟฟ้า<br>และพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเล็รั้งที่ระยะการติดตั้ง 20 เมตร<br>เมื่อมีแหล่งกำเนิดเล็รั้งจากภายใน.....                 | 47   |
| 4.8 ผลการเล็ยนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และload<br>ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 เมตร ด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA.....   | 50   |
| 4.9 ผลการเล็ยนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และ load<br>ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 10 เมตร ด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA.....   | 51   |
| 4.10 ผลการเล็ยนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และload<br>ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร ด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA.....   | 51   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.11 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และ load ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 เมตร ด้วยรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA.....                             | 57   |
| 4.12 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และ load ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 10 เมตร ด้วยรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA.....                            | 58   |
| 4.13 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และ load ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร ด้วยรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA.....                            | 58   |
| 4.14 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้ง อุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 5 เมตร.....     | 64   |
| 4.15 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้ง อุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 10 เมตร.....    | 65   |
| 4.16 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้ง อุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 20 เมตร.....    | 65   |
| 4.17 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้ง อุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 5 เมตร.....  | 71   |
| 4.18 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้ง อุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 10 เมตร..... | 72   |
| 4.19 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้ง อุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 20 เมตร..... | 72   |
| ก.1 การบันทึกจำนวนเสิร์จที่มีค่ามากกว่า 1200 โวลต์.....  | 85   |
| ก.2 จำนวนบ้านในสถานที่ที่สำรวจที่เกิดเสิร์จมากกว่า 1200 โวลต์.....   | 86   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 การเชื่อมต่อโดยการเหนี่ยวนำ.....   | 3    |
| 2.2 การเชื่อมต่อโดยความจุ.....   | 4    |
| 2.3 การเชื่อมต่อโดยความต้านทาน.....  | 4    |
| 2.4 แสดงอัตราการเกิดเสิร์จกับระดับแรงดัน ในสถานที่ที่ไม่มีการป้องกัน.....                        | 5    |
| 2.5 แสดง Isokeraunic map.....  | 7    |
| 2.6 ประเภทของสถานที่ตั้ง.....  | 10   |
| 3.1 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ.....  | 13   |
| 3.2 คุณลักษณะ V/I ของวาริสเตอร์.....   | 14   |
| 3.3 โครงสร้างขนาดเล็กของเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์.....  | 15   |
| 3.4 พฤติกรรมของค่าความจุไฟฟ้าต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของวาริสเตอร์.....                                 | 17   |
| 3.5 แถบพลังงานสำหรับเกรนของ ZnO ที่มีขอบเขตติดกับรอยต่อ ZnO.....                                 | 17   |
| 3.6 แบริเยจความร้อนกับฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้.....                                      | 18   |
| 3.7 กระบวนการผลิตของวาริสเตอร์.....  | 19   |
| 3.8 รูปร่างของวาริสเตอร์.....  | 20   |
| 3.9 คุณลักษณะของกราฟ V-I ในรูปมาตราส่วนของ log-log.....  | 20   |
| 3.10 แบบจำลองทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์.....  | 21   |
| 3.11 วงจรเสมือนที่ระดับกระแสมีค่าต่ำ.....  | 21   |
| 3.12 ผลกระทบของอุณหภูมิในพื้นที่ leakage.....  | 22   |
| 3.13 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (dv/dT) ต่อกระแส.....  | 23   |
| 3.14 วงจรเสมือนที่การนำของวาริสเตอร์.....  | 23   |
| 3.15 ค่าความต้านทาน static ( $R_s$ ) กับกระแส.....   | 24   |
| 3.16 ค่าความต้านทาน dynamic ( $Z_d$ ) กับกระแส.....  | 24   |
| 3.17 วงจรเสมือนที่การ upturn ของวาริสเตอร์.....  | 25   |
| 3.18 แสดงรูปคลื่น 0.5 $\mu$ s-100 kHz Ring wave.....   | 26   |
| 3.19 แสดงรูปคลื่นรวมของแรงดันเปิดวงจร 1.2/50 $\mu$ s.....  | 28   |
| 3.20 แสดงรูปคลื่นรวมของกระแสลัดวงจร 8/20 $\mu$ s.....  | 28   |
| 3.21 แสดงลักษณะของรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s(เวลาหน้าคลื่น จุดเริ่มต้นที่แท้จริงและช่วงระยะเวลา)..... | 29   |
| 3.22 แสดงคลื่นเบิร์ต EFT.....  | 31   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.23 แสดงรูปคลื่น 10/1000 $\mu$ s.....  | 33   |
| 3.24 แสดงรูปคลื่นของ 5 kHz Ring wave.....   | 34   |
| 4.1 รูปจำลองวงจรในการแสดงผล.....  | 36   |
| 4.2 วงจรจำลองอย่างง่ายเมื่อมีเสิร์จจากภายนอก.....   | 38   |
| 4.3 วงจรจำลองอย่างง่ายเมื่อมีเสิร์จจากภายใน.....  | 38   |
| 4.4 วงจรในการจำลองผลสำหรับเสิร์จจากภายใน.....   | 39   |
| (a) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance และ 50 $\Omega$ (กรณีที่ 1).....  | 42   |
| (b) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance ที่โหลดและ 50 $\Omega$ (กรณีที่ 2)  |      |
| 4.5 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร<br>ด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายนอก.....                        | 42   |
| (a) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance (กรณีที่ 1).....   | 43   |
| (b) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service Entrance และที่โหลด (กรณีที่ 2)   |      |
| 4.6 ผลการเลียนแบบพลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร<br>ด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายนอก.....    | 43   |
| (a) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance และ 50 $\Omega$ (กรณีที่ 1).....  | 45   |
| (b) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance ที่โหลดและ 50 $\Omega$ (กรณีที่ 2)  |      |
| 4.7 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร<br>ด้วยรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายนอก.....                     | 45   |
| (a) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance (กรณีที่ 1).....   | 46   |
| (b) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service Entrance และที่โหลด (กรณีที่ 2)   |      |
| 4.8 ผลการเลียนแบบพลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร<br>ด้วยรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายนอก..... | 46   |
| (a) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance และ 50 $\Omega$ (กรณีที่ 1).....  | 48   |
| (b) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance ที่โหลดและ 50 $\Omega$ (กรณีที่ 2)  |      |
| 4.9 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร<br>ด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายใน.....                         | 48   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| (a) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance (กรณีที่ 1).....  | 49   |
| (b) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service Entrance และที่โหลด (กรณีที่ 2)  |      |
| 4.10 ผลการเลียนแบบพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร<br>ด้วยรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s 3 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายใน.....   | 49   |
| (a) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance.....  | 52   |
| (b) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load.....  | 52   |
| (c) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ 50 $\Omega$  |      |
| 4.11 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ<br>5 10 และ 20 เมตร ตามลำดับ โดยใช้ B80K320 ที่ Service entrance และ<br>V250LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20 $\mu$ s 3 kA.....                      | 53   |
| (a) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance.....  | 53   |
| (b) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load.....  | 54   |
| (c) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ 50 $\Omega$  |      |
| 4.12 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ<br>5 10 และ 20 เมตร ตามลำดับ โดยใช้ B80K250 ที่ Service entrance และ<br>V320LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20 $\mu$ s 3 kA.....                      | 54   |
| (a) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance.....   | 55   |
| (b) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load  |      |
| 4.13 ผลการเลียนแบบพลังงานสะสมเปรียบเทียบของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ<br>ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตรตามลำดับ โดยใช้ B80K320<br>ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20 $\mu$ s 3 kA..... | 55   |
| (a) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance.....   | 56   |
| (b) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load  |      |
| 4.14 ผลการเลียนแบบพลังงานสะสมเปรียบเทียบของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ<br>ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตรตามลำดับ โดยใช้ B80K250<br>ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20 $\mu$ s 3 kA..... | 56   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้าง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| (a) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance.....  | 59   |
| (b) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load.....  | 59   |
| (c) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ 50 Ω   |      |
| 4.15 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ<br>5 10 และ 20 เมตร ตามลำดับ โดยใช้ B80K320 ที่ Service entrance และ<br>V250LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350 μs 20 kA.....                      | 60   |
| (a) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance.....  | 60   |
| (b) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load .....   | 61   |
| (c) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ 50 Ω   |      |
| 4.16 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ<br>5 10 และ 20 เมตรตามลำดับ โดยใช้ B80K250 ที่ Service entrance และ<br>V320LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350 μs 20 kA.....                       | 61   |
| (a) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance.....   | 62   |
| (b) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load  |      |
| 4.17 ผลการเลียนแบบพลังงานสะสมเปรียบเทียบของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ<br>ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตรตามลำดับ โดยใช้ B80K320 ที่<br>Service entrance และ V250LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350 μs 20 kA..... | 62   |
| (a) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance.....   | 63   |
| (b) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load  |      |
| 4.18 ผลการเลียนแบบพลังงานสะสมเปรียบเทียบของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ<br>ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตรตามลำดับ โดยใช้ B80K250 ที่<br>Service entrance และ V320LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350 μs 20 kA..... | 63   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| (a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load (High-Low).....   | 66   |
| (b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K250 ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load (Low- High)   |      |
| 4.19 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High แสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ Service entrance ที่ load และที่ 50 $\Omega$ ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20 $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเท่ากับ 20 เมตร.....   | 66   |
| (a) พลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load (High-Low).....  | 67   |
| (b) พลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K250 ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load (Low- High)  |      |
| 4.20 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High แสดงในรูปของพลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance และที่ load และด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20 $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเท่ากับ 20 เมตร..... | 67   |
| 4.21 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ Service entrance ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20 $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร.....   | 68   |
| 4.22 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20 $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร.....   | 68   |
| 4.23 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่โหลด 50 $\Omega$ ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20 $\mu$ s 3kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร.....   | 69   |
| 4.24 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จในรูปของ พลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20 $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร.....  | 69   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.25 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ<br>ในรูปของพลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ<br>8/20 $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร.....   | 70   |
| (a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K320 ที่ Service entrance<br>และ V250LA20A ที่ load (High-Low).....   | 73   |
| (b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K250 ที่ Service entrance<br>และ V320LA20A ที่ load (Low- High)   |      |
| 4.26 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จทั้งแบบ<br>High-Low และ Low-High แสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่<br>Service entrance ที่ load และที่ 50 $\Omega$ ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350 $\mu$ s 20 kA<br>ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเท่ากับ 20 เมตร.....    | 73   |
| (a) พลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K320<br>ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load (High-Low).....  | 74   |
| (b) พลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K250<br>ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load (Low- High)  |      |
| 4.27 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จทั้งแบบ<br>High-Low และ Low-High แสดงในรูปของพลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ<br>ที่ Service entrance และที่ load และด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350 $\mu$ s 20 kA<br>ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเท่ากับ 20 เมตร..... | 74   |
| 4.28 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ<br>ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ Service entrance ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ<br>10/350 $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร.....   | 75   |
| 4.29 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ<br>ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ<br>10/350 $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร.....   | 75   |
| 4.30 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ<br>ในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่โหลด 50 $\Omega$ ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ<br>10/350 $\mu$ s 3kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร.....  | 76   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวมไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อขอสิทธิบัตรและขออนุญาตนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.31 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จในรูปของ<br>พลังงานสะสมของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ<br>10/350 $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร..... | 76   |
| 4.32 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จ<br>ในรูปของพลังงานสะสมของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ<br>10/350 $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร.....             | 77   |
| (ก) ที่จุดต่อไฟฟ้าที่แรงดัน 120 โวลต์ (Laboratory Bench).....   | 83   |
| (ข) ที่ Service entrance ที่แรงดัน 277/480 โวลต์.....   | 83   |
| (ค) ที่ Service entrance ที่แรงดัน 277/480 โวลต์.....   | 84   |
| (ง) ที่ Service entrance ที่แรงดัน 277/480 โวลต์  |      |
| ก.1 การบันทึกเสิร์จ โดย Bell Telephone Laboratory.....  | 84   |
| ก.2 กระแสอิมพัลส์ : 500 A/div และ 5 $\mu$ s/div.....  | 86   |
| ก.3 กระแสอิมพัลส์ : 500 V/div และ 2 $\mu$ s/div.....  | 87   |
| ก.4 ที่โหลด 130 $\Omega$ : 500 V/div และ 2 $\mu$ s/div.....   | 87   |
| ก.5 กระแสดีสชาร์จ : 500 V/div และ 2 $\mu$ s/div.....  | 87   |
| ก.6 แสดงอัตราการเกิดเสิร์จในระบบ 220 V.....   | 88   |
| ก.7 การบันทึกข้อมูลผสมของเสิร์จ.....  | 89   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา :

องค์ประกอบอิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำที่นำมาประกอบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันจะมีความไวต่อคลื่นรบกวน เพราะผู้ออกแบบต้องการให้อุปกรณ์ทำงานด้วยความเร็วสูง กินกำลังไฟฟ้าน้อย ฉะนั้นเมื่ออุปกรณ์ได้รับคลื่นรบกวนจึงอาจทำให้ทำงานผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายต่อองค์ประกอบหรืออุปกรณ์ได้ นอกจากนี้ระบบการจ่ายไฟฟ้าแก่เครื่องจักรกลไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมและสำนักงานขนาดใหญ่มักจะได้รับผลกระทบและสภาวะการรบกวนจากความผิดปกติทางไฟฟ้าในหลายๆ ด้านเช่นเดียวกัน

เสิร์จ (Surge) เป็นสาเหตุหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดผลกระทบที่รุนแรงและรวดเร็วที่สุดในการทำลายอุปกรณ์ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ [1,2] โดยที่ผลกระทบดังกล่าวส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง การทดแทนและค่าเสียเวลา (Down time) ซึ่งนับเป็นมูลค่ามหาศาลทีเดียว

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาอัตราการเกิดเสิร์จและระดับแรงดันเสิร์จในวงจรที่ไม่มีการป้องกัน รวมทั้งลักษณะรูปคลื่นเสิร์จและขนาดในแต่ละสถานที่ตั้ง
- 2) เพื่อศึกษาการป้องกันเสิร์จภายในอาคารโดยอาศัยการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance และ Load พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับวิธีการป้องกันโดยใช้อุปกรณ์ขจัดเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียวที่ Service entrance
- 3) เพื่อศึกษาผลของตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ ระยะเวลาติดตั้ง ว่ามีผลต่อการป้องกันเสิร์จภายในอาคารอย่างไร

### 1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการป้องกันเสิร์จภายในอาคาร โดยเลือกใช้ เมทอลออกไซด์วาริสเตอร์เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ อาศัยคุณลักษณะของเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์ ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่มีความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น คือ มีความต้านทานสูงที่แรงดันไฟฟ้าปกติ แต่เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าสูงผิดปกติ (เสิร์จ) เกินแรงดัน Threshold เข้ามา เมทอลออกไซด์วาริสเตอร์จะประพุดิตัวให้มีความต้านทานต่ำ และพยายามควบคุมให้แรงดันเสิร์จมีค่าต่ำเข้าใกล้ระดับแรงดันปกติที่สุด ซึ่งในปัจจุบันเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์เป็นที่นิยมใช้เป็นอุปกรณ์

ขจัดเสิร์จกันอย่างกว้างขวางในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำและมีราคาไม่แพง [3,4] ลักษณะรูปจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำภายในอาคารตั้งแต่ Service entrance จนถึง load พิจารณาในรูปของตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ พิจารณาสายส่งไฟฟ้าเป็นแบบ Cascade lump RLC ซึ่งจะให้ผลการจำลองถูกต้องมากที่สุด [5] ตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการป้องกันเสิร์จของระบบก็คือ ระยะเวลาติดตั้งระหว่างอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance และ load ในวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาแนวโน้มของระยะเวลาติดตั้งระหว่างอุปกรณ์ขจัดเสิร์จพร้อมกับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance และ load ซึ่งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเพียงตัวเดียวไม่สามารถที่จะทำการป้องกันเสิร์จได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จทั้งจากภายนอกและที่เกิดขึ้นภายในตัวอาคารเอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance และ load เป็นแบบ High-Low [6] คือ อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่ Service entrance มีแรงดันในการนำมากกว่าที่ load เปรียบเทียบกับ Low-High [7] ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่ Service entrance มีแรงดันในการนำน้อยกว่าที่ load ในระบบแรงดันไฟฟ้า 220 V โดยพิจารณารูปคลื่นที่จำลองเสิร์จเป็น 8/20  $\mu\text{s}$  ซึ่งเป็นรูปคลื่นมาตรฐานตาม IEEE C62.41-1991 และ 10/350  $\mu\text{s}$  ซึ่งเป็นรูปคลื่นจำลองกระแสฟ้าผ่า พิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จและ โหลด 50  $\Omega$  รวมทั้งพลังงานสะสมที่ตัวอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ

## บทที่ 2

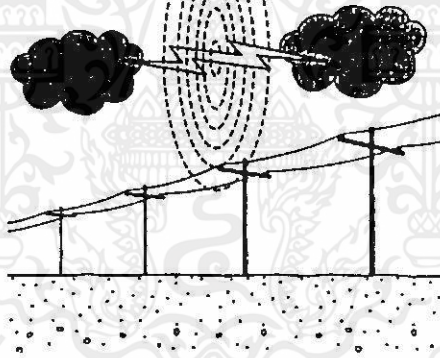
### เสิร์จ

#### 2.1 สาเหตุการเกิดเสิร์จ (Source of Surge)

เสิร์จ (Surge) เป็นแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นสูงมากจากสภาวะปกติอย่างรวดเร็ว ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (Microsecond domain) ปนเข้ามาในระบบไฟฟ้าปกติ รบกวนให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ทำงานผิดพลาดได้ แรงดันไฟฟ้าเสิร์จ เกิดจากหลายๆ สาเหตุ แต่สาเหตุหลัก คือ

##### 2.1.1 ผลกระทบจากฟ้าผ่า ซึ่งมี 3 รูปแบบหลัก คือ

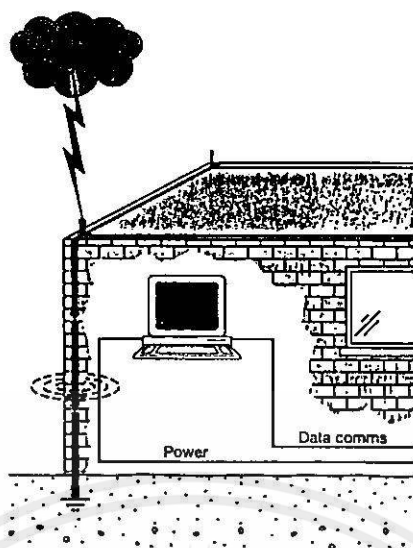
2.1.1.1 การเชื่อมต่อโดยการเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) หลังจากเกิดฟ้าผ่าจะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายทั่วไปและเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเสิร์จในตัวนำ เช่น สายไฟฟ้า สายโทรศัพท์หรือสายสัญญาณที่อยู่ในบริเวณนั้น



รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อโดยการเหนี่ยวนำ

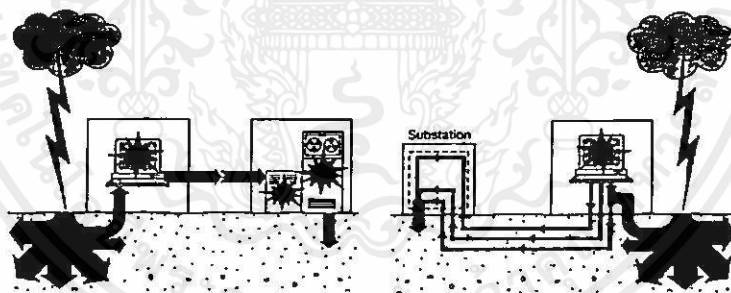
2.1.1.2 การเชื่อมต่อโดยความจุ (Capacitive coupling) เมื่อเกิดฟ้าผ่าที่สายล่อฟ้า จะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำสายไฟฟ้าที่อยู่ใกล้สายล่อฟ้า นั้นทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเสิร์จได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ความเสียหายจากเสิร์จ

1. ทำให้อุปกรณ์ชะงักการทำงาน (Disruption) ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเสิร์จที่สูงผิดปกติ จะรบกวนชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยผ่านทางตัวนำต่างๆ ที่ป้อนเข้าอุปกรณ์ ให้ทำงานผิดพลาดหรืออาจหยุดการทำงานชั่วคราว

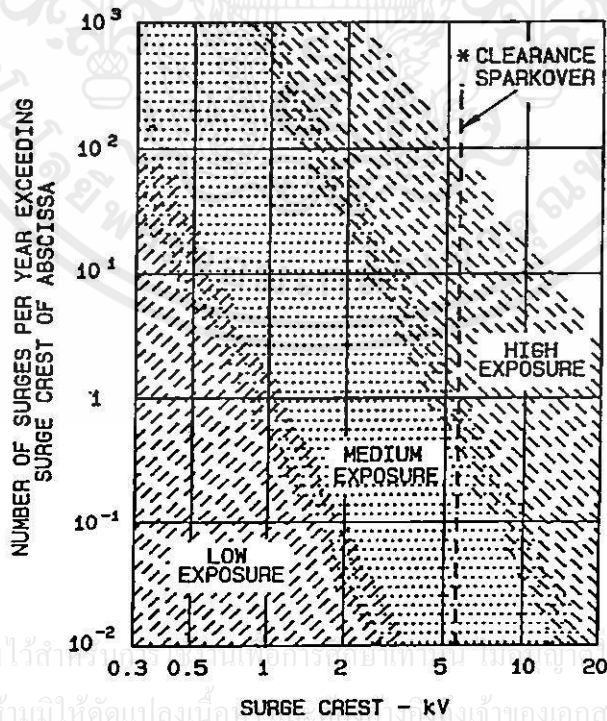
2. ลดคุณภาพและอายุการใช้งาน (Degradation) บางชิ้นส่วนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าในระดับผิดปกติจะทำให้ทำงานไม่สมบูรณ์ในช่วงเวลานั้น และอาจเกิดการเสื่อมคุณภาพได้ แต่หากเกิดหลายๆ ครั้ง ก็จะสิ้นสุดอายุการใช้งานอย่างรวดเร็ว

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

4. การเสียหายโดยทางอ้อมที่พบมาก คือ ในกรณีเครื่องคอมพิวเตอร์ชะงักการทำงานโดยไม่มีต้นตอ ทำให้เสียงานที่กำลังดำเนินการอยู่ และเสียเวลา

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

### 2.3.1 อัตราการเกิดเสิร์จกับระดับแรงดันเสิร์จ



รูปที่ 2.4 แสดงอัตราการเกิดเสิร์จกับระดับแรงดันในสถานที่ที่ไม่มีการป้องกัน

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

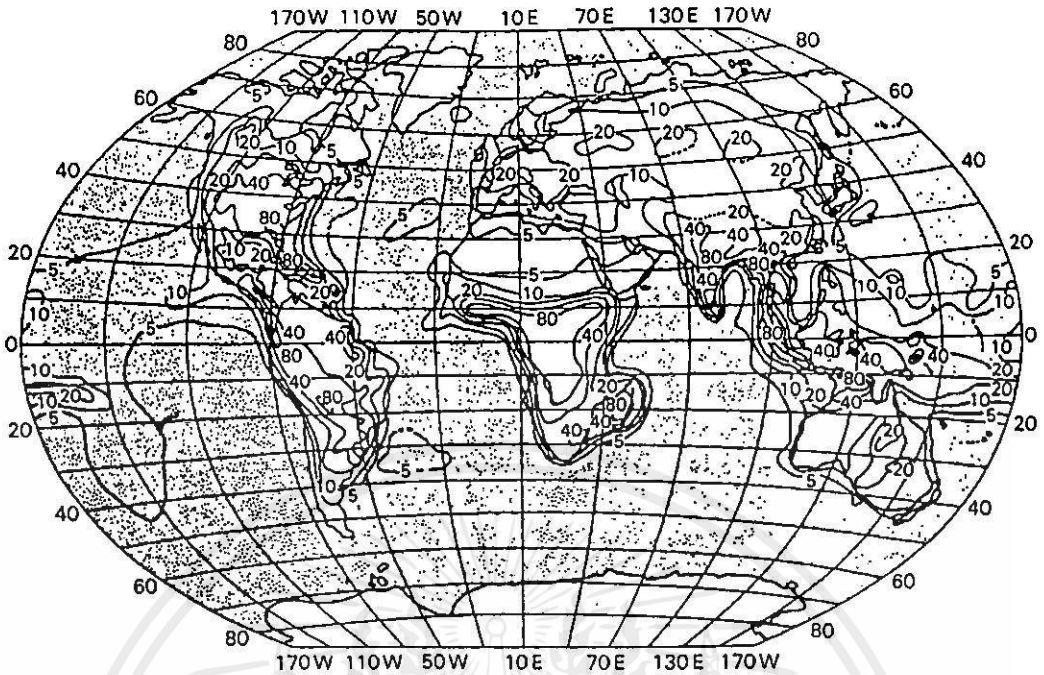
ระดับการกระจายของเสิร์จเป็นผลจากกระบวนการเกิดของเสิร์จ ดังเช่น ระยะเวลาปลอดภัยที่เกิดประกายไฟ (sparkover of clearance) ระหว่างอุปกรณ์ที่ถูกกระตุ้นกับกราวด์และการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆ การแบ่งแยกระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้จริงกับแรงดันไฟฟ้าที่ถูกจำกัด โดย sparkover เป็นค่าที่สำคัญของอุปกรณ์ต่อร่วมระหว่างภายในและภายนอกอาคาร อุปกรณ์สำหรับภายนอกอาคารควรมีระยะเวลาปลอดภัยมากกว่าภายในอาคาร ดังนั้นจึงมีค่าประกายไฟสูงประมาณ 10 kV แต่บางครั้งอาจมีค่าสูงถึง 20 kV (เป็นค่าสูงสุดสำหรับรูปคลื่น 1.2/50  $\mu$ s) ส่วนที่ Watt-hour มิเตอร์ที่ Service entrance 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 มีการเกิดคาปาซิเตอร์สวิตชิงน้อย
- (2) เครื่องห่อหุ้มระดับปานกลาง (Medium exposure) ระบบที่อยู่ในสภาพภูมิศาสตร์ที่มีการเกิดฟ้าผ่าบ่อยครั้งหรือมีการเกิดสวิตชิงในรูปแบบสภาวะชั่วคราว
- (3) เครื่องห่อหุ้มระดับสูง (High exposure) เป็นระบบที่อยู่ในสภาพภูมิศาสตร์ที่มีการเกิดฟ้าผ่าบ่อยครั้งและมีการเกิดสวิตชิงเสิร์จอย่างรุนแรงมากกว่า 2 แบบแรกซึ่งเป็นกรณีที่พบได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดง Isokeraunic map

ความถี่ของการเกิดและระดับของระบบไฟฟ้าสวิตชิงเสิร์จขึ้นอยู่กับแบบวิธีการทำงานของสาธารณูปโภค เช่น การทำงานของคาปาซิเตอร์เบงก์ก่อให้เกิดเสิร์จมากระทบที่ Service entrance เป็นต้น

สำหรับความถี่ของการเกิดและระดับของโพลด์สวิตชิงเสิร์จขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของโพลด์นั้นๆ ที่เกิดสวิตชิงหรือระยะไฟฟ้าจากจุดนั้นๆ มากกว่าตำแหน่งที่โพลด์นั้นตั้งอยู่

ส่วนการศึกษาความถี่ของการเกิดฟ้าผ่าผ่านนั้น ทำให้สามารถทราบว่ายบริเวณใดที่เกิดฟ้าผ่ามาก เพื่อการป้องกันให้มากขึ้น จำนวนของ stoke ที่เกิดขึ้นบนสายส่งโดยทั่วไปแล้วมีจำนวนมากขึ้นเมื่อสายส่งมีความสูงเพิ่มขึ้น จำนวนฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริงนั้นวัดได้ยากมาก ดังนั้นในการศึกษาถึงความถี่ของฟ้าผ่าก็อาจใช้การพิจารณาได้จากจำนวนวันที่เกิดพายุฝนฟ้าคะนอง (Thunderday) ในปีหนึ่ง แม้วิธีนี้จะไม่บอกถึงจำนวนฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริงแต่ก็เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากนัก แผนที่ที่แสดงถึงปริมาณวันที่เกิดฝนฟ้าคะนองในหนึ่งปีนี้เรียกว่า Isokeraunic map

### 2.3.3 ลักษณะของรูปคลื่นเสิร์จ (Recommended Waveform)

นับตั้งแต่ช่วง 1960s เป็นต้นมาได้มีการคิดค้นเทคนิคในการบันทึกข้อมูลของเสิร์จ การพัฒนาและปรับเครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกรูปคลื่นของเสิร์จ จากฐานข้อมูลการเกิดเสิร์จในอดีต รวมทั้งการบันทึกรายงานจากหลายเหตุการณ์ อาจจะจำแนกลักษณะรูปคลื่นเสิร์จได้ ออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

### 2.3.3.1 Ring wave

จากการผลการวัดเก็บรวบรวมสถิติในสถานที่ต่างๆ และในห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่าการแพร่กระจายของแรงดันเสิร์จส่วนใหญ่ภายในอาคารในระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำมีลักษณะของรูปคลื่นสั้นแกว่งไปมา (Oscillatory) นอกจากนั้นยังมีแอมพลิจูดไม่เท่ากันและรูปคลื่นที่แตกต่างกันในแต่ละสถานที่ ช่วงความถี่ของการสั้นแกว่งไปมาของเสิร์จนี้ มีค่าตั้งแต่ไม่น้อยกว่า 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 ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 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  $8/20 \mu\text{s}$  เป็นรูปคลื่นกระแสเสิร์จ โดย IEEE C62.1-1984 และ IEEE C62.41-1991 ได้กำหนด 2 รูปคลื่นนี้เป็นรูปคลื่นผสม ซึ่งรูปคลื่นทั้ง 2 นี้ได้ถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการเพื่อจำลองสภาพสิ่งแวดล้อมบริเวณ Service entrance ของอาคารที่เชื่อมติดกับระบบสายส่งไฟฟ้าและจำลองความถี่ที่จะเกิดกับอุปกรณ์เชื่อมต่อด้วย

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

B) เสิร์จฟ้าผ่าในสายส่งไฟฟ้าและเคลื่อนที่ไปตามสาย เสิร์จที่เกิดขึ้นนี้เมื่อเคลื่อนที่ไปตามสายส่งระยะไกลๆ จะความชันของหน้าคลื่นลดลงกว่าช่วงเริ่มต้น และมีคาบเวลาการเกิดมาก

C) เสรีจากการทำงานของฟิวส์รวมถึงสายส่งที่มีความยาวมาก เสรีที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็น เสรีทิศทางเดียว (unidirectional Surge) มีคาบเวลาการเกิดประมาณหลายร้อยไมโครวินาที ขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของสายด้วย

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

สำหรับเสรีใน B) C) และ D) นั้น IEEE C62.41-1991 ได้เสนอรูปคลื่นที่ใช้แทนเสรีที่เกิดขึ้น 2 รูปคลื่นด้วยกันซึ่งถือเป็นรูปคลื่นเสริมที่มีคาบเวลาการเกิดที่นาน ได้แก่ รูปคลื่นเสรีทิศทางเดียว 10/1000  $\mu$ s และรูปคลื่นความถี่ต่ำ 5 kHz Ring wave

### 2.3.3.3 Fast Transient

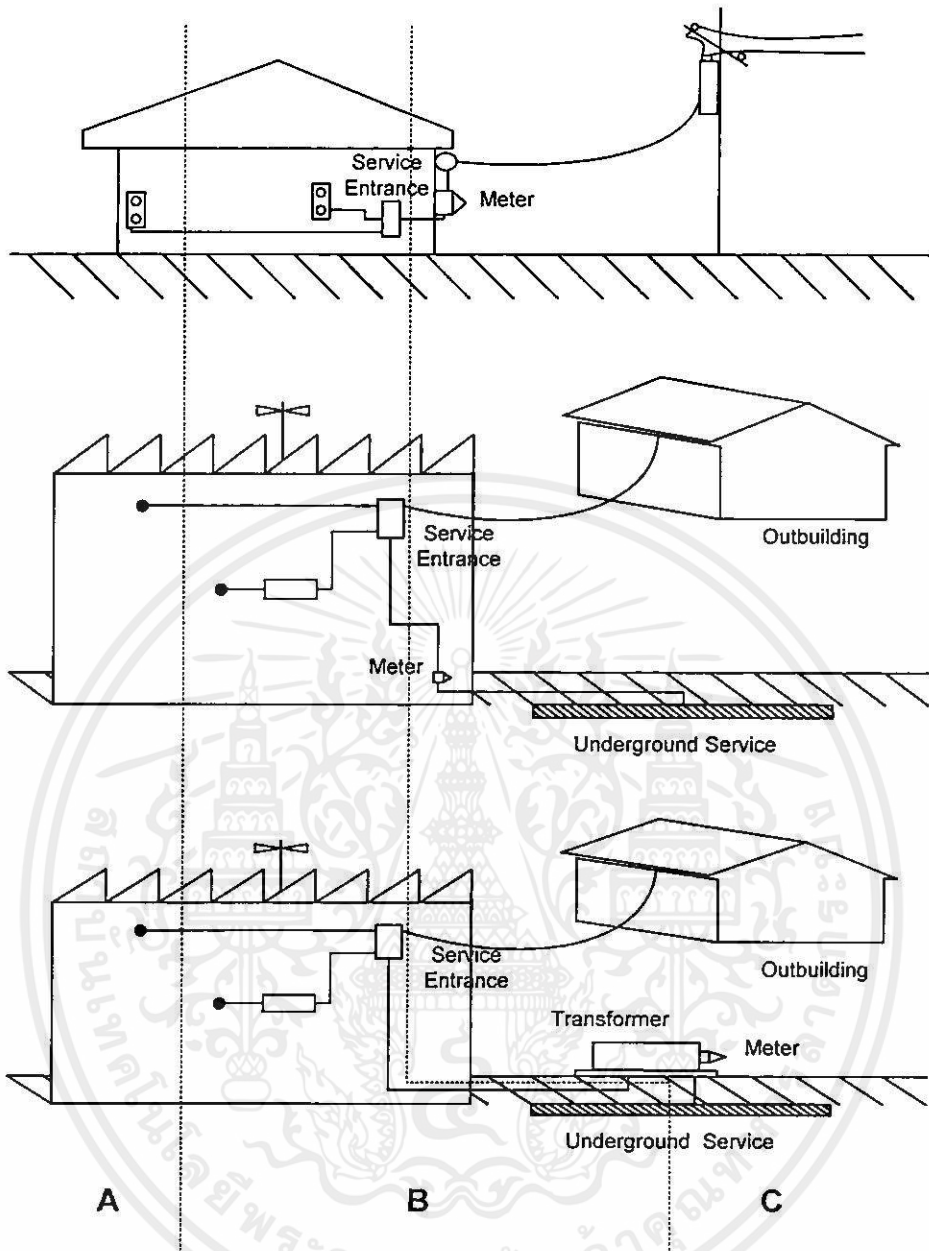
การเปิดวงจรไฟฟ้าด้วยสวิตช์ประเภท air gap ซึ่งได้แก่ รีเลย์และคอนแทกเตอร์ ก่อให้เกิดการเบิรสต์ของ Fast ringing surge ขึ้น ในบางครั้งอาจจะเกิดจากปรากฏการณ์อาร์ก เรียกว่า Showering arc และ IEC 801-4 (1988) เรียกรูปคลื่นนี้ว่า Electrical Fast Transient (EFT) กำหนดการทดสอบที่เวลาช่วงขึ้นของการเบิรสต์ของเสรีเท่ากับ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

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

## 2.4 ประเภทสถานที่ตั้ง (Location Category)

เนื่องจากเราไม่สามารถที่จะเลือกหรือกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด (Source impedance) ทั้งภายในและภายนอกอาคารได้ เพราะมีค่าที่เหมาะสมเป็นไปได้หลายค่า ดังนั้น IEEE C62.41-1991 [8] จึงทำการจัดจำแนกประเภทสถานที่ตั้งออกเป็น 3 ประเภท ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ประเภทของสถานที่ตั้ง

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

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

(3) ที่ตั้งประเภท C พิจารณาที่ภายนอกอาคารและ Service entrance

ได้แก่ จุดบริการจากเสาไฟฟ้าจนถึงตัวอาคาร สายตัวนำระหว่างมิเตอร์ไฟฟ้ากับ Distribution panel สายไฟฟ้าที่พาดจากภายนอกอาคารซึ่งสามารถถอดได้และสายไฟฟ้าใต้ดินสำหรับมอเตอร์ปั๊มน้ำ

การพิจารณาจัดจำแนกประเภทสถานที่ตั้งรวมทั้งระดับเครื่องป้องกันในแต่ละที่ตั้งนั้น เพื่อกำหนดให้เป็นแบบแผนเดียวกันในการทดสอบ (Test procedure) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# การป้องกันเสิร์จ

### 3.1 หลักการป้องกันเสิร์จ

หลักการป้องกันเสิร์จสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปจะใช้อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ (Surge protective device) ได้แก่ สปาร์กแก๊ป (gas tube) วาริสเตอร์ชนิดเมทอลออกไซด์ (metal oxide varistor) และไดโอดขจัดเสิร์จ (diode suppressor) แต่อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จแต่ละชนิดจะมีลักษณะสมบัติในการทำงานหรือการขจัดเสิร์จได้แตกต่างกัน และอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จชนิดใดชนิดหนึ่งไม่สามารถจะทำหน้าที่ป้องกันเสิร์จให้ได้ผลตามที่ต้องการครบถ้วน จึงจำเป็นต้องใช้วิธีทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ (Coordination of Surge protective device) เมื่อพิจารณาถึงหลักการทำงานในการป้องกันขั้นพื้นฐานของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ อาจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1) แบบขยุบแรงดัน (Clamping) อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่ใช้ขยุบหรือขจัดแรงดัน ได้แก่ วาริสเตอร์ และซิลิกอน ไดโอดหรือ ไดโอดขจัดเสิร์จ

2) แบบโครบาร์ (Crowbar) อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จจะทำงานในลักษณะที่มีความต้านทานในเชิงลบสูง (negative resistance characteristics) และเป็นผลให้เกิดการขจัดแรงดันให้เหลือน้อยลงต่ำพอที่จะไม่เกิดความเสียหายแก่โหลด

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการทำงานของการทำงานของการป้องกันทั้งสองแบบแสดงดังตาราง

ตารางที่ 3.1 ตารางเปรียบเทียบหลักการป้องกัน

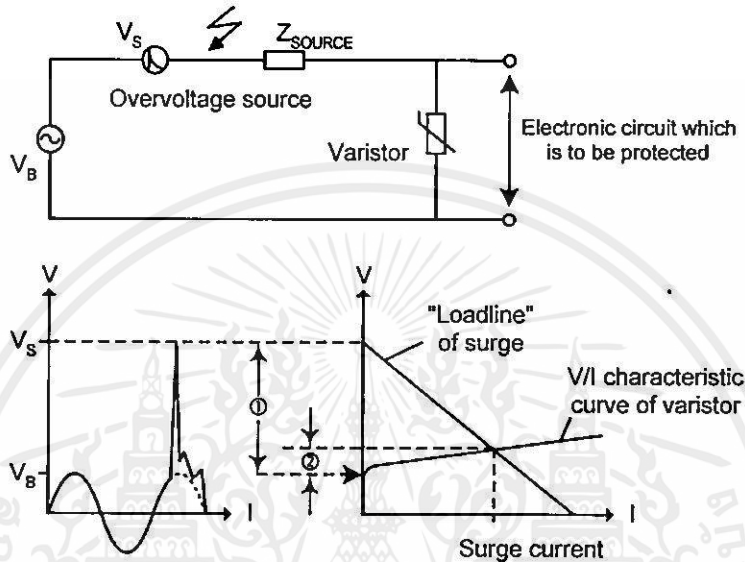
| คุณลักษณะ                | แบบขยุบแรงดัน (clamp)                                | แบบโครบาร์ (crowbar)                          |
|--------------------------|--|---|
| ความสามารถรับกระแสเสิร์จ | รับกระแสได้น้อย                                      | รับกระแสได้สูง                                |
| การตอบสนองต่อกระแส       | รับพลังงานไว้ ในลักษณะที่ปล่อยระบายออกไปเป็นความร้อน | สะท้อนกระแสที่ได้รับให้ย้อนกลับไปในวงจรได้สูง |
| ตัวอย่างองค์ประกอบกับดัก | MOV<br>ไดโอดขจัดเสิร์จ                               | หลอดบรรจุก๊าซ                                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ เมทอลออกไซด์วาริสเตอร์ (Metal oxide varistor : MOV)  
เป็นอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ โดยเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์เป็นตัวต้านทานที่มีความสัมพันธ์ของแรง

ต้นกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังสมการที่ 3.1 และเส้นกราฟคุณลักษณะของ V/I จะมีลักษณะคล้ายฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล (Exponential)

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

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



รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ

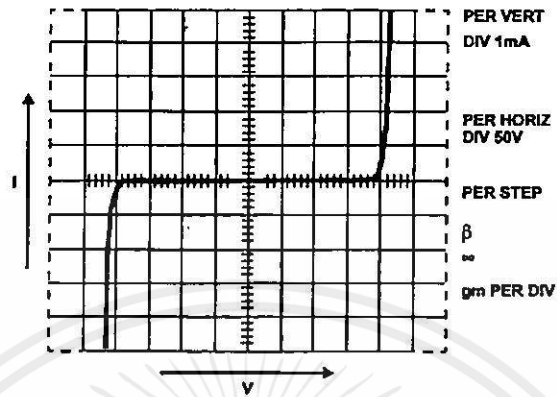
โดยเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์จะประพฤติตัวเสมือนเปิดวงจร (open circuit) ก็จะมีมีความต้านทานสูงที่แรงดันไฟฟ้าปกติ แต่เมื่อเกิดแรงดันสูงผิดปกติเกินแรงดัน Threshold ตัว MOV จะประพฤติตัวให้มีค่าความต้านทานต่ำ พยายามควบคุมให้มีค่าแรงดันเหลือรอด (Let-through voltage) ของแรงดันเสิร์จต่ำและเข้าใกล้แรงดันระดับปกติที่สุด จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าขนาดแรงดันเสิร์จ ① ถูกขจัดจนเหลือขนาดแรงดัน ② โดยอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ [9,10]

### 3.2 ทฤษฎีการทำงานของวาริสเตอร์

#### 3.2.1 บทนำ

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

จะถูกดูดกลืนโดยวาริสเตอร์ ทำให้สามารถป้องกันอุปกรณ์ที่ไวต่อการทำลายได้ (Vulnerable circuit component)



รูปที่ 3.2 คุณสมบัติ V/I ของวาริสเตอร์

วาริสเตอร์ถูกผลิตขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีของเซรามิกประกอบไปด้วย ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เป็นส่วนประกอบสำคัญกับ บิสมัท (Bismuth) โคบอลต์ (Cobalt) แมงกานีส (Manganese) และแมทเทลออกไซด์ชนิดอื่นๆ ซึ่งโครงสร้างของวาริสเตอร์ประกอบไปด้วยเมทริกซ์ของตัวนำซิงค์ออกไซด์ขนาดเล็ก แยกโดยรอยต่อ P-N ซึ่งรอยต่อดังกล่าวจะตอบสนองการนำไฟฟ้าที่แรงดันต่ำ และเป็นแหล่งกำเนิดการนำไฟฟ้าไม่เชิงเส้นที่แรงดันไฟฟ้าสูง

เมื่อเกิดการนำไฟฟ้าระหว่างเกรนซิงค์ออกไซด์ขนาดเล็กถูกกระจายไปทั่วกลุ่มของอุปกรณ์ โดยวาริสเตอร์จะมีความทนทานมากกว่าอุปกรณ์ที่มีรอยต่อ P-N เดียวเช่น ซีเนอร์ไดโอด ในตัววาริสเตอร์ พลังงานจะถูกดูดกลืนแบบเอกรูป (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

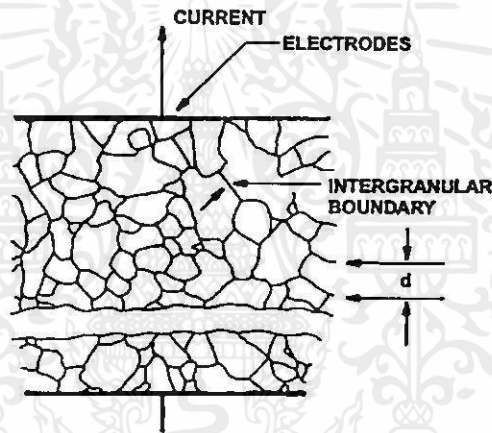
### 3.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property)

คุณสมบัติที่น่าสนใจของวาริสเตอร์ชนิดเมทเทลออกไซด์ที่สร้างจาก ZnO คือคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับขนาดของอุปกรณ์แต่ละเกรน (grain) ของ ZnO ของเซรามิกทำตัวเหมือนกับว่ามี

รอยต่อสารกึ่งตัวนำที่ขอบของเกรนนั้น เมื่อพหุคูณทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นเกิดที่ขอบของเกรน ZnO แต่ละอัน ตัววาริสเตอร์สามารถพิจารณาให้เป็นอุปกรณ์หลายรอยต่อ (multi-junction) ที่ประกอบไปด้วยเกรนที่ต่อเนื่องกันหลายๆ อัน ค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนและการแจกแจงขนาดเกรนเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดพหุคูณทางไฟฟ้า

### 3.2.3 โครงสร้างขนาดเล็กของวาริสเตอร์ (Varistor Microstructure)

วาริสเตอร์สร้างได้โดยการขึ้นรูป (form) และเผา (sinter) ผงของ ZnO ในชั้นเซรามิก ชั้นส่วนดังกล่าวจะถูกอิเล็กทรอนิกส์กับ 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 ต่อรอยต่อของเกรนซึ่งค่าการคำนวณค่าแรงดันดังกล่าวจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของเกรน ดังนั้นค่าแรงดันวาริสเตอร์จะแสดงได้โดยความหนาของวัสดุและขนาดของ ZnO เกรนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

โดย  $n$  คือ จำนวนเฉลี่ยของเกรนระหว่างอิเล็กโทรด

$d$  คือ ขนาดเฉลี่ยของเกรน

ค่าแรงดันวาริสเตอร์ ( $V_N$ ) ซึ่งอธิบายค่าแรงดันไฟฟ้าตลอดช่วงวาริสเตอร์ที่จุดบนกราฟ V-I จากระดับต่ำที่เป็นเชิงเส้นไปยังระดับสูงที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมาตรฐานจะวัดแรงดันนี้ที่กระแส 1 mA ขนาดโดยทั่วไปของวาริสเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ขนาดทั่วไปของวาริสเตอร์

| แรงดันวาริสเตอร์     | ค่าเฉลี่ยขนาดเกรน | $n$ | แรงดันเกรเดียนต์ | ความหนา |
|----------------------|-------------------|-----|------------------|---------|
| Volt                 | $\mu\text{m}$     |     | V/mm ที่ 1mA     | mm      |
| 150 V <sub>rms</sub> | 20                | 75  | 150              | 1.5     |
| 25 V <sub>rms</sub>  | 80                | 12  | 39               | 1.0     |

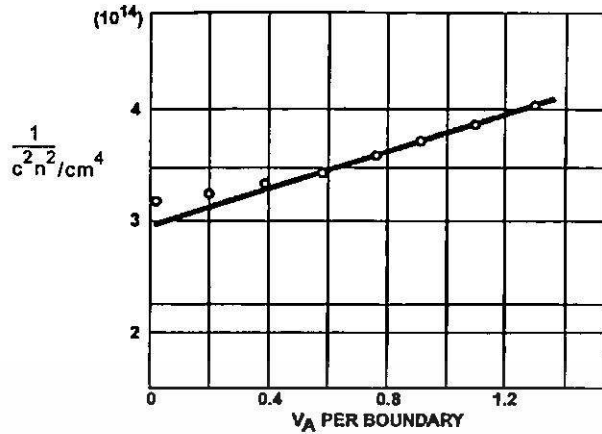
### 3.2.4 ทฤษฎีการทำงาน (Theory of Operation)

เนื่องจากธรรมชาติของ polycrystalline ของวาริสเตอร์สารกึ่งตัวนำแบบเมทอลออกไซด์ การทำงานทางกายภาพของอุปกรณ์จะซับซ้อนกว่าสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไป คุณสมบัติสำคัญในการอธิบายการทำงานของเมทอลออกไซด์วาริสเตอร์คือ การเข้าไปปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขอบเขตของเกรนหรือรอยต่อระหว่างเกรนซึ่งคือออกไซด์ ในขณะที่บางทฤษฎีก่อนหน้านี้สมมติว่าช่องทางทางไฟฟ้าเกิดผ่านฉนวนเฟสลำดับที่ 2 ที่ขอบเขตของเกรน การทำงานของวาริสเตอร์บางทีจะดีกว่าเอาไดโอดมาต่ออนุกรมหรือขนานกัน ในแบบจำลองนี้ขอบเขตของเกรนประกอบไปด้วยสถานะที่ไม่สมบูรณ์ที่ดักจับอิเล็กตรอนอิสระจากเกรนของซิงค์ออกไซด์ในพื้นที่ที่ติดกับขอบเขตของเกรน รูปที่ 3.4 แสดงชั้นดีฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นในวาริสเตอร์ โดยที่ส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้าต่อค่าขอบเขตกำลังสองถูกพล็อตกับค่าแรงดันไฟฟ้าต่อขอบเขตซึ่งเป็นแบบเดียวกับสารกึ่งตัวนำประเภท P-N ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

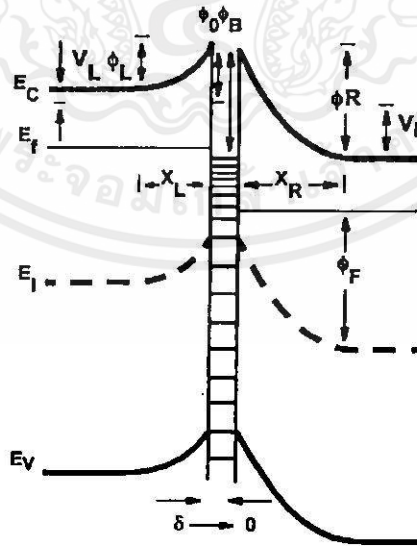
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 พฤติกรรมของค่าความจุไฟฟ้าต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของวาริสเตอร์

โดย  $V_b$  คือค่าแรงดันแบเรีย  $V$  คือค่าแรงดันที่ป้อนให้  $q$  คือประจุอิเล็กตรอน  $\epsilon_s$  คือค่า permittivity ของสารกึ่งตัวนำและ  $N$  คือความหนาแน่นของประจุ จากความสัมพันธ์นี้ค่า  $N$  มีค่า  $2 \times 10^{17}$  ต่อ  $\text{cm}^3$  นอกจากนี้กำหนดให้ค่าความกว้างของชั้นดีฟิสิกซ์ชั้นที่คำนวณมีค่าประมาณ 1000 Angstrom

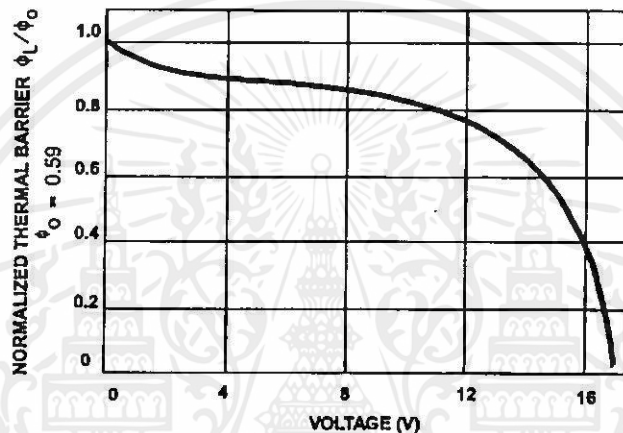
ตัวดีฟิสิกซ์ที่กั้นการไหลของประจุอิสระและจะทำตัวเป็นฉนวนที่มีค่าแรงดันต่ำในพื้นที่การรั่ว (leakage region) ดังแสดงดังรูปที่ 3.5 กระแสการรั่วเกิดจากประจุอิสระไหลผ่านสนามแบเรียต่ำ (field lower barrier) และอุณหภูมิที่ทำงานประมาณ  $25^\circ\text{C}$



รูปที่ 3.5 แถบพลังงานสำหรับเกรนของ ZnO ที่มีขอบเขตติดกับรอยต่อ ZnO

รูปที่ 3.5 แสดงแถบพลังงานสำหรับเกรนของ ZnO ที่มีขอบเขตติดกับรอยต่อ ZnO เกรน ทางซ้ายคือ forward bias ( $V_L$ ) และทางขวาคือ reverse bias ( $V_R$ ) ความกว้างของชั้นดีฟิสิกส์คือ  $X_L$  และ  $X_R$  ค่าความสูงแถบเรียคือ  $\phi_L$  และ  $\phi_R$  และค่าความสูง zero bias แถบเรียคือ  $\phi_0$  เมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้น  $\phi_L$  จะลดลงและค่า  $\phi_R$  จะเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้แถบเรียมีค่าลดลงและเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า

ค่าความสูงแถบเรีย  $\phi_L$  ของวาริสเตอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้าค่าถูกวัดเป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แสดงดังรูปที่ 3.6 การลดลงอย่างรวดเร็วในแถบเรียที่แรงดันไฟฟ้าสูงแสดงการเริ่มนำไฟฟ้าอย่างไม่เชิงเส้น



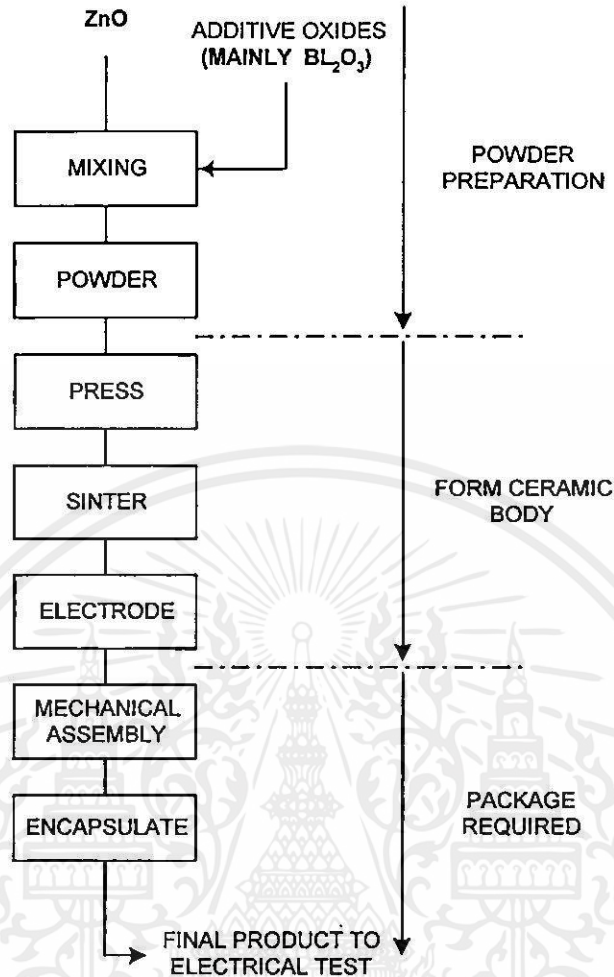
รูปที่ 3.6 แถบเรียเชิงความร้อนกับฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้

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

### 3.2.5 โครงสร้างของวาริสเตอร์ (Varistor construction)

กระบวนการสร้างวาริสเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.7 คุณสมบัติของอุปกรณ์จะกำหนดที่การอัด (pressing operation) โดยผงแป้ง (powder) จะถูกอัดลงในแบบพิมพ์ที่กำหนดความหนาเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ พื้นที่อิเล็กทรอนิกส์และมวลของอุปกรณ์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้อัตรากระแสสูงสุดและความสามารถในการรับพลังงาน โดยทั่วไปช่วงของเส้นผ่านศูนย์กลางของวาริสเตอร์ที่เป็นดิสก์มีค่าดังนี้ 3, 5, 7, 10, 14, 20, 32, 40 และ 62 mm

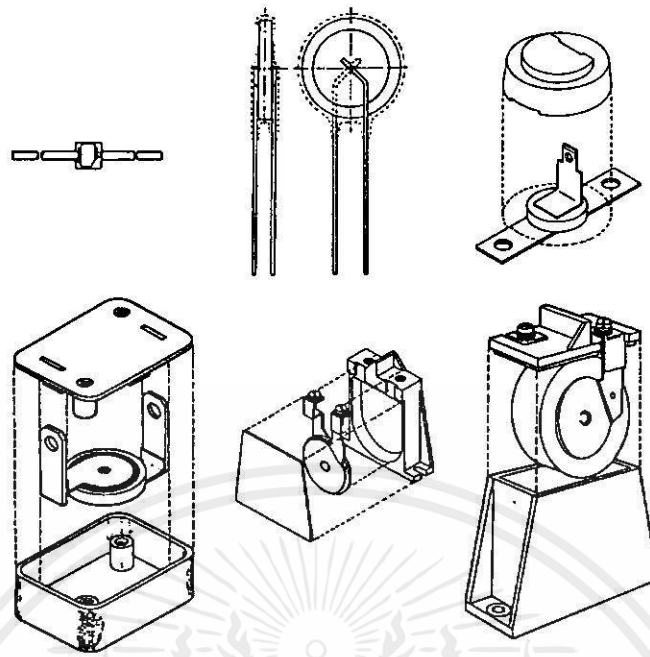
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กระบวนการผลิตของวาริสเตอร์

การใช้เทคนิคการผลิตของเซรามิกสามารถใช้ในการสร้างรูปร่างอื่นๆ ตัวอย่างเช่น แท่งหรือหลอดถูกซึ่งสร้างโดยการดันออก (extrude) และตัดเพื่อให้ได้ความยาวที่ต้องการ หลังจากการขึ้นรูปแล้ว ส่วนที่ยังไม่ได้เผาจะถูกวางในเตาเผาอิฐและเผาที่อุณหภูมิสูงสุดที่มากกว่า  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตัวบิทม์สออกไซด์จะหลอมละลายที่อุณหภูมิมากกว่า  $825\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทำให้เกิดความหนาแน่นของ polycrystalline ceramic ที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดเกรนและโครงสร้างที่ถูกควบคุมโดยขนาดของเกรนรูปทรงของวาริสเตอร์ (package) แสดงดังรูป 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

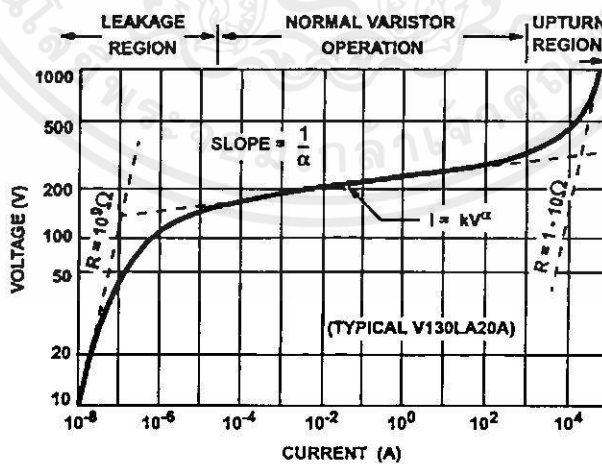


รูปที่ 3.8 รูปทรงของวาริสเตอร์

### 3.2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Characterization)

#### 1) คุณสมบัติ V-I ของวาริสเตอร์

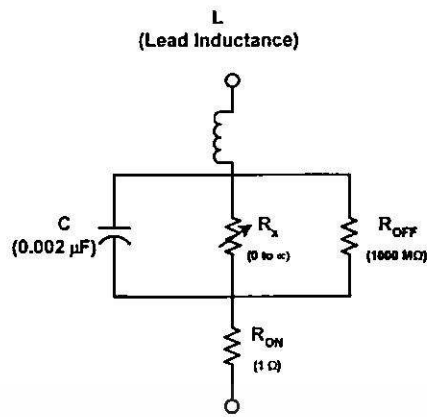
คุณลักษณะทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์มักแสดงในรูปของ log-log เพื่อแสดงช่วงกว้างของกราฟ V-I คุณลักษณะของกราฟ V-I แสดงบริเวณ (region) การทำงานที่แตกต่างกันทั้ง 3 ช่วงของวาริสเตอร์ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งแสดงช่วงกว้างของกระแสมากกว่าที่แสดงใน data sheet โดยทั่วไป



รูปที่ 3.9 คุณสมบัติของกราฟ V-I ในรูปมาตราส่วนของ log-log

#### 2) วงจรเสมือน (Equivalent Circuit Model)

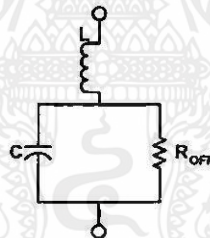
แบบจำลองทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์สามารถแสดงโดยวงจรเสมือนดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบจำลองทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์

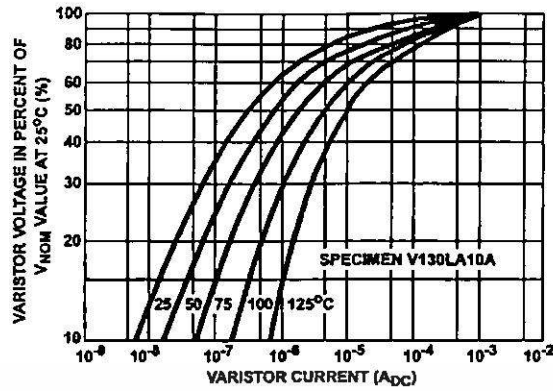
### 2.1) ช่วงบริเวณ leakage ของการทำงาน

ที่ระดับกระแสมีค่าต่ำ กราฟ V-I จะเข้าใกล้ลักษณะเชิงเส้น (ohmic) และแสดงลักษณะการขึ้นกับอุณหภูมิ ตัววาริสเตอร์จะมีค่าความต้านทานสูง (เข้าใกล้  $10^9 \Omega$ ) และแสดงลักษณะเหมือนเปิดวงจร ค่าความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ( $R_x$ ) สามารถจะได้เนื่องจาก  $R_{OFF}$  ที่คือแบบขนานมีอิทธิพลมากกว่ารวมทั้ง  $R_{ON}$  สามารถจะได้เมื่อเทียบกับ  $R_{OFF}$



รูปที่ 3.11 วงจรเสมือนที่ระดับกระแสมีค่าต่ำ

ค่าความจุไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์วาริสเตอร์มีค่าประมาณคงที่ตลอดช่วงแรงดันและความถี่ในพื้นที่ leakage region ค่าความจุไฟฟ้าที่ตกลงจะมีค่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแรงดันที่ให้กับค่าวาริสเตอร์ ในขณะที่เมื่อค่าแรงดันเข้าใกล้ค่าแรงดันวาริสเตอร์ที่ระบุค่าความจุไฟฟ้าจะลดลงทันที ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าประมาณคงที่เมื่อค่าความถี่เปลี่ยนไป 100 kHz



รูปที่ 3.12 ผลกระทบของอุณหภูมิในพื้นที่ leakage

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

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

โดยที่  $I_0$  = ค่าคงที่

$K$  = ค่าคงที่ของ Boltzmann

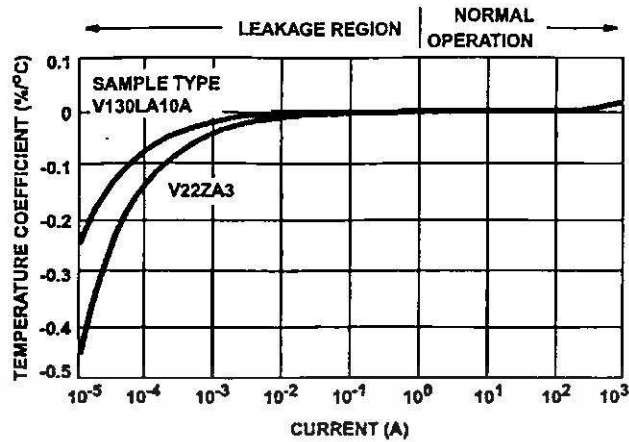
$V_B = 0.9\text{eV}$

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

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

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

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



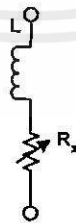
รูปที่ 3.13 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ( $dv/dT$ ) ต่อกระแส

## 2.2) ส่วนการทำงานปกติของวาริสเตอร์

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

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

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



รูปที่ 3.14 วงจรเสมือนที่การนำของวาริสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ตลอดช่วงการทำงานค่าแรงดันวาริสเตอร์จะมีค่าคงที่ สำหรับการเปลี่ยนแปลงกระแส  
หลายๆขนาด ค่าความต้านทาน  $R_x$  จะเปลี่ยนตามขนาดการตอบสนองของกระแส ซึ่งสามารถ

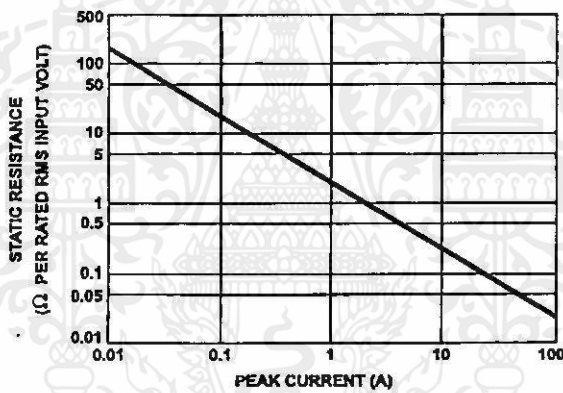
สังเกตโดยการตรวจสอบค่าความต้านทาน static และ dynamic ซึ่งเป็นฟังก์ชันของกระแส ค่าความต้านทาน static อธิบายได้โดย

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

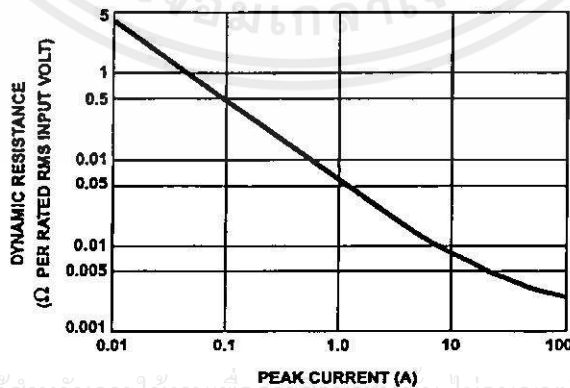
และค่าความต้านทาน dynamic

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

กราฟระหว่างค่าความต้านทานกับกระแส แสดงดังรูปที่ 3.15 และ 3.16



รูปที่ 3.15 ค่าความต้านทาน static ( $R_x$ ) กับกระแส



รูปที่ 3.16 ค่าความต้านทาน dynamic ( $Z_x$ ) กับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3) ช่วงบริเวณ upturn ของการทำงาน

ที่ระดับกระแสสูงซึ่งเข้าใกล้ค่าพิกัดสูงสุด ตัววาริสเตอร์จะประพุดตัวคล้ายการลัดวงจร (short circuit) กราฟจะแยกออกมาจากช่วงไม่เชิงเส้นและเข้าใกล้ค่าความต้านทานของวัสดุหลัก ประมาณ 1 ถึง 10  $\Omega$  ที่บริเวณ upturn จะก่อให้เกิดค่า  $R_x$  เข้าใกล้ค่า  $R_{ON}$  ซึ่งค่าความต้านทาน  $R_{ON}$  นี้ แสดงถึงค่าความต้านทานหลักของเกรนของ ZnO ค่าความต้านทานนี้จะมีค่าเชิงเส้นและเกิดที่ กระแส 50 A ถึง 50,000 A ขึ้นอยู่กับขนาดของวาริสเตอร์



รูปที่ 3.17 วงจรเสมือนที่การ upturn ของวาริสเตอร์

### 3.3 การเลือกรูปคลื่นทดสอบ (Selection of waveform)

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

ตารางที่ 3.3 รูปคลื่นทดสอบมาตรฐานและรูปคลื่นทดสอบเสริมสำหรับตำแหน่งที่ตั้งต่าง ๆ

| ตำแหน่งที่ตั้ง | 100 kHz<br>Ring Wave | Combination<br>Wave | 5/50 ns<br>EFT Burst | 10/100 $\mu$ s<br>Wave | 5 kHz<br>Ring Wave |
|----------------|----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|--------------------|
| A              | มาตรฐาน              | ไม่มี               | เสริม                | เสริม                  | เสริม              |
| B              | มาตรฐาน              | มาตรฐาน             | เสริม                | เสริม                  | เสริม              |
| C              | ไม่มี                | มาตรฐาน             | ไม่มี                | เสริม                  | เสริม              |

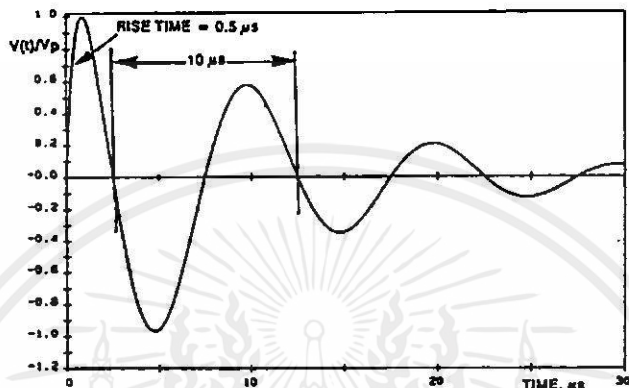
#### 3.3.1. รูปคลื่นทดสอบมาตรฐาน (Standard Waveforms)

##### 1) รูปคลื่น 0.5 $\mu$ s-100 kHz Ring Wave

เป็นรูปคลื่นของแรงดันเปิดวงจร (Open-circuit voltage) มีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

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

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



รูปที่ 3.18 แสดงรูปคลื่น 0.5  $\mu$ s-100 kHz Ring wave

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

ค่าแอมพลิจูดสูงสุดแรกของทั้งแรงดันเบ็ดวงจร ( $V_p$ ) และกระแสลัดวงจร ( $I_p$ ) นั้นจะพิจารณาจากตารางที่ 1 โดยมีค่าเพื่อเท่ากับ  $\pm 10\%$

ตารางที่ 3.4 แรงดันและกระแสลัดวงจรที่ติดตั้งประเภทต่างๆ ของรูปคลื่นมาตรฐาน 0.5  $\mu$ s -100 kHz

| ประเภทที่ตั้ง | เครื่องห่อหุ้มของระบบ | ค่าสูงสุด   |                 | ค่าอิมพีแดนซ์ ( $\Omega$ ) |
|---------------|-----------------------|-------------|-----------------|----------------------------|
|               |                       | 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  $\mu\text{s}$  - 100 kHz Ring wave จะไม่มีรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรในการทดสอบ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าของกระแสลัดวงจรสูงสุดขึ้นอยู่กับที่ตั้งประเภทต่างๆ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของ Ring wave นี้จะไม่ได้ให้พลังงานสูงกับอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

เนื่องจาก Ring wave มีเวลารุ่งที่สั้นเท่ากับ 0.5  $\mu\text{s}$  ของขอบขาขึ้น ประกอบกับกระแสสูงสุดและค่า  $di/dt$  ที่มีค่ามากพอจะก่อให้เกิดผลกระทบของการเหนี่ยวนำที่จุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในการทดสอบ ซึ่งอัตราส่วนของค่าแรงดันกับด้วยอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดเสร็จ และอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทดสอบจะประมาณเท่ากับค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด

สำหรับรูปคลื่น 0.5  $\mu\text{s}$ -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

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

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

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

$$A = 1.590$$

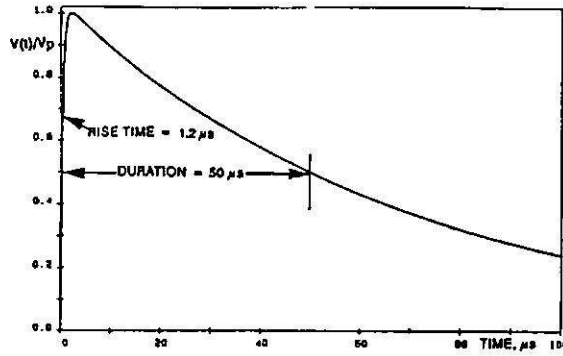
## 2) รูปคลื่นแบบชุดผสม (Combination Wave) 1.2/50 $\mu\text{s}$ - 8/20 $\mu\text{s}$

รูปคลื่นแบบชุดผสมนี้ถูกกำเนิดจากเครื่องกำเนิดรูปคลื่นแรงดันเปิดวงจร 1.2/50  $\mu\text{s}$  และรูปคลื่นกระแสลัดวงจร 8/20  $\mu\text{s}$  ซึ่งรูปคลื่นที่ถูกต้องจะพิจารณาจากแหล่งกำเนิดและค่าอิมพีแดนซ์ของเสร็จที่เกิดขึ้น

รูปคลื่นแรงดันเปิดวงจร (Open-circuit voltage) 1.2/50  $\mu\text{s}$  มีกราฟแสดงดังรูปที่ 2 และมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

- เวลาค้นหน้าคลื่น (front time) : 1.2  $\mu\text{s} \pm 0.36 \mu\text{s}$

- คาบเวลาการเกิด (Duration) : 50  $\mu\text{s} \pm 10 \mu\text{s}$



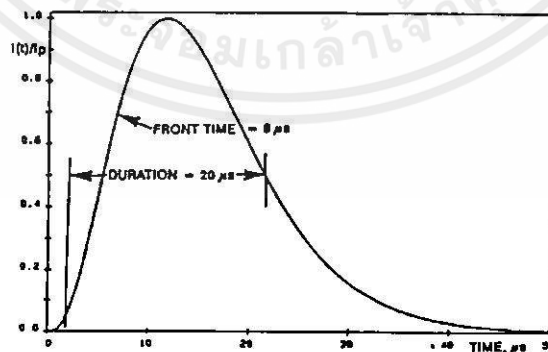
รูปที่ 3.19 แสดงรูปคลื่นรวมของแรงดันเปิดวงจร 1.2/50  $\mu$ s

เวลาหน้าคลื่นสำหรับรูปคลื่นแรงดันนี้เท่ากับ 1.67 ( $t_{90} - t_{30}$ ) โดยที่  $t_{90}$  และ  $t_{30}$  เป็นเวลาที่แอมพลิจูดมีค่า 90 % และ 30 % ของขอบขาขึ้นหน้าคลื่น ซึ่งได้ถูกนิยามตาม IEC 60-2 (1973) [11] และ IEEE std.4-1978 [12]

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

รูปคลื่นกระแสลัดวงจร (Short-circuit current) 8/20  $\mu$ s มีกราฟแสดงดังรูปที่ 3.20 และมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

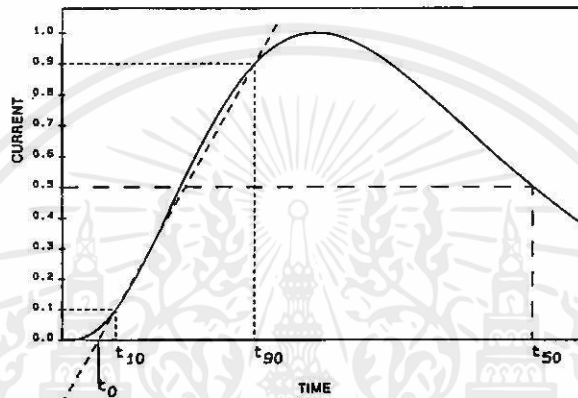
- เวลาหน้าคลื่น (front time) : 8  $\mu$ s (+1.0 - 2.5)  $\mu$ s
- คาบเวลาการเกิด (Duration) : 20  $\mu$ s (+8 - 4)  $\mu$ s



เอกสารรูปที่ 3.20 แสดงรูปคลื่นรวมของกระแสลัดวงจร 8/20  $\mu$ s นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาหน้าคลื่นสำหรับรูปคลื่นกระแสนี้เท่ากับ  $1.25 (t_{90} - t_{10})$  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  $\mu\text{s}$  (เวลาหน้าคลื่น จุดเริ่มต้นที่แท้จริงและช่วงระยะเวลา)

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

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าแรงดันและกระแสลัดวงจรที่ติดตั้งประเภทต่างๆ ของรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$  - 8/20  $\mu\text{s}$  Combination wave

| ประเภทที่ติดตั้ง | เครื่องต่อหุ้มของระบบ | ค่าสูงสุด   |                 | ค่าอิมพีแดนซ์ ( $\Omega$ ) |
|------------------|-----------------------|-------------|-----------------|----------------------------|
|                  |                       | 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                          |

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

จากอดีตที่ผ่านมา รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50  $\mu\text{s}$  ถูกใช้สำหรับการทดสอบระดับอิมพัลส์พื้นฐานของการเป็นฉนวนซึ่งจำลองโดยการทดสอบเปิดวงจรจนกระทั่งค่าความเป็นฉนวนหมดไป สำหรับรูปคลื่นกระแส 8/20  $\mu\text{s}$  จะถูกใช้ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จโดยการป้อนกระแสสูงๆ เมื่อแรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรมีลักษณะรูปคลื่นที่ต่างกันในปรากฏการณ์เดียวกัน เช่น การเกิด Overstress จากฟ้าผ่า จึงมีความจำเป็นที่จะรวมทั้งสองเป็นรูปคลื่นทดสอบรูปคลื่นเดียวกัน

สำหรับรูปคลื่น 1.2/50  $\mu\text{s}$  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  $\mu\text{s}$  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  $\tau$  คือ ค่าคงที่ของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น  $V_p$  คือ แรงดันเปิดวงจรสูงสุด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_p$  คือ กระแสลัดวงจรสูงสุด

### 3.3.2. รูปคลื่นทดสอบเสริม (Additional Waveform)

รูปคลื่นเสริมนี้ประกอบด้วย รูปคลื่นเบิรสต์ EFT รูปคลื่นทิศทางเดียว (Unidirectional) 10/1000  $\mu\text{s}$  และรูปคลื่น 5 kHz Ring Wave ซึ่งแต่ละลูกคลื่นก็มีลักษณะพิเศษเฉพาะเลียนแบบการเชื่อมต่อของคอนแทกเตอร์ การทำงานของฟิวส์ และการสวิตซ์ของตัวเก็บประจุ ตามลำดับ

#### 1) รูปคลื่นเบิรสต์ EFT (Electrical Fast Transient)

รูปคลื่นนี้ประกอบด้วยการเบิรสต์หลายๆ ครั้งซึ่งแต่ละครั้งจะมีพัลส์ทิศทางเดียวเฉพาะตัว รูปคลื่นนี้แทนการประเมินความคงทนของอุปกรณ์จากการรบกวน ระดับแอมพลิจูดนำเสนอแทนขีดความรุนแรงต่างๆ จากความเครียดที่เกิดขึ้นจริง

สำหรับรูปคลื่นเสริมเบิรสต์ EFT มีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

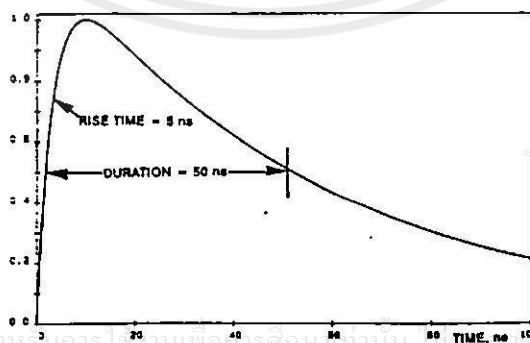
- เวลาช่วงขึ้น (Rise time) : 5 ns  $\pm$  1.5 ns
- คาบเวลาการเกิด (Duration) : 50 ns  $\pm$  1.5 ns

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

IEC 801- 4 (1988) [13] กำหนดช่วงระยะเวลาสำหรับพัลส์แต่ละลูกในเบิรสต์นั้น มีช่วงระยะเวลาเท่ากับ 15 ms  $\pm$  3 ms และอัตราการเกิดซ้ำของพัลส์ภายในแต่ละเบิรสต์นั้น จะถูกกำหนดในฟังก์ชันของแรงดันเบิรสต์สูงสุด ดังนี้

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

คาบของการเกิดเบิรสต์ซ้ำๆ กันเท่ากับ 300 ms  $\pm$  60 ms รูปคลื่นเดี่ยวของ EFT แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงคลื่นเบิรสต์ EFT

สำหรับแอมพลิจูดของรูปคลื่น EFT ได้ถูกกำหนดในเงื่อนไขการเปิดวงจรตามที่ได้ระบุใน IEC 801-4 (1988) แสดงดังตารางที่ 3.6 และตัวกำเนิดรูปคลื่นนี้มีค่าอิมพีแดนซ์กำเนิดเท่ากับ  $50 \Omega$  ตั้งแต่ 1 ถึง 100 MHz จุดประสงค์ของการทดสอบด้วยรูปคลื่นนี้เพื่อการประเมินผลระดับความทนต่อการรบกวนต่างๆ ไม่ใช้การทดสอบความสามารถในการสะสมพลังงาน

ตารางที่ 3.6 ระดับของเบิร์สต์ EFT

| ระดับความทนทาน | 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 $\mu\text{s}$

สำหรับรูปคลื่น 10/1000  $\mu\text{s}$  มีกราฟแสดงดังรูปที่ 3.23 และมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้  
ที่แรงดันเปิดวงจร

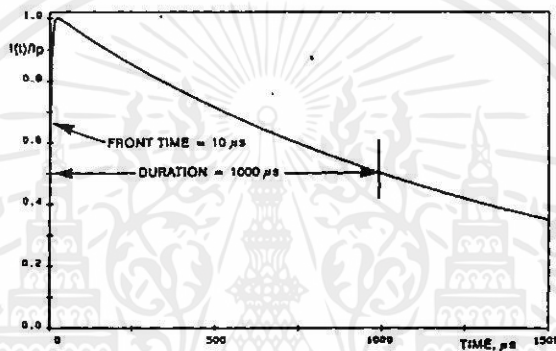
- เวลาหน้าคลื่น (front time) =  $10 \mu\text{s} (+0, -5) \mu\text{s}$
- คาบเวลาการเกิด (Duration) =  $1000 \mu\text{s} (+1000, 0) \mu\text{s}$

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

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  $\mu\text{s}$

แอมพลิจูดของแรงดันเปิดวงจรสูงสุด พิจารณาจากตารางที่ 3.7 โดยมีค่าเพื่อเท่ากับ  $\pm 10\%$

ตารางที่ 3.7 ระดับแรงดันของรูปคลื่น 10/1000  $\mu\text{s}$

| เครื่องต่อหุ้มของระบบ | แรงดันเสิร์จสูงสุด | ค่าอิมพีแดนซ์ |
|-----------------------|--------------------|---------------|
| ต่ำ                   | ไม่มี              | ไม่มี         |
| ปานกลาง               | $1.0 U_{pk}$       | $1.00 \Omega$ |
| สูง                   | $1.3 U_{pk}$       | $0.25 \Omega$ |

แรงดันเสิร์จสูงสุดตามตารางที่ 3.7 นี้เป็นสัดส่วนกับแรงดันสูงสุดของระบบ ( $U_{pk}$ ) ซึ่งค่าแรงดันรวมจะเท่ากับผลรวมของค่าแรงดันในระบบกับแรงดันเสิร์จสูงสุด ยกตัวอย่าง เช่น ค่าแรงดันรวมสูงสุดของระบบที่อุปกรณ์ใดๆ ในระบบ L-N 220 Vrms สำหรับเครื่องต่อหุ้มระดับปานกลางมีค่าดังนี้ ทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$= 622 \text{ V}$$

สำหรับรูปคลื่น 10/1000  $\mu\text{s}$  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

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

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

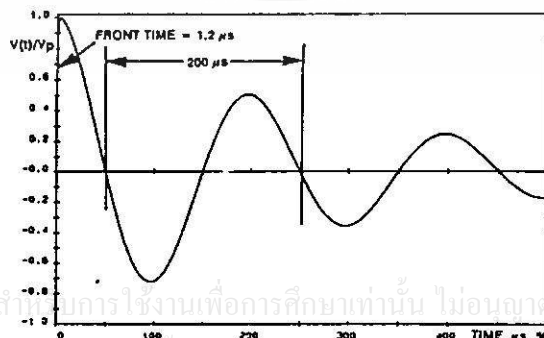
$$A = 1.019$$

### 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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.24 แสดงรูปคลื่นของ 5 kHz Ring wave

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

ตารางที่ 3.8 ระดับแรงดันของรูปคลื่น 10/1000  $\mu\text{s}$

| เครื่องห่อหุ้มของระบบ | แรงดันเล็ร็จสูงสุด | ค่าอิมพีแดนซ์      |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| ต่ำ                   | ไม่มี              | ไม่มี              |
| ปานกลาง               | $1.0 U_{pk}$       | 1 ถึง 5 $\Omega$   |
| สูง                   | $1.8 U_{pk}$       | 0.5 ถึง 1 $\Omega$ |

แรงดันเล็ร็จสูงสุดตามตารางที่ 3.8 นี้เป็นสัดส่วนกับแรงดันสูงสุดของระบบ ( $U_{pk}$ ) ซึ่งค่าแรงดันรวมจะเท่ากับผลรวมของค่าแรงดันในระบบกับแรงดันเล็ร็จสูงสุด ยกตัวอย่าง เช่น ค่าแรงดันรวมสูงสุดของระบบที่อุปกรณ์ใดๆ ในระบบ L-N 120 Vrms สำหรับเครื่องห่อหุ้มระดับสูงมีค่าดังนี้

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

$$= 476 \text{ V}$$

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

$$\tau_1 = 0.7356 \mu\text{s}$$

$$\tau_2 = 280.4 \mu\text{s}$$

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

$$A = 1.027$$

หมายเหตุ  $\tau$  คือ ค่าคงที่ของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ภายใต้การให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น  $V_p$  คือ แรงดันเปิดวงจรสูงสุด และต้องอ้างอิงถึงเข้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

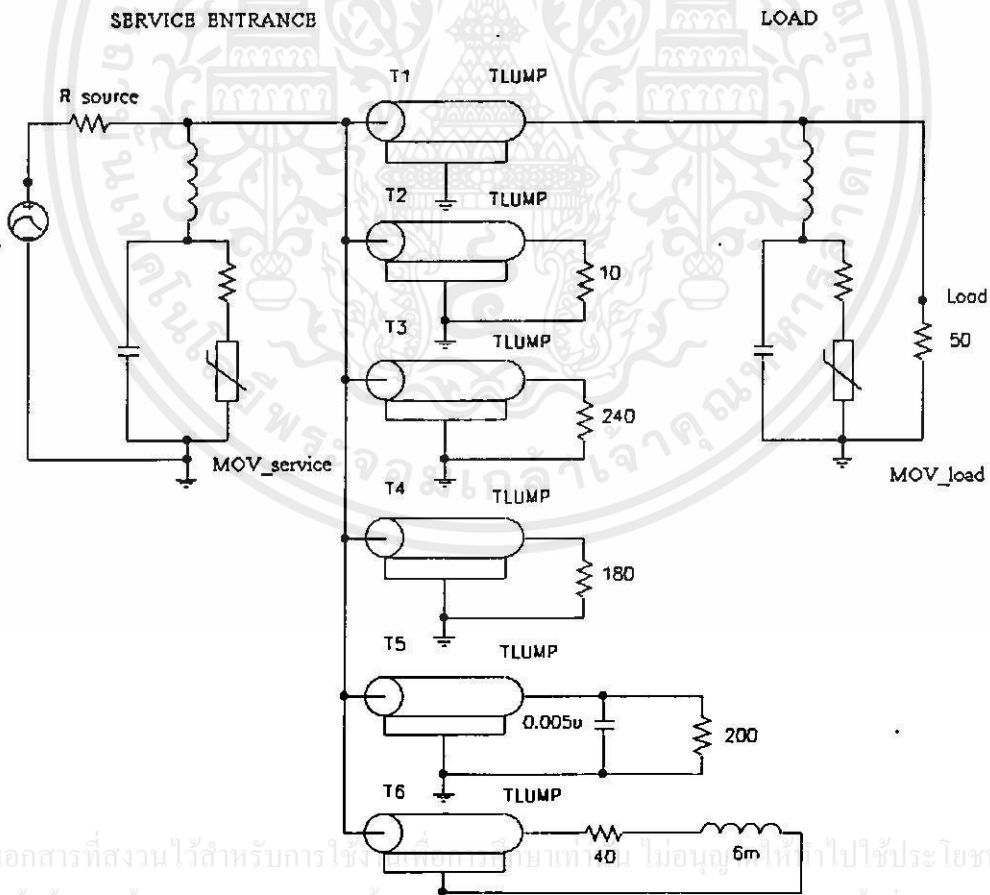
$I_p$  คือ กระแสลัดวงจรสูงสุด

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์เชิงเลข

#### 4.1 การเลียนแบบการทำงาน

การจำลองผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษากการป้องกันเสิร์จต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ภายในอาคารทั่วไปแสดงดังรูปที่ 4.1 ลักษณะรูปจำลองระบบไฟฟ้าภายในอาคารนับตั้งแต่ Service entrance จนถึงโหนดภาระ พิจารณาในรูปของตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีการเชื่อมต่อกันในลักษณะต่างๆ จำลองถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ ภายในอาคารทั่วไป [7] เช่น เครื่องรับโทรทัศน์ หลอดไฟฟ้า เครื่องปรับอากาศ พัดลม และอื่นๆ โดยพิจารณารูปแบบสายส่งไฟฟ้า (Transmission line) เป็นแบบ Cascade lumped RLC มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของค่าความต้านทานเท่ากับ  $0.016 \Omega/m$  ค่าความเหนี่ยวนำของสายเท่ากับ  $0.5 \mu H/m$  และค่าการเก็บประจุของสายเท่ากับ  $50 pF/m$



รูปที่ 4.1 รูปจำลองวงจรในการแสดงผล

อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ (Surge protective device) พิจารณาเลือกใช้เมทอลออกไซด์วาริสเตอร์ เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเนื่องจากได้รับความนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแส สลับแรงดันต่ำและมีราคาไม่แพง มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ

| MODEL     | SIZE<br>(mm) | C<br>(pF) | L<br>(nH) | R<br>(m $\Omega$ ) | V <sub>rms</sub><br>(V) | Energy<br>(J) |
|-----------|--------------|-----------|-----------|--------------------|-------------------------|---------------|
| B80K420   | 80           | 8500      | 30        | -                  | 420                     | 2200          |
| B80K320   | 80           | 11000     | 30        | -                  | 320                     | 1600          |
| B80K275   | 80           | 13000     | 30        | -                  | 275                     | 1400          |
| B80K250   | 80           | 14000     | 30        | -                  | 250                     | 1300          |
| V420LA20A | 14           | 300       | 12        | 24.37              | 420                     | 90            |
| V320LA20A | 14           | 380       | 12        | 18.27              | 320                     | 80            |
| V275LA20A | 14           | 450       | 12        | 15.41              | 275                     | 75            |
| V250LA20A | 14           | 500       | 12        | 13.97              | 250                     | 72            |

ระยะห่างในการติดตั้ง (d) พิจารณาระยะห่างของสายส่งไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเป็น 5 เมตร 10 เมตร และ 20 เมตร ส่วนที่เหลือทั้ง 6 รูปแบบเป็น 10 เมตร

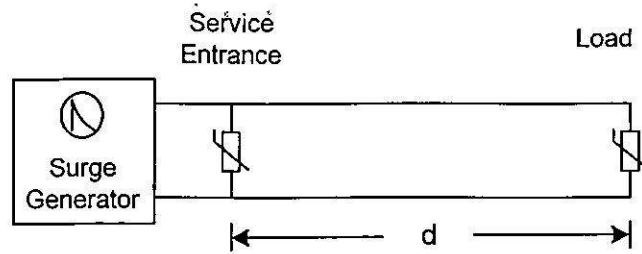
แหล่งกำเนิดเสิร์จ พิจารณารูปคลื่นที่ใช้จำลองรูปคลื่นเสิร์จ 2 แบบ ได้แก่ รูปคลื่นมาตรฐาน 8/20  $\mu$ s 3 kA ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.4 และรูปคลื่นจำลองกระแสไฟฟ้าผ่า 10/350  $\mu$ s 20 kA [5]

#### 4.1.1 เงื่อนไขในการจำลองผล

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลถึงการป้องกันเสิร์จภายในอาคาร ได้แก่

1) ตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ พิจารณาจากสาเหตุการเกิดเสิร์จหรือแหล่งที่มาของเสิร์จได้ดังนี้

1.1) เสิร์จจากภายนอก ส่วนใหญ่จะมาจากความผิดปกติของสภาวะภายนอกได้แก่ ไฟฟ้า มีวงจรถ่วงอย่างง่ายดังรูปที่ 4.2 พิจารณารูปคลื่นของแหล่งกำเนิดเสิร์จเป็น 8/20  $\mu$ s 3 kA และ 10/350  $\mu$ s 20 kA จำลองผลตามวงจรรูป 4.1 ด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 4.2 โดยมีระยะห่างของการติดตั้งเท่ากับ 5, 10, 20 เมตร เลือกใช้อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance เป็น B80K320 และที่ Load เป็น V250LA20A

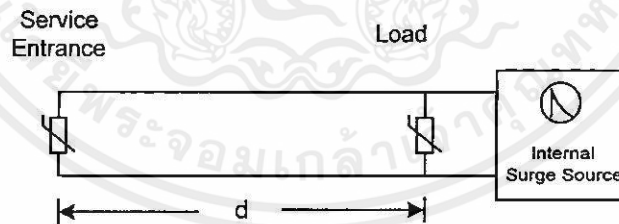


รูปที่ 4.2 วงจรจำลองอย่างง่ายเมื่อมีเสิร์จจากภายนอก

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการติดตั้งอุปกรณ์ ขัดเสิร์จ

| สถานที่ติดตั้ง   | กรณีที่ |   |
|------------------|---------|---|
|                  | 1       | 2 |
| Service Entrance | ✓       | ✓ |
| Load             | -       | ✓ |

1.2) เสิร์จจากภายใน เป็นสาเหตุที่มากจากการเปิดหรือปิดสวิตช์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในระบบมีวงจรจำลองอย่างง่ายดังรูปที่ 4.3 พิจารณารูปคลื่นของแหล่งกำเนิดเสิร์จเป็น  $8/20 \mu\text{s}$  3 kA จำลองผลตามวงจรรูป 4.4 มีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายในอาคารห่างจากโหลด  $50 \Omega$  เท่ากับ 10 เมตร ด้วยเงื่อนไขตามตาราง 4.2 โดยมีระยะห่างของการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร เลือกใช้อุปกรณ์ขัดเสิร์จที่ Service entrance เป็น B80K320 และที่ Load เป็น V250LA20A



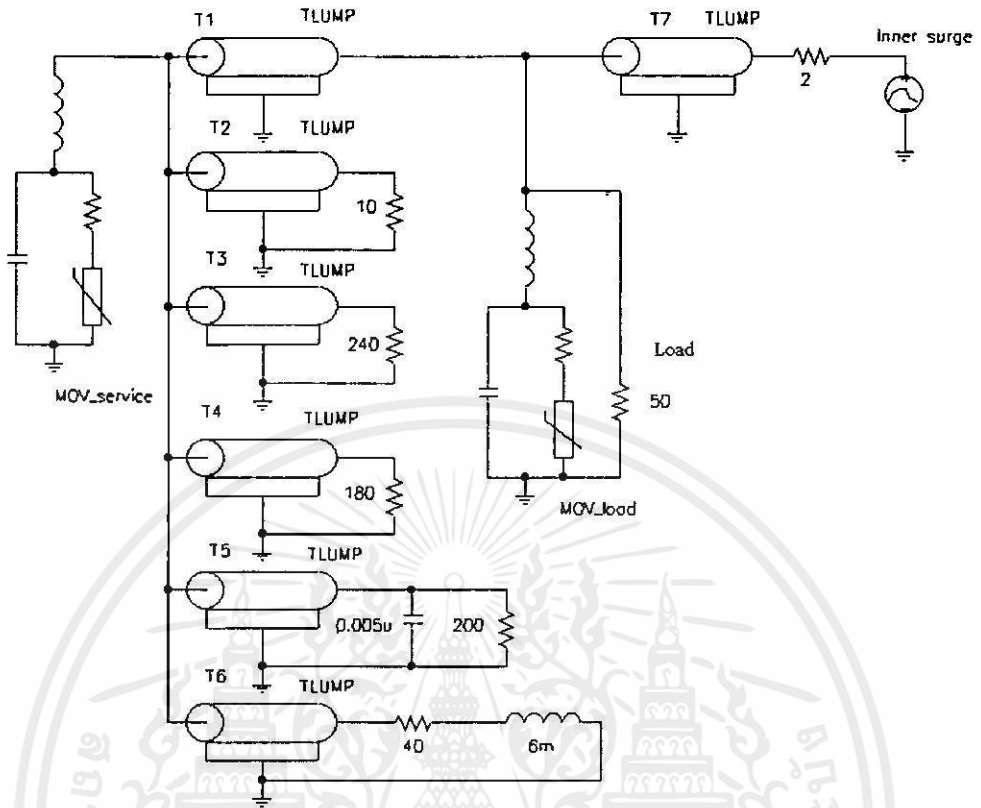
รูปที่ 4.3 วงจรจำลองอย่างง่ายเมื่อมีเสิร์จจากภายใน

2) ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขัดเสิร์จที่ Service Entrance และ Load พิจารณาระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขัดเสิร์จที่ 5 เมตร 10 เมตร และ 20 เมตร รูปคลื่นของแหล่งกำเนิดเสิร์จเป็น  $8/20 \mu\text{s}$  3 kA และ  $10/350 \mu\text{s}$  20 kA ทำการจำลองตามวงจรในรูปที่ 4.1 เลือกใช้อุปกรณ์ขัดเสิร์จที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเงื่อนไขตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SERVICE ENTRANCE

LÓÁD



รูปที่ 4.4 วงจรในการจำลองผลสำหรับเสิร์จจากภายใน

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขของระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ

| กรณีที่ | อุปกรณ์ขจัดเสิร์จ |           | ระยะการติดตั้ง |
|---------|-------------------|-----------|----------------|
|         | Service Entrance  | Load      |                |
| 1       |                   | V320LA20A | 5 , 10 , 20 m. |
| 2       | B80K420           | V275LA20A |                |
| 3       |                   | V250LA20A |                |
| 4       |                   | V420LA20A |                |
| 5       | B80K320           | V275LA20A |                |
| 6       |                   | V250LA20A |                |
| 7       |                   | V420LA20A |                |
| 8       | B80K275           | V320LA20A |                |
| 9       |                   | V250LA20A |                |
| 10      |                   | V420LA20A |                |
| 11      | B80K250           | V320LA20A |                |
| 12      |                   | V275LA20A |                |

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ให้คัดแปลงเนื้อหา และแจ้งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ (Coordination of surge suppressors) เพื่อการป้องกันเสิร์จอย่างมีประสิทธิภาพ เลือกใช้อุปกรณ์ขจัดเสิร์จทั้งหมด 8 โมเดล จำลองการทำงานร่วมกันที่ Service entrance และ Load ทั้งหมด 12 กรณี ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ “High-Low” และ “Low-High” รูปคลื่นของแหล่งกำเนิดเสิร์จเป็น  $8/20 \mu\text{s}$  3 kA และ  $10/350 \mu\text{s}$  20 kA ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเป็น 5 เมตร 10 เมตรและ 20 เมตร โดยจำลองผลตามวงจรดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขของการใช้อุปกรณ์ ขจัดเสิร์จในการทำงานร่วมกัน

| กรณีที่ | รูปแบบ   | อุปกรณ์ขจัดเสิร์จ |           |
|---------|----------|-------------------|-----------|
|         |          | Service Entrance  | Load      |
| 1       | High-low | B80K420           | V320LA20A |
| 2       |          |                   | V275LA20A |
| 3       |          |                   | V250LA20A |
| 4       |          | B80K320           | V275LA20A |
| 5       |          |                   | V250LA20A |
| 6       |          |                   | V250LA20A |
| 7       | Low-High | B80K275           | V420LA20A |
| 8       |          |                   | V320LA20A |
| 9       |          |                   | V275LA20A |
| 10      |          | B80K275           | V420LA20A |
| 11      |          |                   | V320LA20A |
| 12      |          |                   | V420LA20A |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลลัพธ์การเลียนแบบเชิงเลข

บทนี้นำเสนอผลการเลียนแบบการทำงานของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาผลของตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ ระยะการติดตั้ง อุปกรณ์ขจัดเสิร์จ ผลของรูปคลื่นเสิร์จและขนาดในการป้องกัน รวมถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันเมื่อนำมาติดตั้งร่วมกัน (Coordination) ซึ่งมีผลต่อการป้องกันระบบจากเสิร์จ โดยแบ่งหัวข้อที่ทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

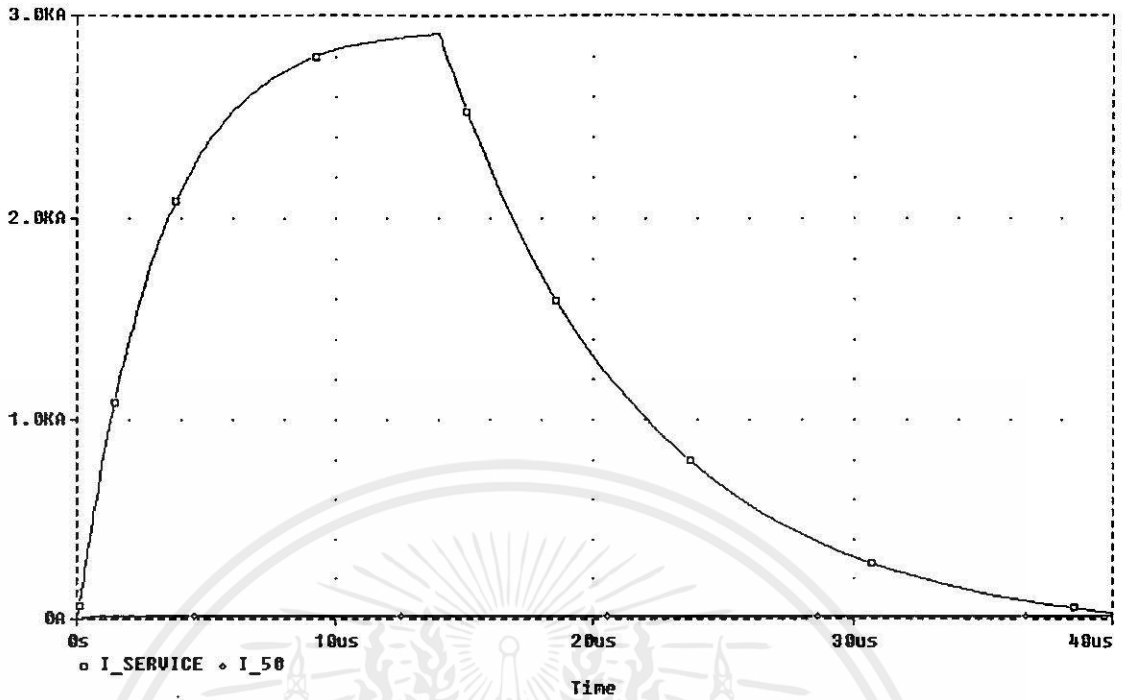
### 4.2.1 ผลของตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ

4.2.1.1 การป้องกันเสิร์จจากภายนอก ที่มีลักษณะรูปคลื่นเป็น  $8/20 \mu\text{s}$  3 kA การติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จทั้งที่ Service entrance และ Load ก่อให้เกิดการป้องกันที่ดีที่สุด

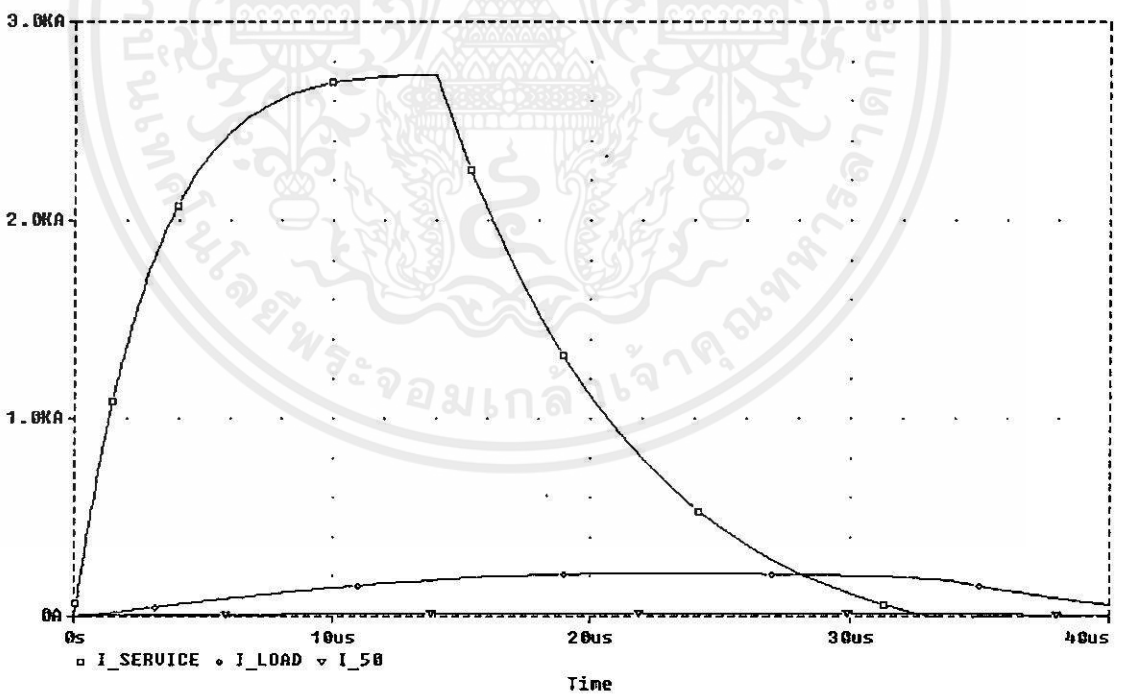
ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5 - 4.6 แสดงผลการเลียนแบบการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จและโหลด  $50 \Omega$  รวมทั้งพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จด้วยรูปคลื่น  $8/20 \mu\text{s}$  3 kA พิจารณาระยะในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตร เลือกใช้อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance เป็น B80K320 และที่ Load เป็น V250LA20A จากผลการเลียนแบบการทำงานแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance เป็นตัวขจัดเสิร์จส่วนใหญ่ออกจากระบบและการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเพิ่มเข้าที่ Load จะทำให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าเข้าที่โหลดภาระ  $50 \Omega$  ลดลง

ตารางที่ 4.5 ผลการเลียนแบบด้วยคลื่น  $8/20 \mu\text{s}$  3 kA แสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดและพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ระยะการติดตั้ง 5 10 และ 20 เมตร เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายนอก

| ระยะการติดตั้ง | กรณีที่ | แรงดันไฟฟ้า (V)  |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |        |             | พลังงานสะสม (J)  |      |
|----------------|---------|------------------|--------|----------------------|--------|-------------|------------------|------|
|                |         | Service entrance | Load   | Service entrance     | Load   | $50 \Omega$ | Service entrance | Load |
| 5              | 1       | 756.92           | -      | 2,908.60             | -      | 15.11       | 38.46            | -    |
|                | 2       | 741.09           | 629.33 | 2,407.20             | 561.67 | 12.59       | 28.27            | 8.57 |
| 10             | 1       | 756.94           | -      | 2,909.30             | -      | 15.08       | 38.49            | -    |
|                | 2       | 747.19           | 599.84 | 2,596.40             | 361.25 | 11.99       | 31.60            | 5.70 |
| 20             | 1       | 756.98           | -      | 2,910.80             | -      | 15.02       | 38.56            | -    |
|                | 2       | 751.31           | 571.86 | 2,731.00             | 217.81 | 11.44       | 34.23            | 3.55 |

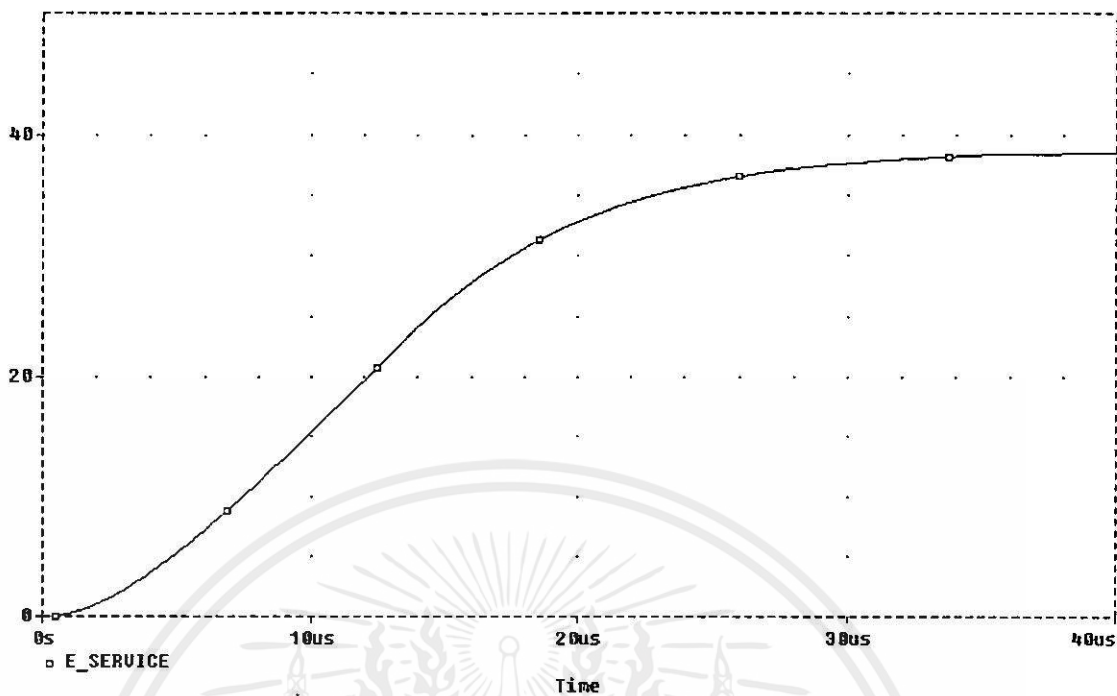


(a) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance และ 50 Ω (กรณีที่ 1)

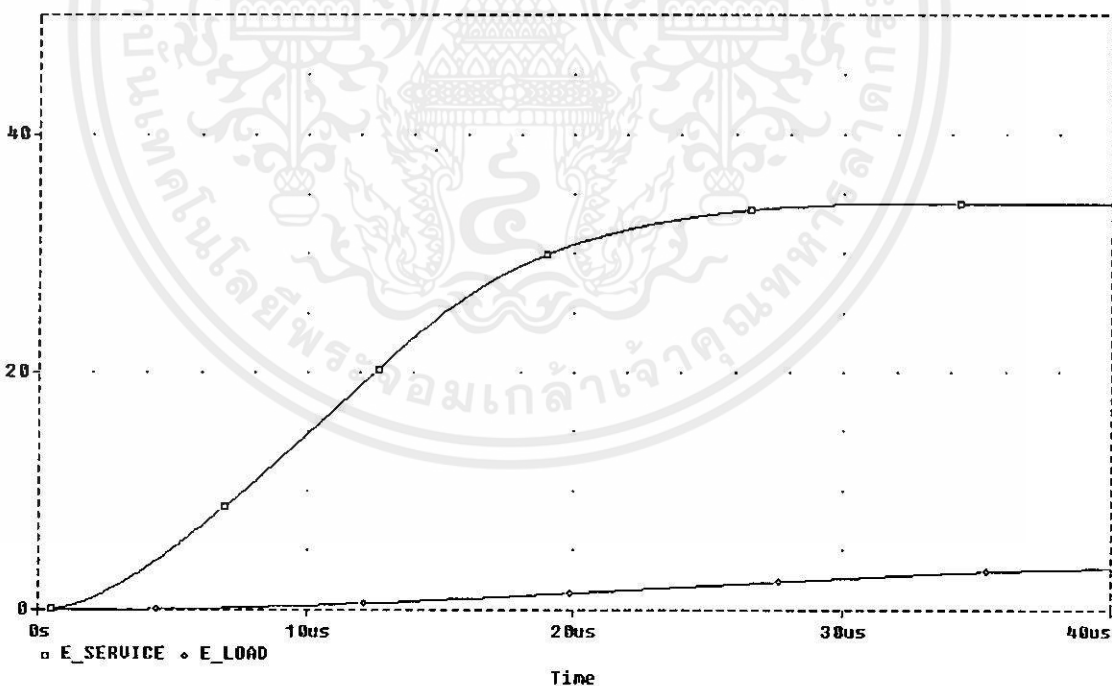


(b) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance ที่โหลดและ 50 Ω (กรณีที่ 2)

เอกสารที่ 4.5 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตรด้วยรูปคลื่น 8/20 μs  
รูปที่ 4.5 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตรด้วยรูปคลื่น 8/20 μs  
3 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายนอก



(a) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance (กรณีที่ 1)



(b) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service Entrance และที่โหลด (กรณีที่ 2)

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนและพลังงานสะอาดของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 รูปที่ 4.6 ผลการเลียนแบบพลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร  
 ด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายนอก

4.2.1.2 การป้องกันลัดวงจรจากภายนอก ที่มีลักษณะรูปคลื่นเป็น 10/350  $\mu$ s 20 kA การติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จทั้งที่ Service entrance และ Load ก่อให้เกิดการป้องกันที่ดีที่สุด

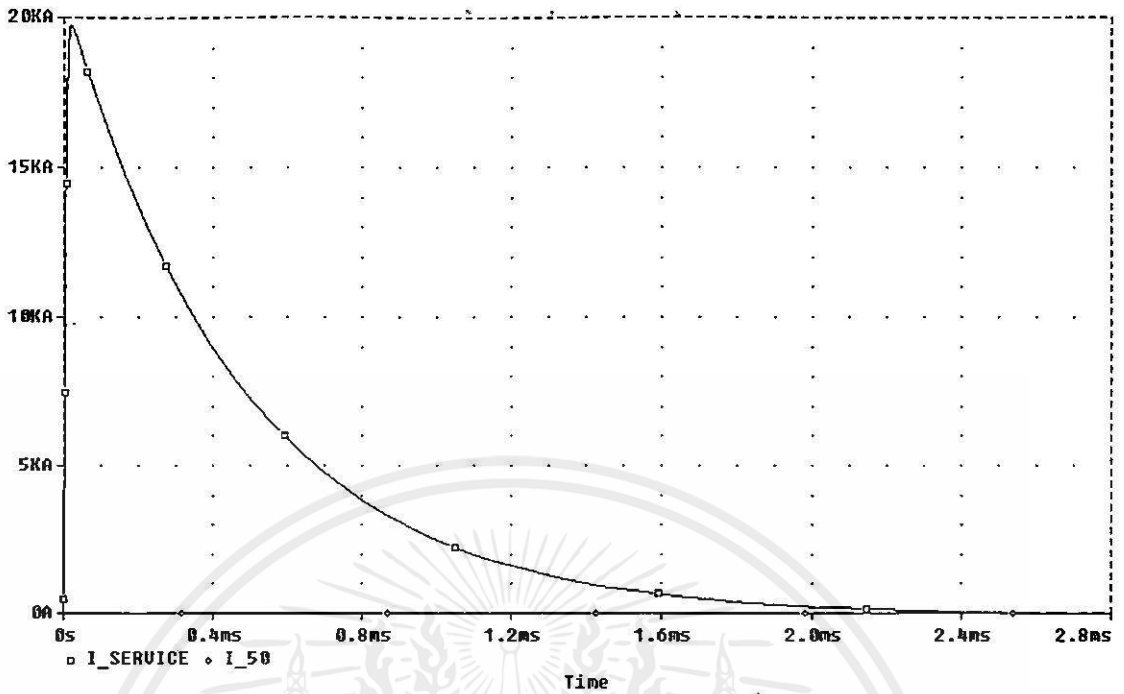
ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 - 4.8 แสดงผลการเลียนแบบการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จและโหลด 50  $\Omega$  รวมทั้งพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จด้วยรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s 20 kA พิจารณาระยะในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตร เลือกใช้อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance เป็น B80K320 และที่ Load เป็น V250LA20A จากผลการเลียนแบบการทำงานแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance เป็นตัวขจัดเสิร์จส่วนใหญ่ออกจากระบบและการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเพิ่มเข้าที่ Load จะทำให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าเข้าที่โหลดภาระ 50  $\Omega$  ลดลง

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับรูป 4.5 และ 4.6 พบว่าผลการเลียนแบบด้วยรูปคลื่นทั้ง 2 สอดคล้องกันถึงแม้ว่ารูปคลื่น 10/350  $\mu$ s มีคาบเวลาการเกิดที่ยาวกว่า

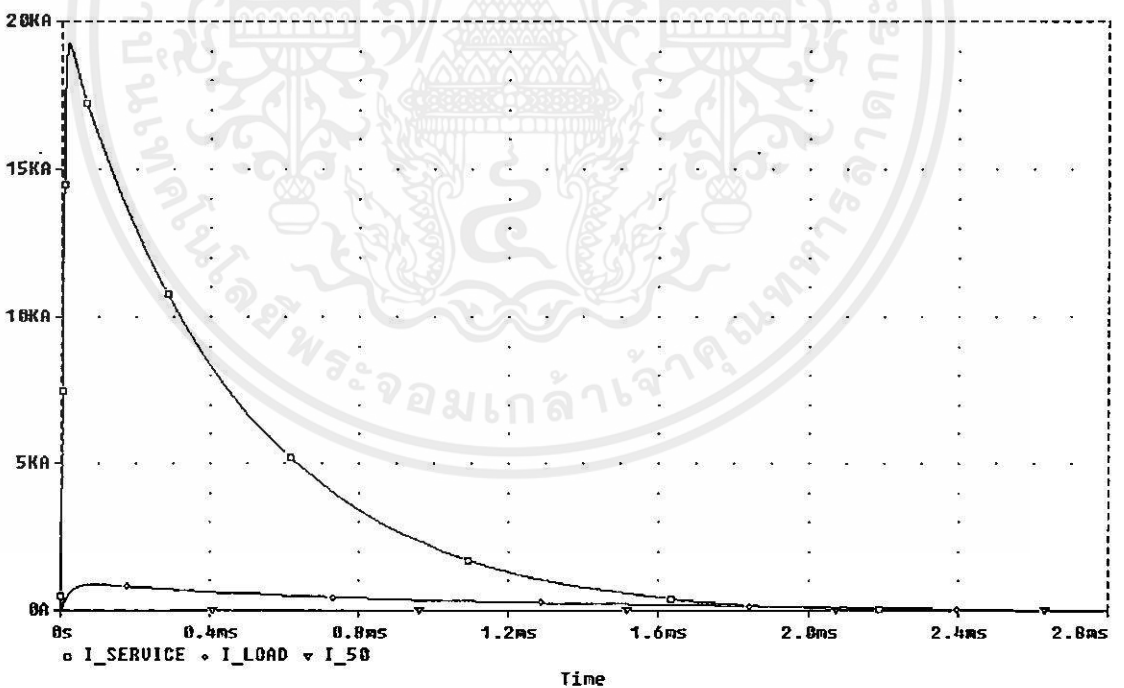
ตารางที่ 4.6 ผลการเลียนแบบด้วยคลื่น 10/350  $\mu$ s 20 kA แสดงในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าสูงสุดและพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ระยะการติดตั้ง 5 10 และ 20 เมตร เมื่อมีแหล่งกำเนิดลัดวงจรจากภายนอก

| ระยะการติดตั้ง | กรณีที่ | แรงดันไฟฟ้า (V)  |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |          |             | พลังงานสะสม (J)  |          |
|----------------|---------|------------------|--------|----------------------|----------|-------------|------------------|----------|
|                |         | Service entrance | Load   | Service entrance     | Load     | 50 $\Omega$ | Service entrance | Load     |
| 5              | 1       | 1,047.80         | -      | 19,770.00            | -        | 20.92       | 8,633.80         | -        |
|                | 2       | 1,028.90         | 773.00 | 18,255.00            | 2,275.50 | 15.46       | 6,860.20         | 1,289.70 |
| 10             | 1       | 1,047.80         | -      | 19,768.00            | -        | 20.88       | 8,636.60         | -        |
|                | 2       | 1,036.60         | 719.87 | 18,893.00            | 1,502.70 | 14.39       | 7,401.40         | 857.39   |
| 20             | 1       | 1,047.80         | -      | 19,775.00            | -        | 20.80       | 8,639.80         | -        |
|                | 2       | 1,042.10         | 664.48 | 19,292.00            | 868.83   | 13.29       | 7,852.90         | 522.79   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



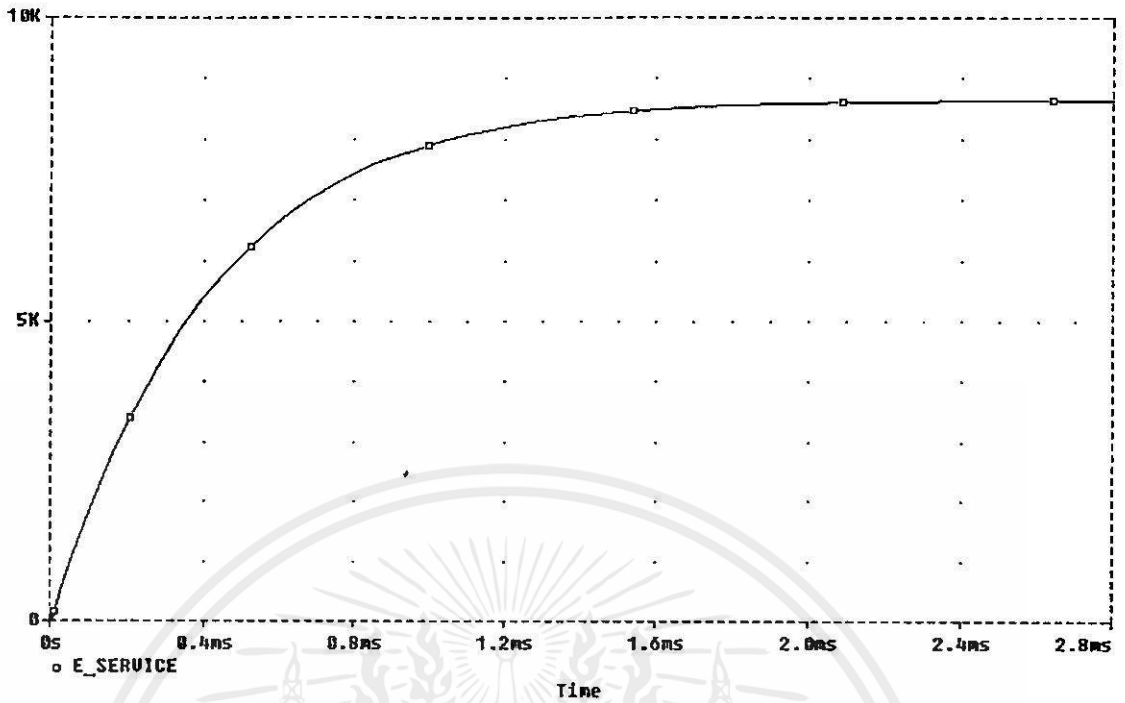
(a) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance และ 50  $\Omega$  (กรณีที่ 1)



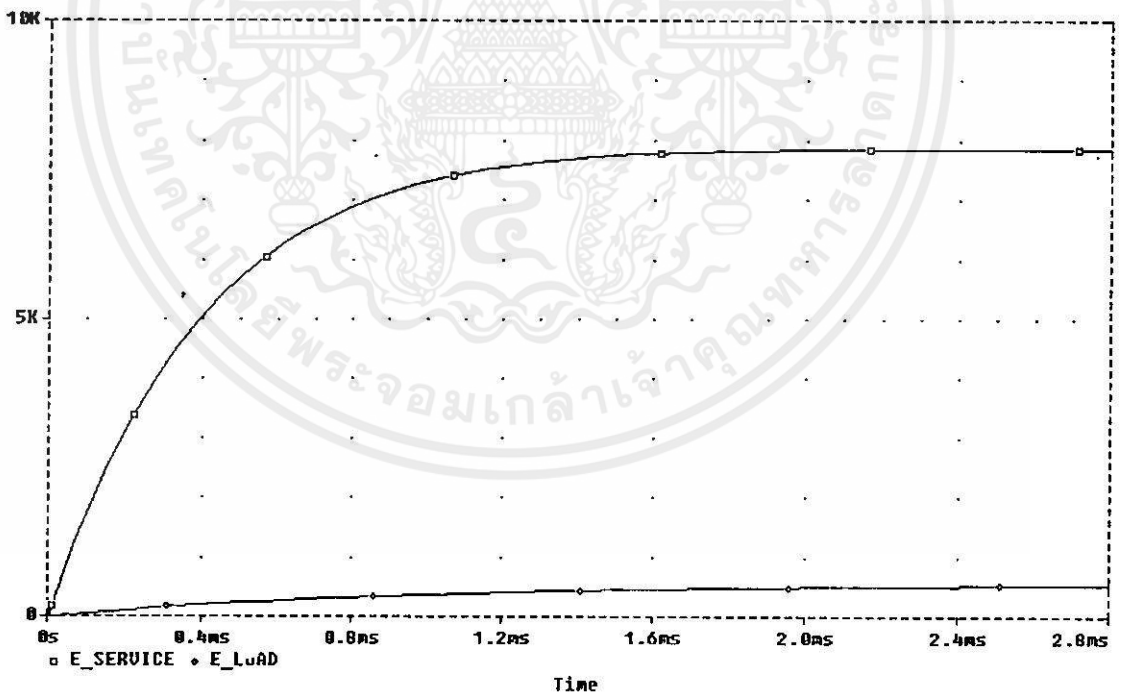
(b) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance ที่โหลดและ 50  $\Omega$  (กรณีที่ 2)

รูปที่ 4.7 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตรด้วยรูปคลื่น 10/350

$\mu$ s 20 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายนอก



(a) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์ฟที่ Service entrance (กรณีที่ 1)



(b) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์ฟที่ Service Entrance และที่โหลด (กรณีที่ 2)

รูปที่ 4.8 ผลการเลียนแบบพลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์ฟที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร

ด้วยรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s 20 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์ฟจากภายนอก

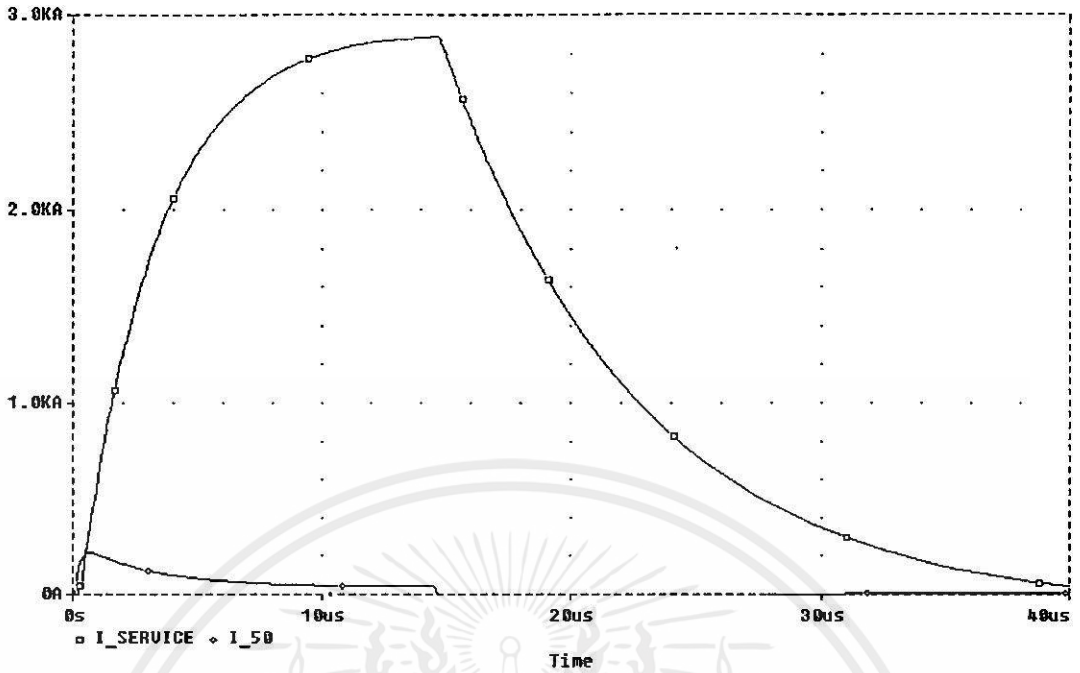
4.2.1.3 การป้องกันลัดวงจรจากภายใน จำลองด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA การติดตั้งอุปกรณ์ขจัดลัดวงจรที่ Load จะก่อให้เกิดการป้องกันที่ดีกว่าการป้องกันที่ Service entrance เพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 – 4.10 แสดงผลการเลียนแบบการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดลัดวงจรในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ขจัดลัดวงจรและโหลด 50  $\Omega$  รวมทั้งพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดลัดวงจรด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA พิจารณาระยะในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดลัดวงจรเท่ากับ 20 เมตร จำลองผลตามวงจรรูป 4.4 มีแหล่งกำเนิดลัดวงจรจากภายในอาคารห่างจากโหลด 50  $\Omega$  เท่ากับ 10 เมตร เลือกใช้อุปกรณ์ขจัดลัดวงจรที่ Service entrance เป็น B80K320 และที่ Load เป็น V250LA20A จากผลการเลียนแบบการทำงานแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์ขจัดลัดวงจรที่ Service entrance ไม่มีประสิทธิภาพในการขจัดลัดวงจรจากภายในแต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ขจัดลัดวงจรเพิ่มเข้าที่ Load จะพบว่าสามารถขจัดลัดวงจรจากภายในออกจากระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

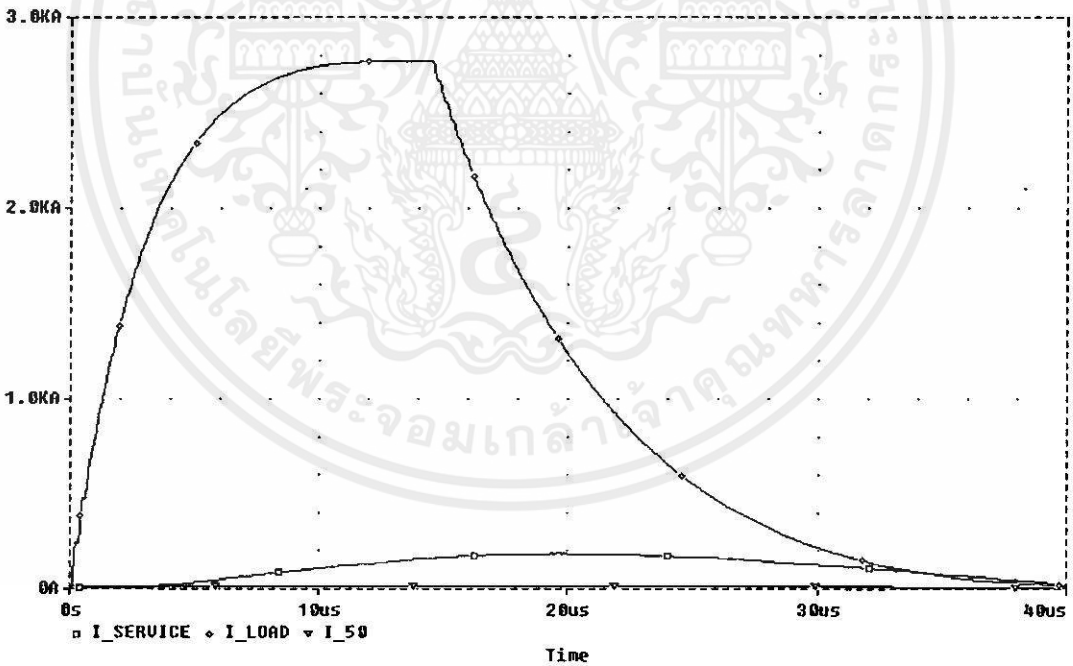
ตารางที่ 4.7 ผลการเลียนแบบด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA แสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่อุปกรณ์ขจัดลัดวงจรที่ระยะการติดตั้ง 20 เมตร เมื่อมีแหล่งกำเนิดลัดวงจรจากภายใน

| ระยะการติดตั้ง | กรณีที่ | แรงดันไฟฟ้า (V)  |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |          |             | พลังงานสะสม (J)  |       |
|----------------|---------|------------------|--------|----------------------|----------|-------------|------------------|-------|
|                |         | Service entrance | Load   | Service entrance     | Load     | 50 $\Omega$ | Service entrance | Load  |
| 20             | 1       | 756.33           | -      | 2,891.00             | -        | 217.42      | 39.31            | -     |
|                | 2       | 619.187          | 802.59 | 184.90               | 2,770.80 | 16.83       | 2.70             | 38.18 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance และ 50 Ω (กรณีที่ 1)

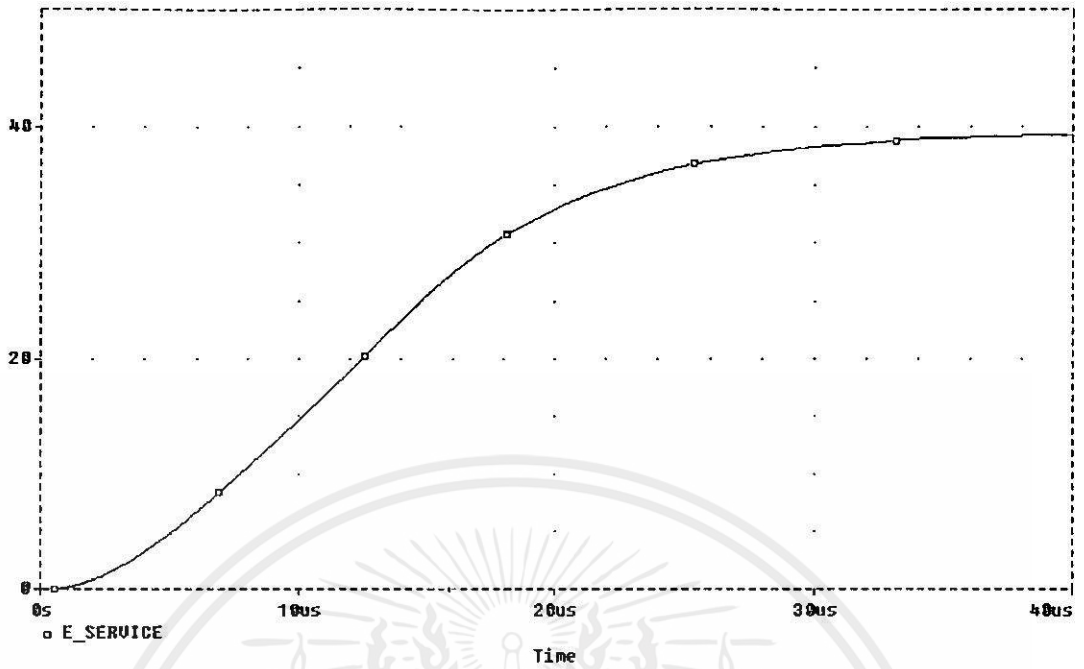


(b) กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance ที่โหลดและ 50 Ω (กรณีที่ 2)

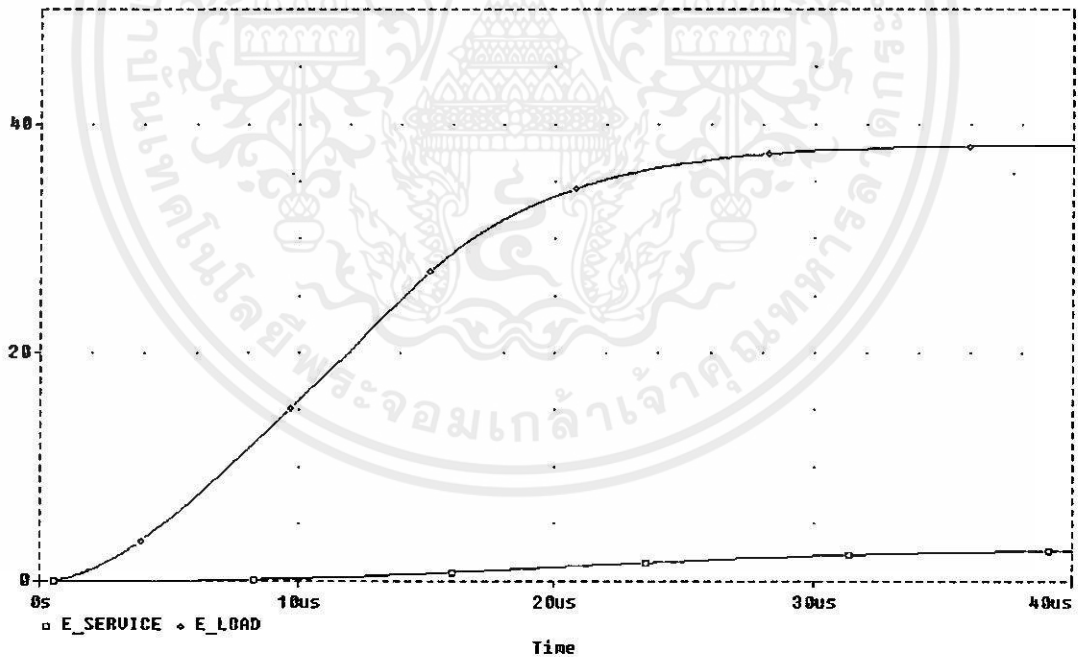
รูปที่ 4.9 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตรด้วยรูปคลื่น 8/20 μs

3 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโทษคดีละเมิดลิขสิทธิ์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance (กรณีที่ 1)



(b) พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service Entrance และที่โหลด (กรณีที่ 2)

รูปที่ 4.10 ผลการเลียนแบบพลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร

ด้วยรูปคลื่น 8/20 μs 3 kA เมื่อมีแหล่งกำเนิดเสิร์จจากภายใน

## 4.2.2 ผลของระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service Entrance และ Load

4.2.2.1 ระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จที่เพิ่มขึ้นทำให้การป้องกันระบบดีขึ้น ที่รูปคลื่นเสิร์จ 8/20  $\mu$ s 3 kA

ตารางที่ 4.8 – 4.10 และรูปที่ 4.11 – 4.14 แสดงผลการเลียนแบบการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ระยะระหว่าง Service entrance และ load เท่ากับ 5 10 และ 20 เมตรตามลำดับ เลือกใช้อุปกรณ์จัดเสิร์จ Service entrance และ load ตามตารางที่ 4.3 ทำการจำลองในวงจรตามรูปที่ 4.1 ผลการเลียนแบบแสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสม เปรียบเทียบกันที่ระยะต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้าที่ 50  $\Omega$  มีค่าลดลงเมื่อระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จเพิ่มขึ้น และในกรณีที่ 6 (ติดตั้ง B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load) พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน 50  $\Omega$  ลดลงมากเมื่อระยะติดตั้งเพิ่มจาก 5 เป็น 20 เมตร เช่นเดียวกับกรณีที่ 11 (ติดตั้ง B80K250 ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load)

ตารางที่ 4.8 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และ load ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 เมตร ด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA

| ระยะการติดตั้ง | อุปกรณ์จัดเสิร์จ |           | แรงดันไฟฟ้า (V)  |          | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |          |             | พลังงานสะสม (J)  |        |
|----------------|------------------|-----------|------------------|----------|----------------------|----------|-------------|------------------|--------|
|                | Service entrance | Load      | Service entrance | Load     | Service entrance     | Load     | 50 $\Omega$ | Service entrance | Load   |
| 5              | B80K420          | V320LA20A | 981.94           | 844.92   | 2,256.50             | 699.04   | 16.89       | 34.23            | 13.390 |
|                |                  | V275LA20A | 971.52           | 754.24   | 2,028.90             | 1,071.60 | 15.09       | 28.39            | 16.390 |
|                |                  | V250LA20A | 966.09           | 701.99   | 1,919.10             | 1,277.30 | 14.04       | 25.75            | 17.090 |
|                | B80K320          | V420LA20A | 756.85           | 755.29   | 2,907.60             | 1.68     | 15.11       | 38.45            | 0.008  |
|                |                  | V275LA20A | 745.12           | 667.45   | 2,533.10             | 394.79   | 13.35       | 31.12            | 6.450  |
|                |                  | V250LA20A | 741.09           | 629.33   | 2,407.20             | 561.67   | 12.59       | 28.27            | 8.572  |
|                | B80K275          | V420LA20A | 637.85           | 636.63   | 2,924.70             | 1.41     | 12.73       | 32.78            | 0.001  |
|                |                  | V320LA20A | 637.44           | 634.15   | 2,907.90             | 16.97    | 12.68       | 32.66            | 0.137  |
|                |                  | V250LA20A | 631.32           | 580.54   | 2,672.80             | 257.61   | 11.61       | 28.83            | 3.530  |
| B80K250        | V420LA20A        | 579.35    | 578.24           | 2,932.70 | 1.42                 | 11.56    | 29.93       | 0.001            |        |
|                | V320LA20A        | 579.32    | 578.00           | 2,930.90 | 1.75                 | 11.55    | 29.92       | 0.011            |        |
|                | V275LA20A        | 578.14    | 569.09           | 2,879.00 | 53.64                | 11.38    | 29.43       | 0.451            |        |

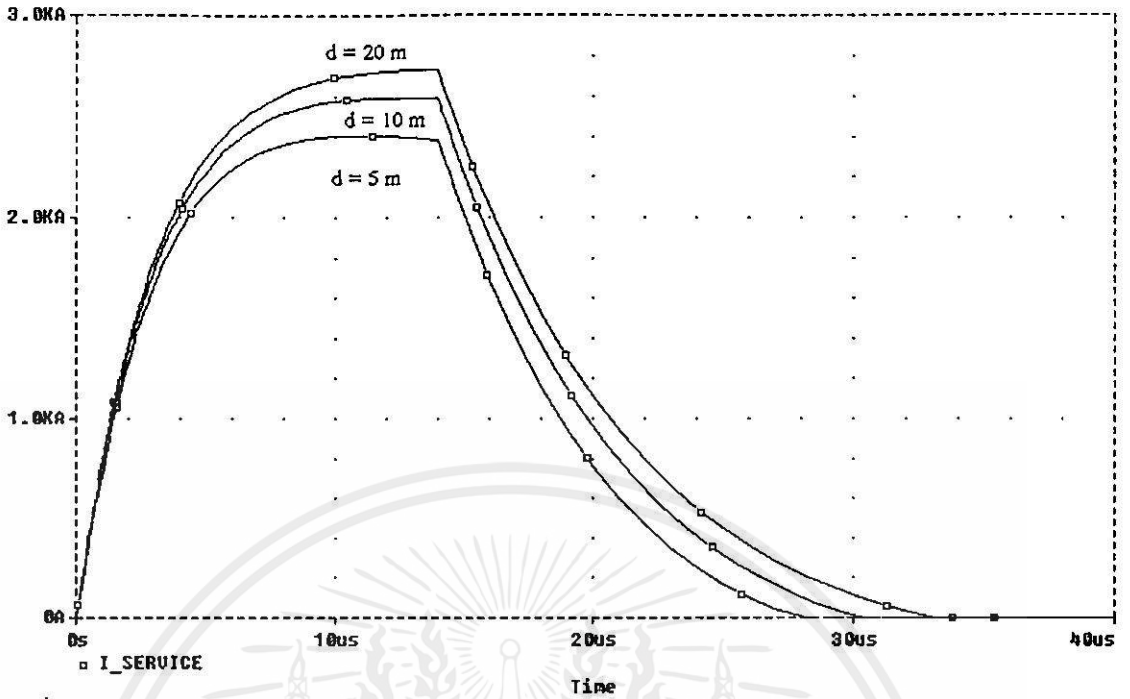
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และ load ที่  
ระยะการติดตั้งเท่ากับ 10 เมตร ด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA

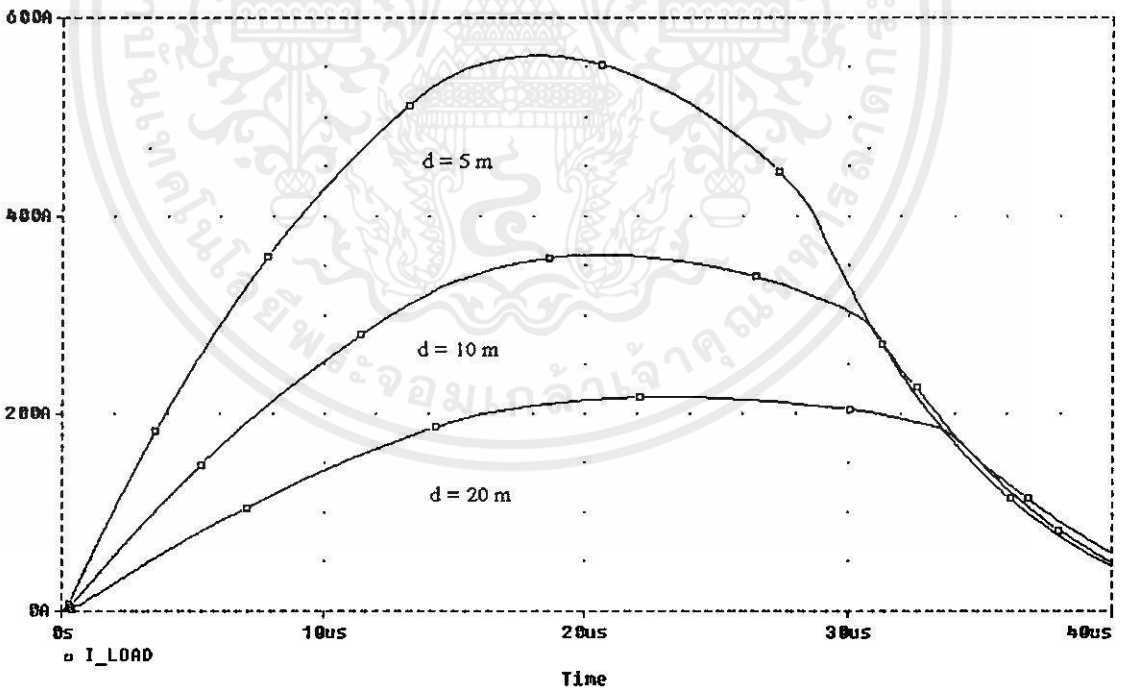
| ระยะ<br>การ<br>ติดตั้ง | อุปกรณ์ขจัดเล็ร้ง   |           | แรงดันไฟฟ้า (V)     |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |        |             | พลังงานสะสม (J)     |        |
|------------------------|---------------------|-----------|---------------------|--------|----------------------|--------|-------------|---------------------|--------|
|                        | Service<br>entrance | Load      | Service<br>entrance | Load   | Service<br>entrance  | Load   | 50 $\Omega$ | Service<br>entrance | Load   |
| 10                     | B80K420             | V320LA20A | 991.67              | 804.86 | 2,480.00             | 461.18 | 16.09       | 39.19               | 9.090  |
|                        |                     | V275LA20A | 985.81              | 710.71 | 2,343.20             | 685.61 | 14.21       | 35.36               | 10.910 |
|                        |                     | V250LA20A | 982.85              | 658.26 | 2,275.90             | 808.79 | 13.17       | 33.57               | 11.350 |
|                        | B80K320             | V420LA20A | 756.89              | 753.75 | 2,908.40             | 1.32   | 15.08       | 38.49               | 0.007  |
|                        |                     | V275LA20A | 749.46              | 640.92 | 2,669.90             | 261.15 | 12.82       | 33.35               | 4.470  |
|                        |                     | V250LA20A | 747.19              | 599.84 | 2,596.40             | 361.25 | 11.99       | 31.60               | 5.700  |
|                        | B80K275             | V420LA20A | 637.88              | 635.42 | 2,925.40             | 1.20   | 12.71       | 32.81               | 0.001  |
|                        |                     | V320LA20A | 637.49              | 630.81 | 2,910.30             | 15.19  | 12.62       | 32.69               | 0.124  |
|                        |                     | V250LA20A | 633.61              | 560.62 | 2,762.90             | 172.39 | 11.21       | 29.94               | 2.550  |
|                        | B80K250             | V420LA20A | 579.37              | 577.14 | 2,933.30             | 1.04   | 11.54       | 29.95               | 0.001  |
|                        |                     | V320LA20A | 579.33              | 576.72 | 2,931.60             | 1.65   | 11.53       | 29.94               | 0.010  |
|                        |                     | V275LA20A | 578.40              | 561.12 | 2,891.40             | 42.30  | 11.22       | 29.534              | 0.375  |

ตารางที่ 4.10 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และ load ที่  
ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร ด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA

| ระยะ<br>การ<br>ติดตั้ง | อุปกรณ์ขจัดเล็ร้ง   |           | แรงดันไฟฟ้า (V)     |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |        |             | พลังงานสะสม (J)     |       |
|------------------------|---------------------|-----------|---------------------|--------|----------------------|--------|-------------|---------------------|-------|
|                        | Service<br>entrance | Load      | Service<br>entrance | Load   | Service<br>entrance  | Load   | 50 $\Omega$ | Service<br>entrance | Load  |
| 20                     | B80K420             | V320LA20A | 998.70              | 756.80 | 2,643.40             | 282.82 | 15.32       | 43.23               | 5.760 |
|                        |                     | V275LA20A | 995.40              | 670.30 | 2,564.80             | 411.11 | 13.41       | 40.87               | 6.850 |
|                        |                     | V250LA20A | 993.85              | 658.26 | 2,525.60             | 481.16 | 12.37       | 39.74               | 7.120 |
|                        | B80K320             | V420LA20A | 756.96              | 750.72 | 2,910.00             | 1.23   | 15.01       | 38.55               | 0.006 |
|                        |                     | V275LA20A | 752.58              | 614.69 | 2,771.40             | 160.96 | 12.29       | 35.26               | 2.850 |
|                        |                     | V250LA20A | 751.31              | 571.86 | 2,731.00             | 217.81 | 11.44       | 34.23               | 3.550 |
|                        | B80K275             | V420LA20A | 637.91              | 633.01 | 2,926.60             | 1.06   | 12.66       | 32.85               | 0.001 |
|                        |                     | V320LA20A | 637.60              | 624.49 | 2,914.60             | 12.25  | 12.49       | 32.74               | 0.102 |
|                        |                     | V250LA20A | 635.38              | 540.48 | 2,830.40             | 107.28 | 10.81       | 30.97               | 1.670 |
|                        | B80K250             | V420LA20A | 579.40              | 574.96 | 2,934.40             | 0.97   | 11.50       | 29.98               | 0.001 |
|                        |                     | V320LA20A | 579.37              | 574.21 | 2,932.90             | 1.45   | 11.48       | 29.98               | 0.009 |
|                        |                     | V275LA20A | 578.71              | 550.01 | 2,905.40             | 29.60  | 11.00       | 29.68               | 0.283 |

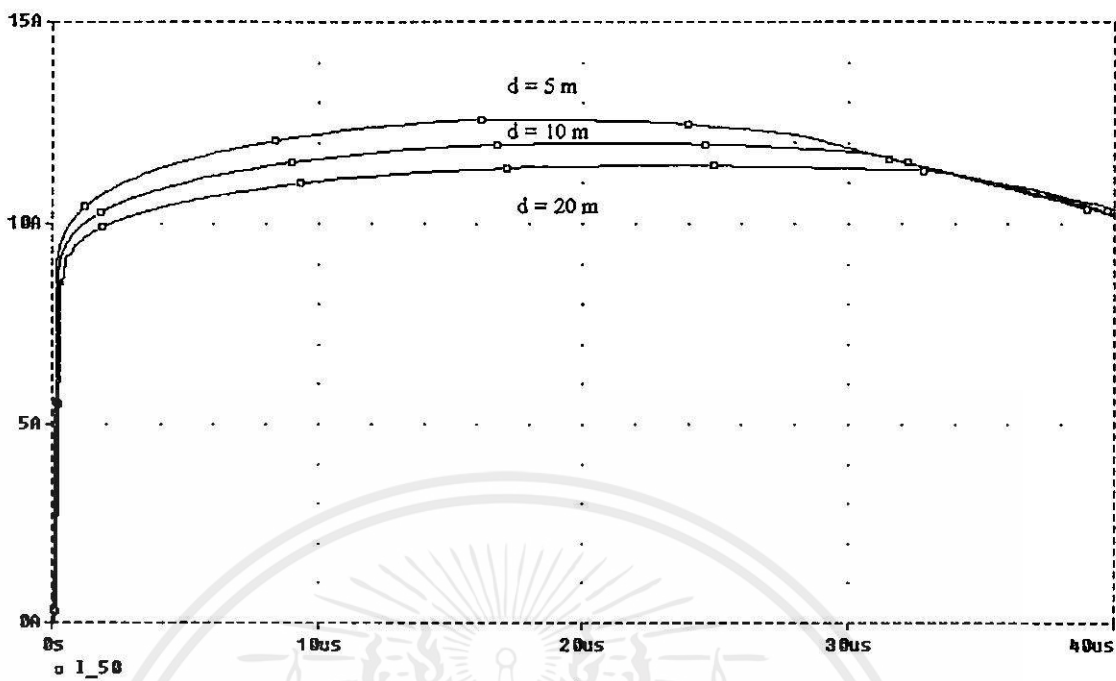


(a) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance

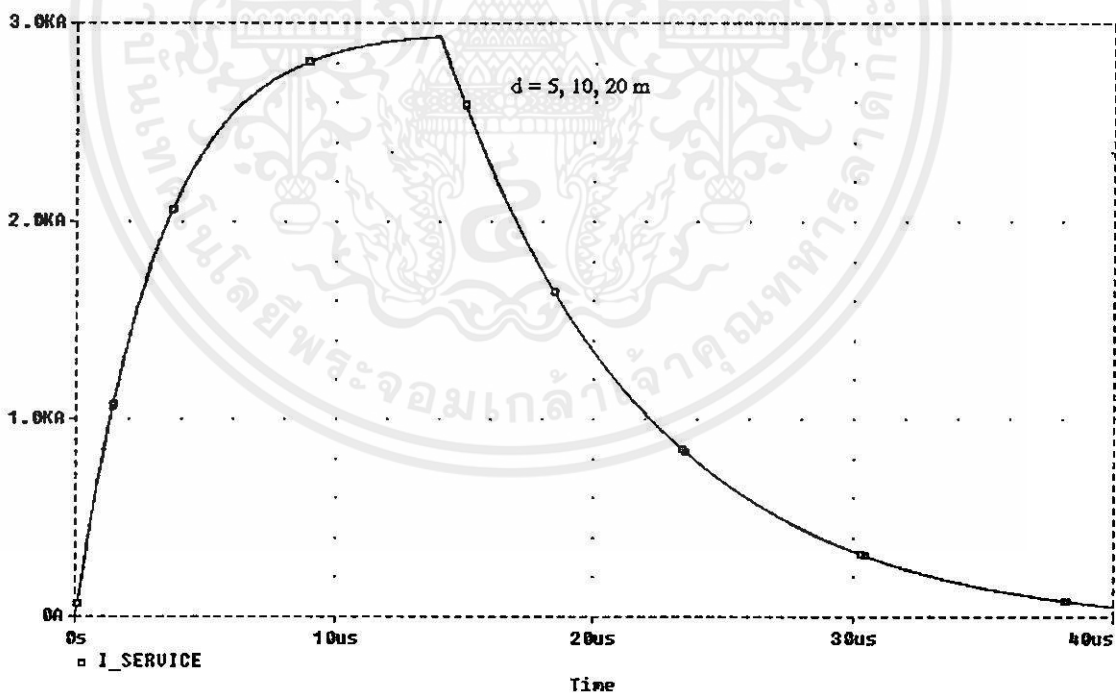


(b) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load

เอกสารนี้เผยแพร่โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
รูปที่ 4.11 ผลการเขียนแบบกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตร  
ตามลำดับ โดยใช้ B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่น  
เล็งรีง 8/20  $\mu s$  3 kA

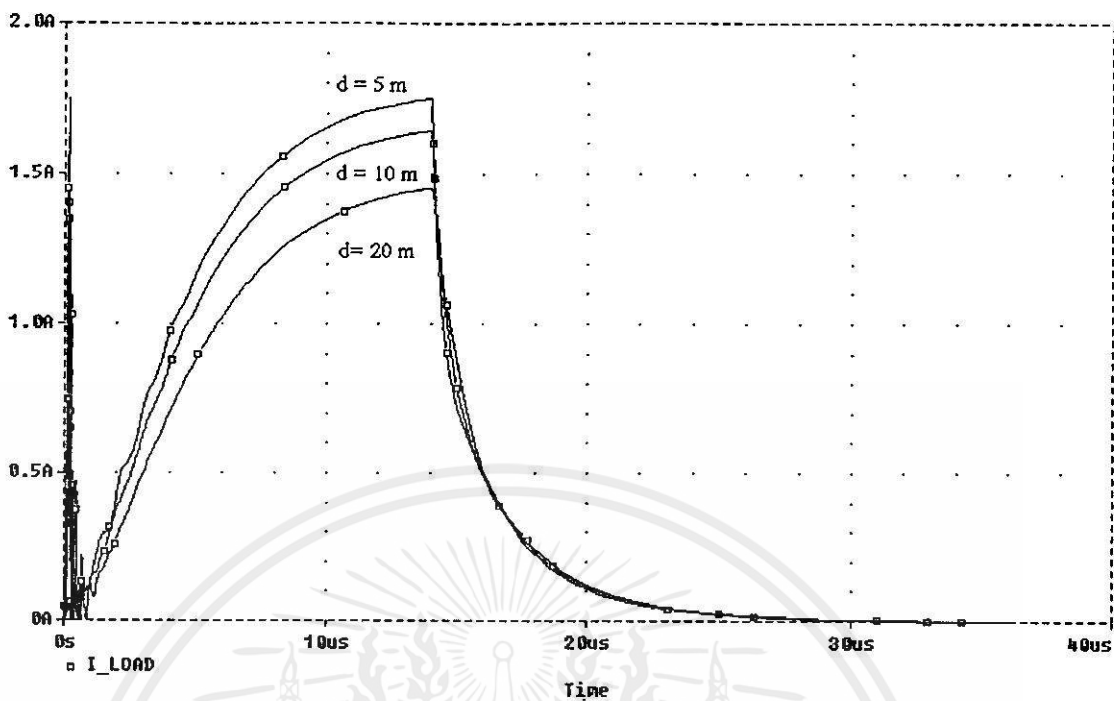


(c) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ 50 Ω  
รูปที่ 4.11 (ต่อ)

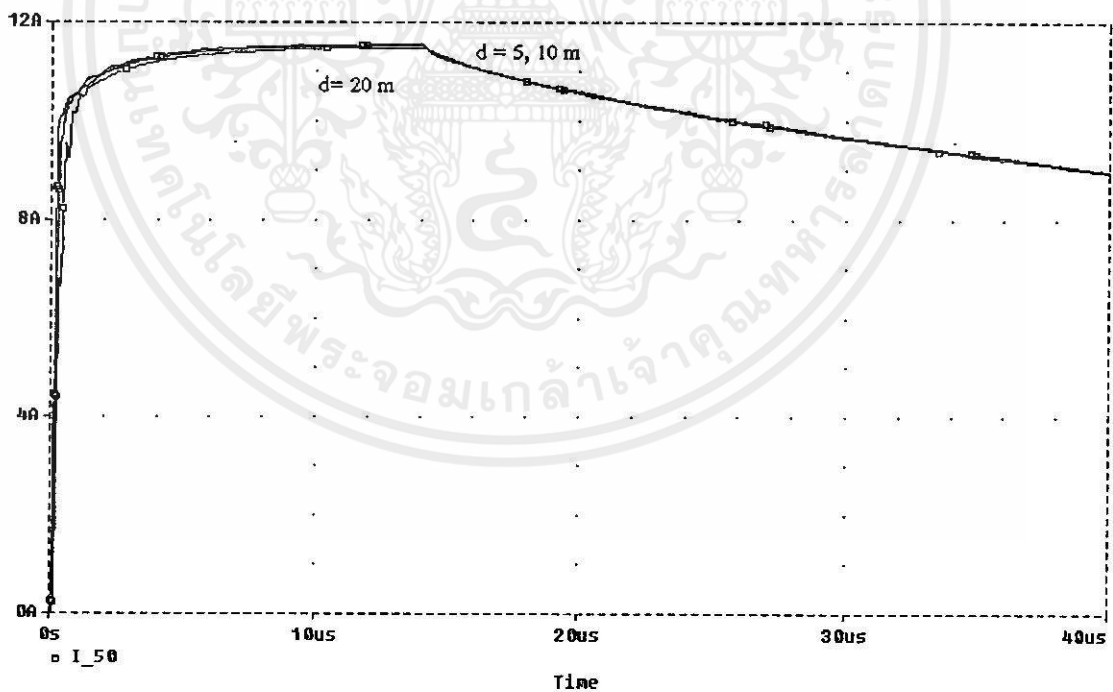


(a) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance

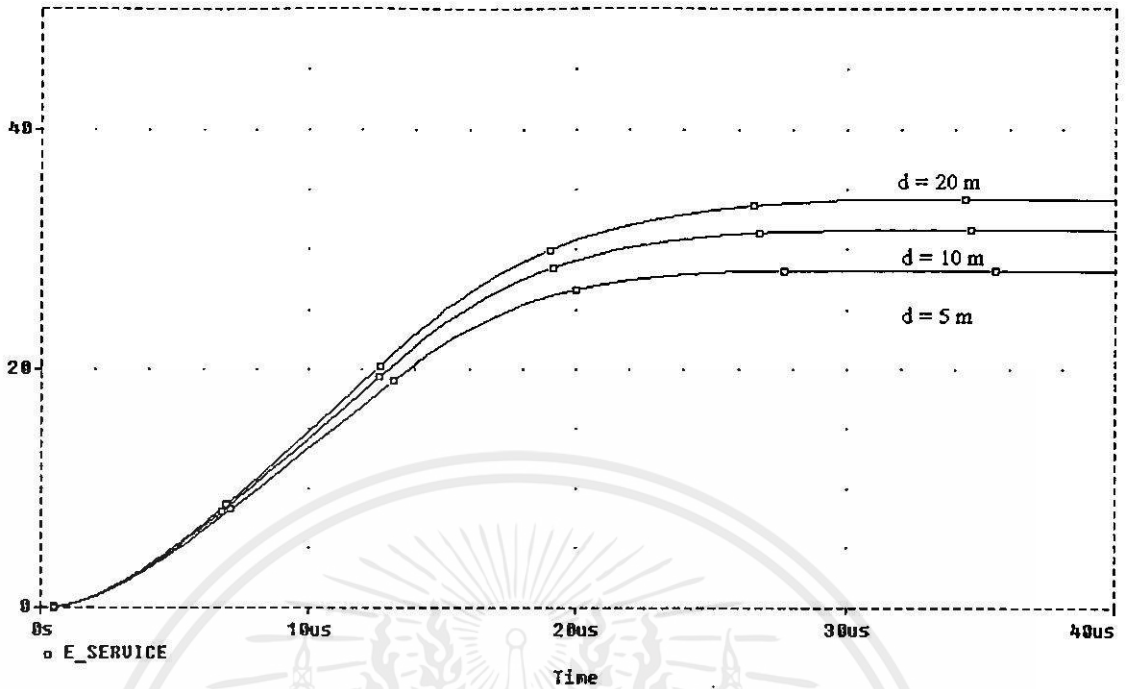
รูปที่ 4.12 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตร ตามลำดับ โดยใช้ B80K250 ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่น เสรีจ 8/20 μs 3 kA



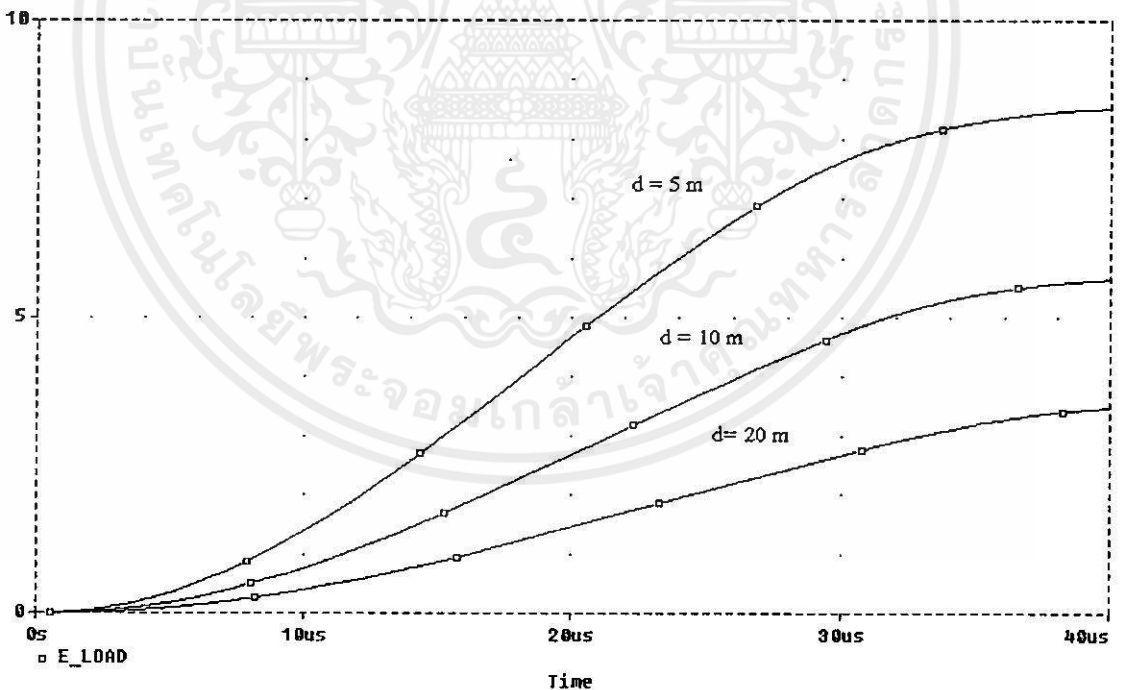
(b) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load



(c) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่  $50\ \Omega$  ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีรูปที่ 4.12 (ต่อ) ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

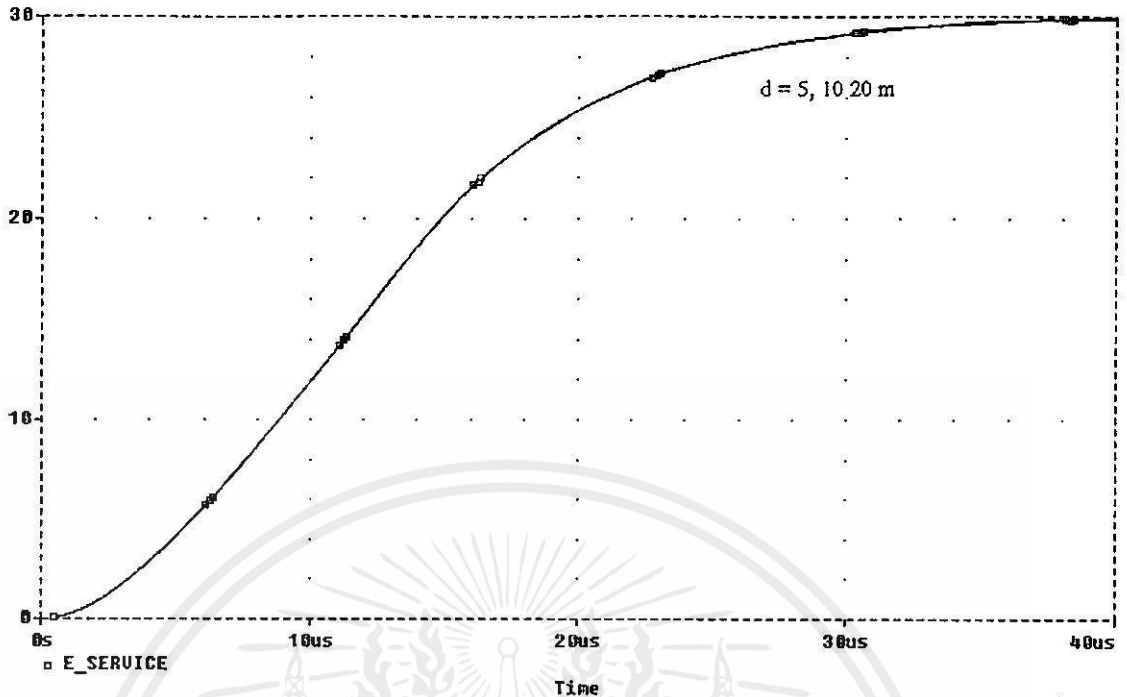


(a) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance

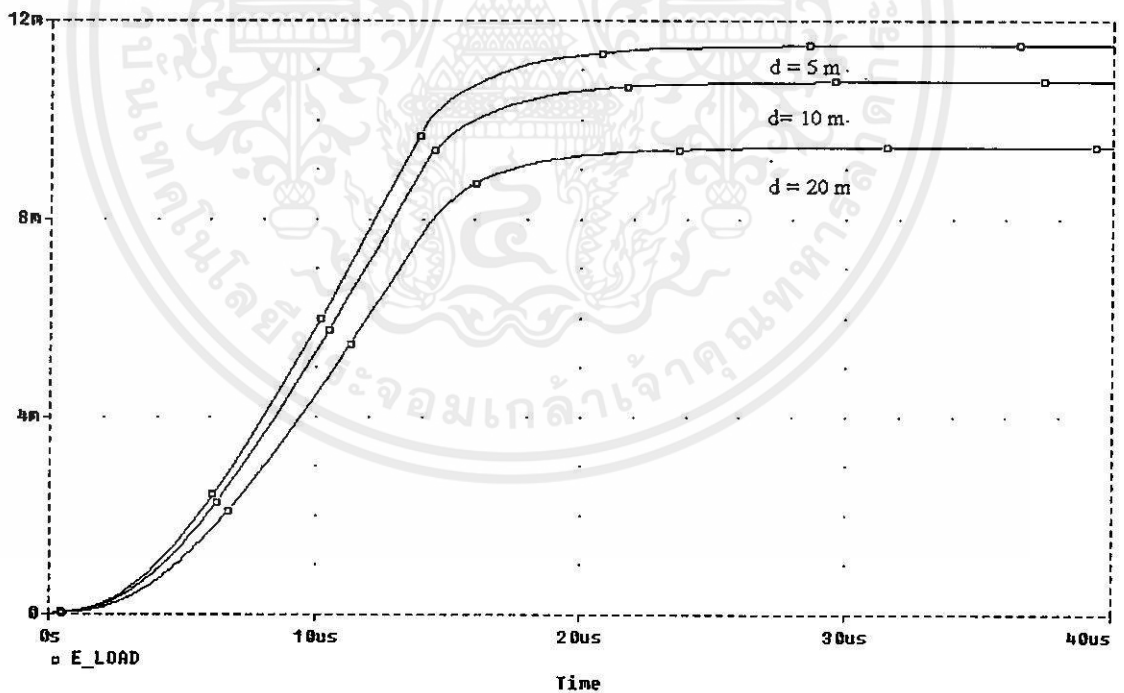


(b) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load

รูปที่ 4.13 ผลการเขียนแบบพลังงานสะสมเปรียบเทียบของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตรตามลำดับ โดยใช้ B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20  $\mu$ s 3 kA



(a) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance



(b) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.14 ผลการเขียนแบบพลังงานสะสมเปรียบเทียบของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ระยะการติดตั้งเท่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตใช้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
กับ 5 10 และ 20 เมตรตามลำดับ โดยใช้ B80K250 ที่ Service entrance และ  
V320LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20  $\mu s$  3 kA

#### 4.2.2.2 ระยะเวลาติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่เพิ่มขึ้นทำให้การป้องกันระบบดีขึ้น ที่รูปคลื่นเสิร์จ 10/350 $\mu$ s 20 kA

ตารางที่ 4.11 – 4.13 และรูปที่ 4.15 – 4.18 แสดงผลการเลียนแบบการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ระยะระหว่าง Service entrance และ load เท่ากับ 5 10 และ 20 เมตรตามลำดับ เลือกใช้อุปกรณ์ขจัดเสิร์จ Service entrance และ load ตามตารางที่ 4.3 ทำการจำลองในวงจรตามรูปที่ 4.1 ผลการเลียนแบบแสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสม เปรียบเทียบกันที่ระยะต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้าที่ 50  $\Omega$  มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเพิ่มขึ้น และในกรณีที่ 6 (ติดตั้ง B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load) พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน 50  $\Omega$  ลดลงมากเมื่อระยะติดตั้งเพิ่มจาก 5 เป็น 20 เมตร เช่นเดียวกับกรณีที่ 11 (ติดตั้ง B80K250 ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load)

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับรูปที่ 4.11 ถึง 4.14 พบว่าผลการเลียนแบบด้วยรูปคลื่นทั้ง 2 สอดคล้องกันถึงแม้ว่ารูปคลื่น 10/350  $\mu$ s มีคาบเวลาการเกิดที่ยาวกว่า

ตารางที่ 4.11 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และ load ที่ระยะเวลาติดตั้งเท่ากับ 5 เมตร ด้วยรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s 20 kA

| ระยะการติดตั้ง | อุปกรณ์ขจัดเสิร์จ |           | แรงดันไฟฟ้า (V)  |          | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |          |             | พลังงานสะสม (J)  |          |
|----------------|-------------------|-----------|------------------|----------|----------------------|----------|-------------|------------------|----------|
|                | Service entrance  | Load      | Service entrance | Load     | Service entrance     | Load     | 50 $\Omega$ | Service entrance | Load     |
| 5              | B80K420           | V320LA20A | 1,364.90         | 1,054.60 | 17,845               | 2,839.80 | 21.09       | 8,622.90         | 2,051.20 |
|                |                   | V275LA20A | 1,360.50         | 1,036.00 | 17,582               | 3,077.80 | 20.72       | 8,090.40         | 2,375.40 |
|                |                   | V250LA20A | 1,356.80         | 975.45   | 17,382               | 3,474.80 | 19.51       | 7,521.50         | 2,651.90 |
|                | B80K320           | V420LA20A | 1,044.60         | 1,013.60 | 19,511               | 261.61   | 20.27       | 8,564.70         | 55.38    |
|                |                   | V275LA20A | 1,031.50         | 823.00   | 18,447               | 1,869.10 | 16.46       | 7,323.30         | 988.38   |
|                |                   | V250LA20A | 1,028.90         | 773.01   | 18,255               | 2,275.50 | 15.46       | 6,860.20         | 1,289.70 |
|                | B80K275           | V420LA20A | 876.19           | 871.98   | 19,757               | 31.02    | 17.44       | 7,280.70         | 3.32     |
|                |                   | V320LA20A | 875.06           | 815.17   | 19,350               | 517.07   | 16.30       | 7,129.10         | 128.53   |
|                |                   | V250LA20A | 869.42           | 712.34   | 18,782               | 1,405.80 | 14.25       | 6,520.60         | 588.74   |
| B80K250        | V420LA20A         | 801.69    | 803.68           | 19,780   | 5.01                 | 16.03    | 6,649.80    | 355.58           |          |
|                | V320LA20A         | 801.02    | 766.96           | 19,537   | 287.43               | 15.34    | 6,590.60    | 50.58            |          |
|                | V275LA20A         | 798.06    | 716.48           | 19,223   | 731.83               | 14.33    | 6,406.10    | 159.39           |          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงนโยบายการศึกษาระดับอุดมศึกษา โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น

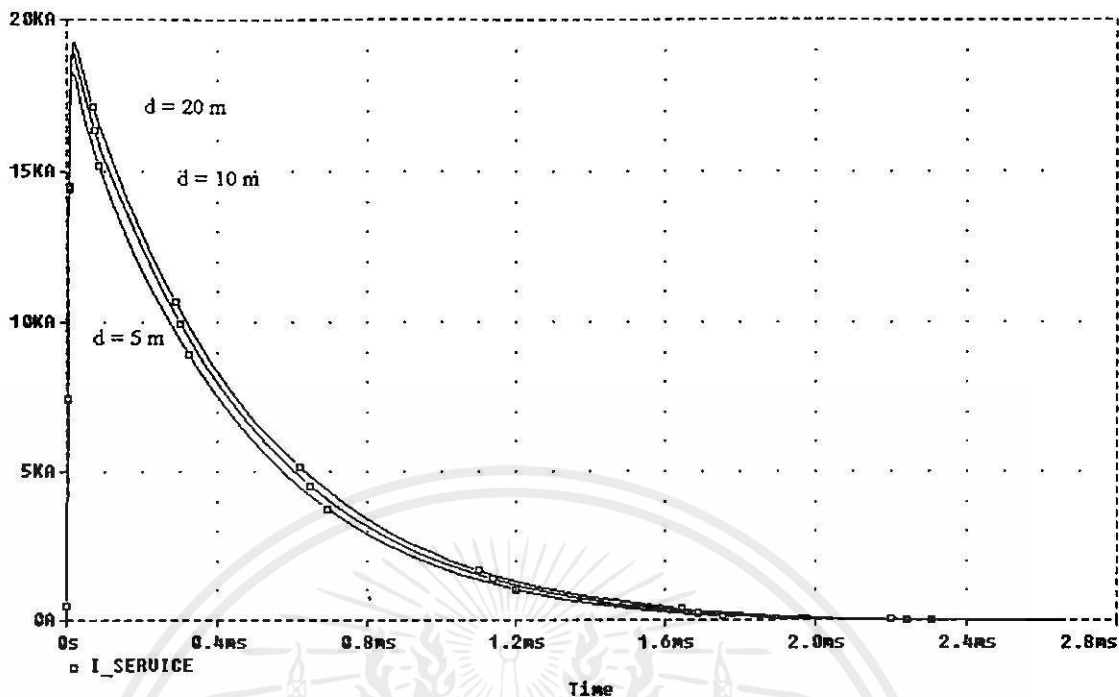
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการเขียนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และ load ที่  
ระยะการติดตั้งเท่ากับ 10 เมตร ด้วยรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s 20 kA

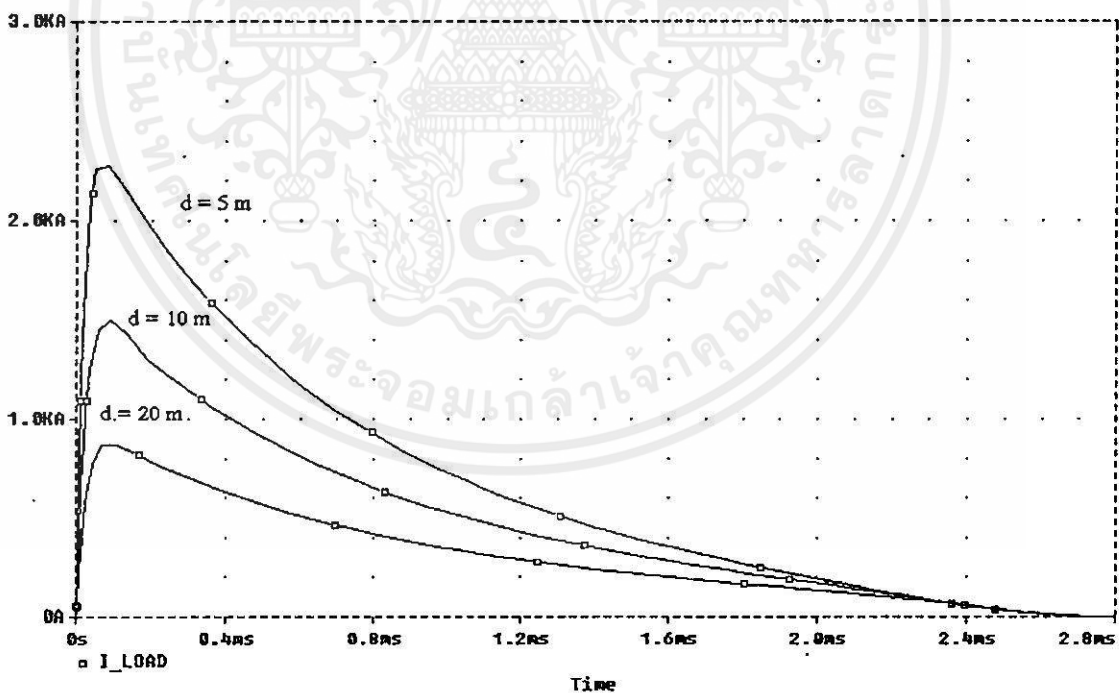
| ระยะ<br>การ<br>ติดตั้ง | อุปกรณ์จัดเสิร์จ    |           | แรงดันไฟฟ้า (V)     |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |          |             | พลังงานสะสม (J)     |          |
|------------------------|---------------------|-----------|---------------------|--------|----------------------|----------|-------------|---------------------|----------|
|                        | Service<br>entrance | Load      | Service<br>entrance | Load   | Service<br>entrance  | Load     | 50 $\Omega$ | Service<br>entrance | Load     |
| 10                     | B80K420             | V320LA20A | 1,378.10            | 975.94 | 18,597               | 1,867.20 | 19.52       | 9,418.60            | 1,399.80 |
|                        |                     | V275LA20A | 1,375.50            | 929.29 | 18,454               | 2,066.00 | 18.59       | 8,968.70            | 1,638.40 |
|                        |                     | V250LA20A | 1,371.90            | 795.99 | 18,263               | 2,656.90 | 15.92       | 8,218.00            | 1,902.70 |
|                        | B80K320             | V420LA20A | 1,045.50            | 994.25 | 19,581               | 210.88   | 19.89       | 8,576.30            | 46.83    |
|                        |                     | V275LA20A | 1,038.40            | 769.29 | 19,007               | 1,227.20 | 15.39       | 7,706.00            | 674.51   |
|                        |                     | V250LA20A | 1,036.60            | 719.87 | 18,893               | 1,502.70 | 14.39       | 7,401.40            | 857.39   |
|                        | B80K275             | V420LA20A | 878.25              | 868.09 | 19,701               | 28.54    | 17.36       | 7,282.70            | 3.07     |
|                        |                     | V320LA20A | 876.73              | 789.02 | 19,502               | 382.64   | 15.78       | 7,164.20            | 99.77    |
|                        |                     | V250LA20A | 873.80              | 672.21 | 19,167               | 946.52   | 13.44       | 6,936.10            | 255.94   |
|                        | B80K250             | V420LA20A | 803.89              | 799.87 | 19,773               | 4.73     | 15.99       | 6,652.00            | 335.68   |
|                        |                     | V320LA20A | 802.12              | 747.57 | 19,627               | 216.99   | 14.95       | 6,603.60            | 40.97    |
|                        |                     | V275LA20A | 800.46              | 684.84 | 19,430               | 500.74   | 13.69       | 6,469.70            | 143.09   |

ตารางที่ 4.13 ผลการเขียนแบบกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ Service entrance และ load ที่  
ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร ด้วยรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s 20 kA

| ระยะ<br>การ<br>ติดตั้ง | อุปกรณ์จัดเสิร์จ    |           | แรงดันไฟฟ้า (V)     |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |          |             | พลังงานสะสม (J)     |          |
|------------------------|---------------------|-----------|---------------------|--------|----------------------|----------|-------------|---------------------|----------|
|                        | Service<br>entrance | Load      | Service<br>entrance | Load   | Service<br>entrance  | Load     | 50 $\Omega$ | Service<br>entrance | Load     |
| 20                     | B80K420             | V320LA20A | 1,386.80            | 900.11 | 19,065               | 1,119.40 | 18.00       | 10,113.00           | 875.34   |
|                        |                     | V275LA20A | 1,385.10            | 788.45 | 18,977               | 1,440.70 | 15.77       | 9,630.00            | 1,075.90 |
|                        |                     | V250LA20A | 1,383.80            | 725.71 | 18,923               | 1,579.60 | 14.51       | 9,380.50            | 1,142.10 |
|                        | B80K320             | V420LA20A | 1,046.50            | 968.48 | 19,649               | 153.79   | 19.37       | 8,592.40            | 36.38    |
|                        |                     | V275LA20A | 1,042.80            | 719.12 | 19,349               | 753.19   | 14.38       | 8,032.10            | 423.73   |
|                        |                     | V250LA20A | 1,042.10            | 664.48 | 19,292               | 868.83   | 13.29       | 7,852.90            | 522.79   |
|                        | B80K275             | V420LA20A | 879.81              | 861.38 | 19,781               | 24.62    | 17.23       | 7,287.90            | 2.66     |
|                        |                     | V320LA20A | 878.36              | 776.66 | 19,639               | 214.94   | 15.53       | 7,223.30            | 54.81    |
|                        |                     | V250LA20A | 876.83              | 630.04 | 19,468               | 567.27   | 12.60       | 6,936.10            | 255.94   |
|                        | B80K250             | V420LA20A | 804.14              | 796.14 | 19,812               | 4.20     | 15.92       | 6,653.80            | 295.74   |
|                        |                     | V320LA20A | 802.92              | 726.61 | 19,697               | 154.43   | 14.53       | 6,618.40            | 30.54    |
|                        |                     | V275LA20A | 802.19              | 653.71 | 19,602               | 321.43   | 13.07       | 6,529.70            | 96.22    |

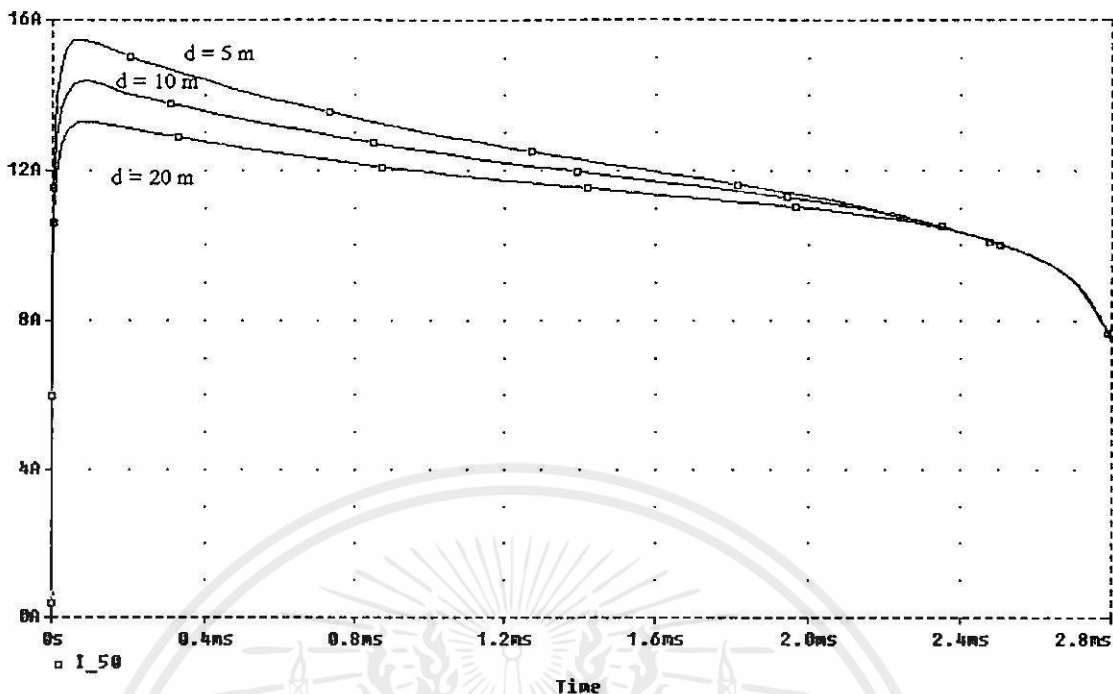


(a) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่างๆ ที่ Service entrance

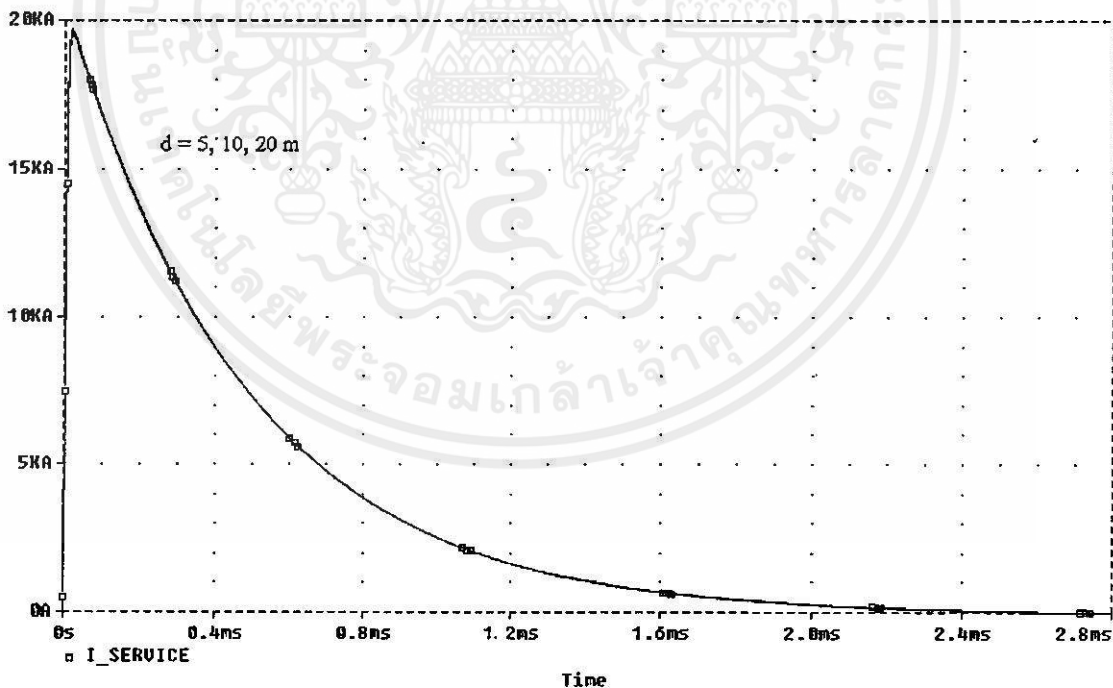


(b) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่างๆ ที่ load

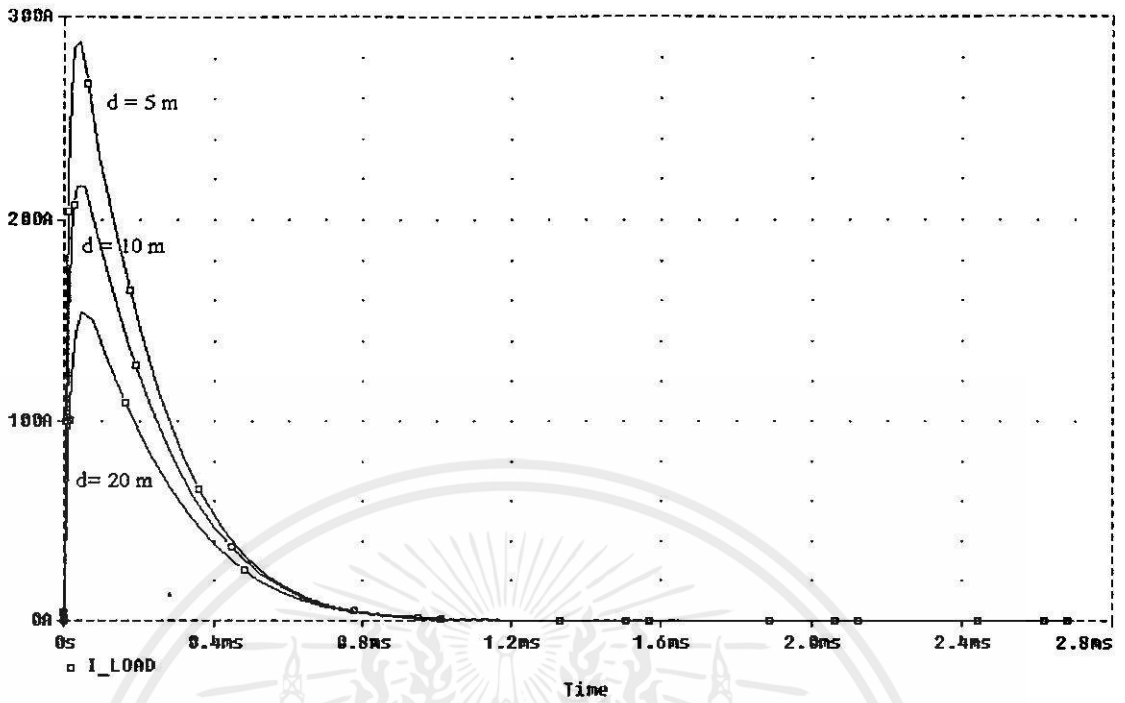
เอกสารที่ 4.15 ผลการเขียนแบบกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตร  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและข้อมูลเชิงเทคนิคที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้โดยไม่ผูกมัด  
ตามลำดับ โดยใช้ B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่น  
เลี้ยว 10/350  $\mu$ s 20 kA



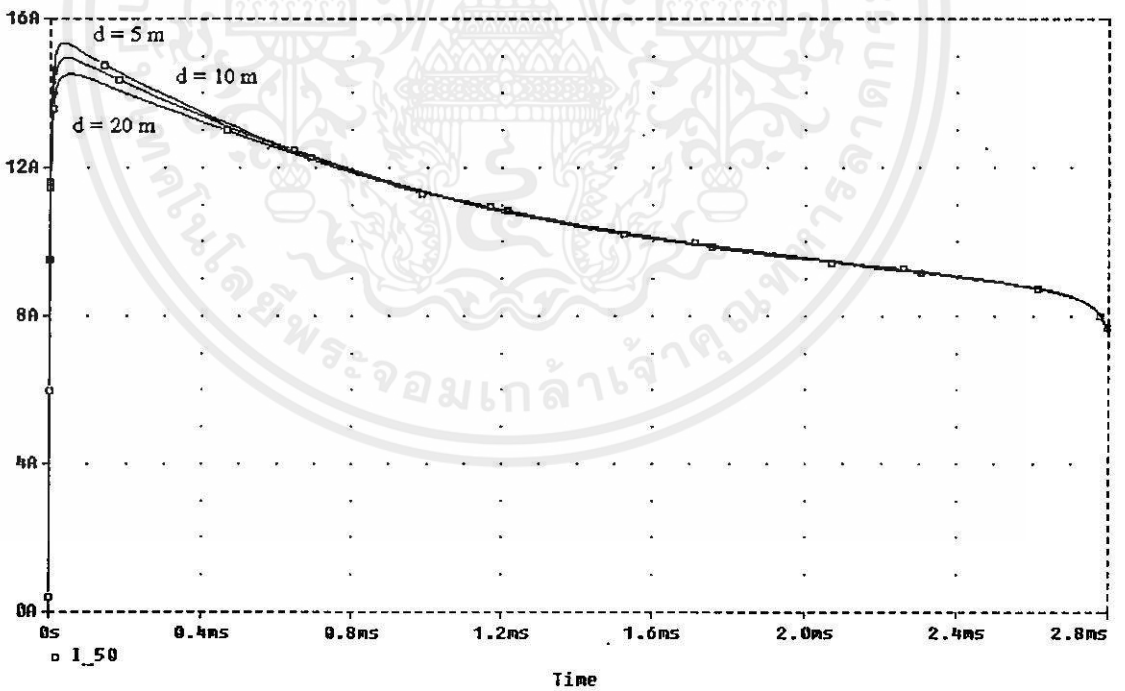
(c) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ 50 Ω  
รูปที่ 4.15 (ต่อ)



(a) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.16 ผลการเลียนแบบกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตร  
ตามลำดับ โดยใช้ B80K250 ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่น  
เสีรีจ 10/350 μs 20 kA

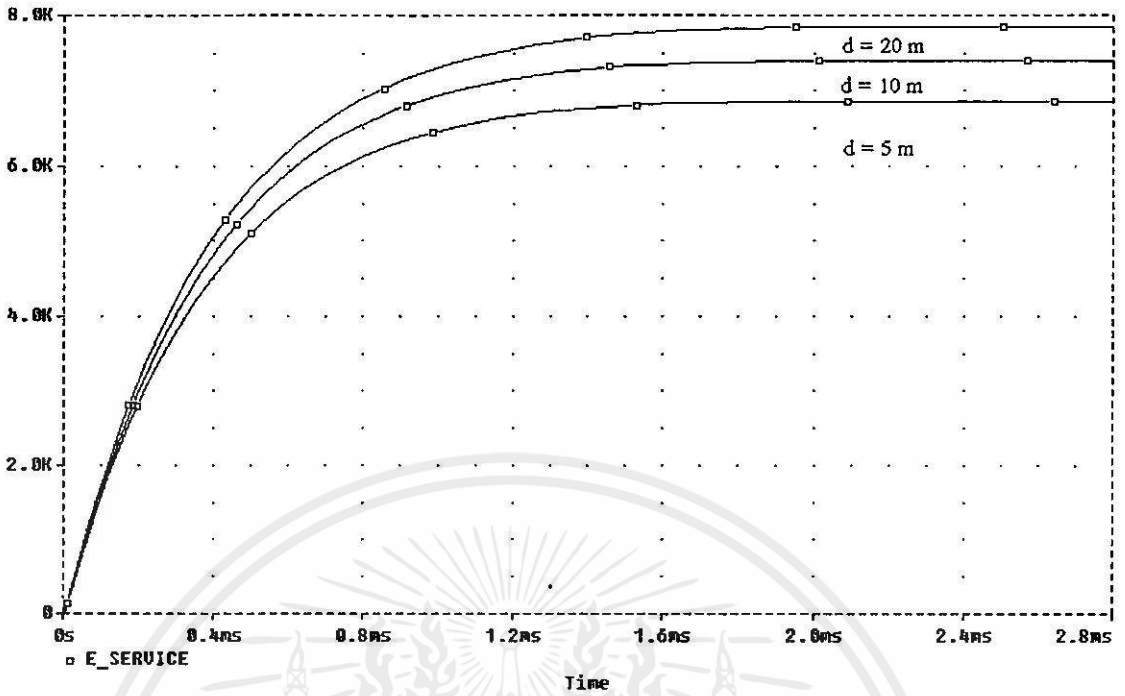


(b) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load

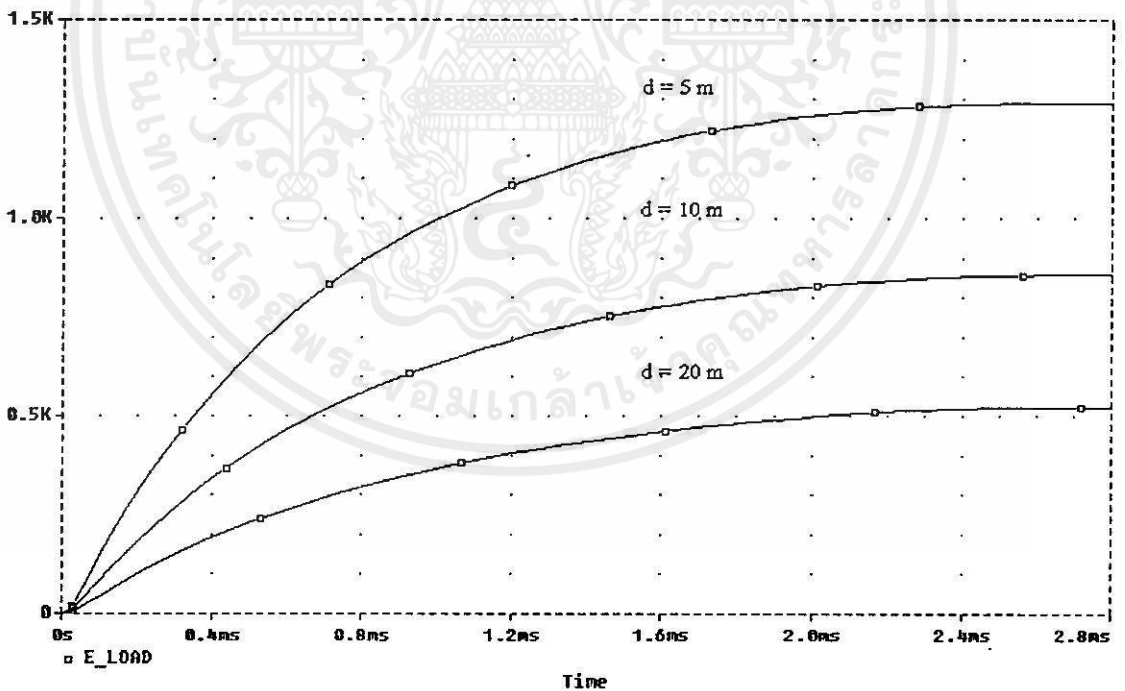


(c) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ 50 Ω

เอกสารนี้ (c) กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ 50 Ω ถูกสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.16 (ต่อ) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

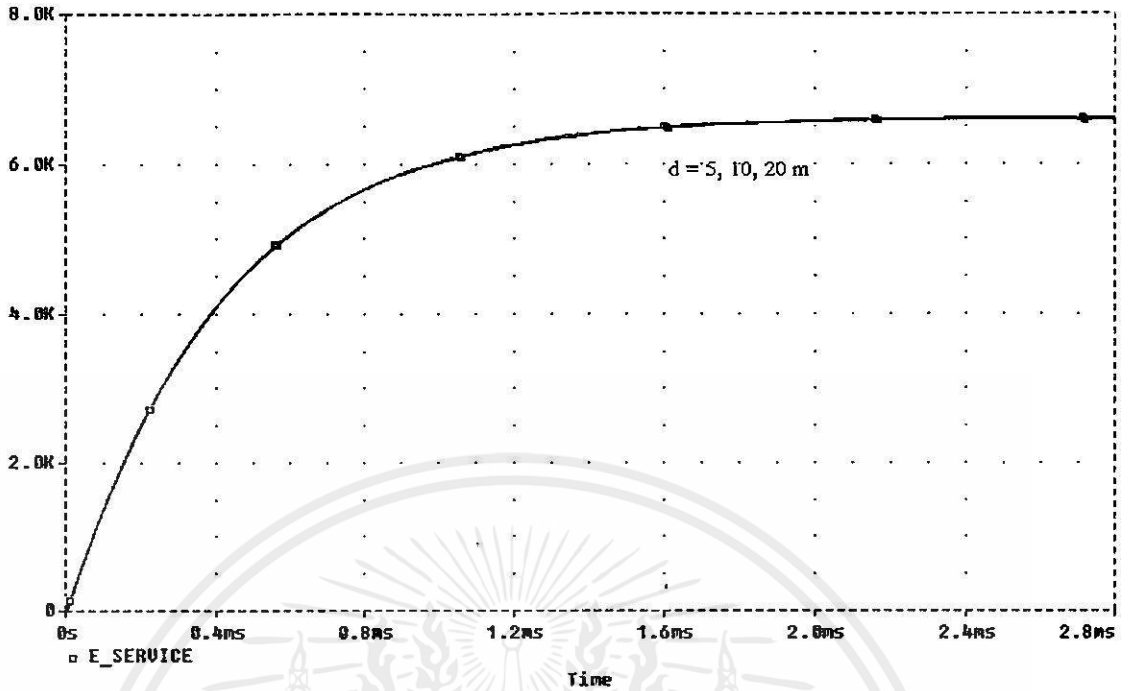


(a) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance

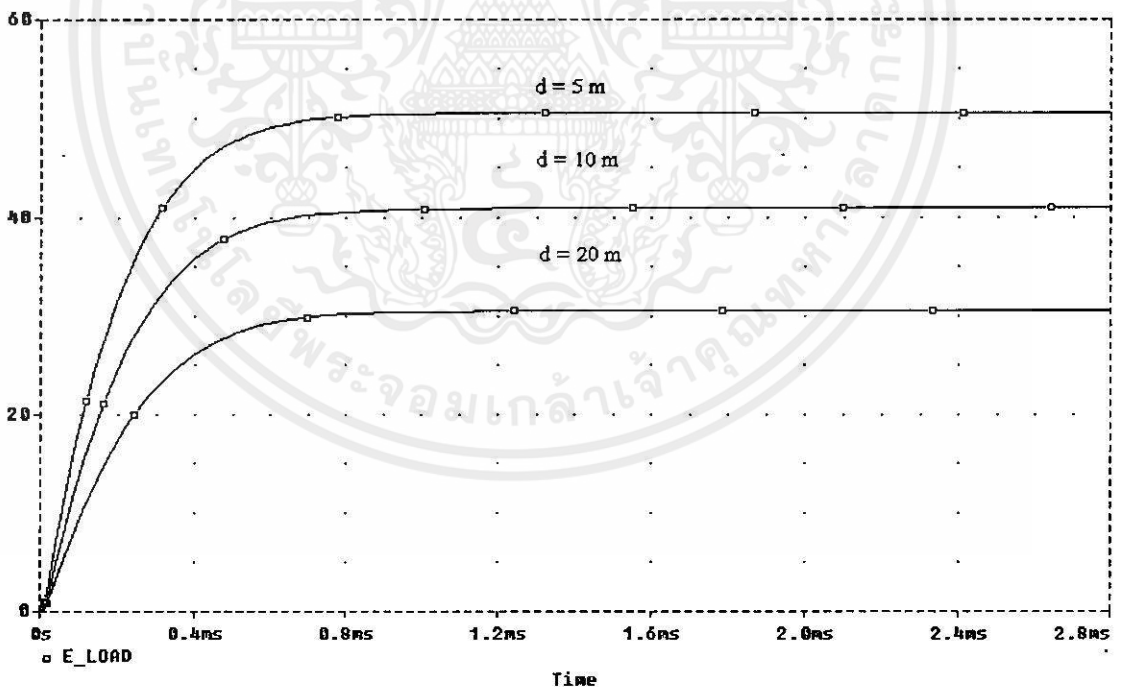


(b) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load

รูปที่ 4.17 ผลการเลียนแบบพลังงานสะสมเปรียบเทียบของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 5 10 และ 20 เมตรตามลำดับ โดยใช้ B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350  $\mu$ s 20 kA



(a) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ Service entrance



(b) พลังงานสะสมเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ ที่ load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแบบลงมือทำ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 กับ 5 10 และ 20 เมตรตามลำดับ โดยใช้ B80K250 ที่ Service entrance และ  
 V320LA20A ที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350  $\mu$ s 20 kA

### 4.2.3 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จ

4.2.3.1 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จแบบ Low-High ทำให้การป้องกันระบบดีที่สุดในรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA

ตารางที่ 4.14 – 4.16 และรูปที่ 4.19 – 4.25 แสดงผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance และ load ด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 4.4 ที่ระยะการติดตั้งตั้งแต่ 5 10 และ 20 เมตร รูปคลื่นเสิร์จเป็น 8/20  $\mu$ s 3kA ทำการจำลองในวงจรตามรูป 4.1 ผลการเลียนแบบแสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ตัวอุปกรณ์จัดเสิร์จรวมทั้งที่โหลด 50  $\Omega$  แสดงให้เห็นว่า การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จ Low-High ทำให้การป้องกันระบบจากเสิร์จดีที่สุดใน โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ load กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด 50  $\Omega$  มีค่าต่ำสุด นอกจากนี้พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ load ยังมีค่าต่ำกว่าแบบ High-Low ที่ระยะการติดตั้งเท่ากัน ทำให้สามารถเลือกใช้ขนาดอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ load เล็กกลง และราคาไม่แพง

ตารางที่ 4.14 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 5 เมตร

| รูปแบบ   | อุปกรณ์จัดเสิร์จ |           | แรงดันไฟฟ้า (V)  |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |          |             | พลังงานสะสม (J)  |        |
|----------|------------------|-----------|------------------|--------|----------------------|----------|-------------|------------------|--------|
|          | Service entrance | Load      | Service entrance | Load   | Service entrance     | Load     | 50 $\Omega$ | Service entrance | Load   |
| High-Low | B80K420          | V320LA20A | 981.94           | 844.92 | 2,256.50             | 699.04   | 16.89       | 34.23            | 13.390 |
|          |                  | V275LA20A | 971.52           | 754.24 | 2,028.90             | 1,071.60 | 15.09       | 28.39            | 16.390 |
|          |                  | V250LA20A | 966.09           | 701.99 | 1,919.10             | 1,277.30 | 14.04       | 25.75            | 17.090 |
|          | B80K320          | V275LA20A | 745.12           | 667.45 | 2,533.10             | 394.79   | 13.35       | 31.12            | 6.450  |
|          |                  | V250LA20A | 741.09           | 629.33 | 2,407.20             | 561.67   | 12.59       | 28.27            | 8.572  |
|          | B80K275          | V250LA20A | 631.32           | 580.54 | 2,672.80             | 257.61   | 11.61       | 28.83            | 3.530  |
| Low-High | B80K250          | V420LA20A | 579.35           | 578.24 | 2,932.70             | 1.42     | 11.56       | 29.93            | 0.001  |
|          |                  | V320LA20A | 579.32           | 578.00 | 2,930.90             | 1.75     | 11.55       | 29.92            | 0.011  |
|          |                  | V275LA20A | 578.14           | 569.09 | 2,879.00             | 53.64    | 11.38       | 29.43            | 0.451  |
|          | B80K275          | V420LA20A | 637.85           | 636.63 | 2,924.70             | 1.41     | 12.73       | 32.78            | 0.001  |
|          |                  | V320LA20A | 637.44           | 634.15 | 2,907.90             | 16.97    | 12.68       | 32.66            | 0.137  |
|          | B80K320          | V420LA20A | 756.85           | 755.29 | 2,907.60             | 1.68     | 15.11       | 38.45            | 0.008  |

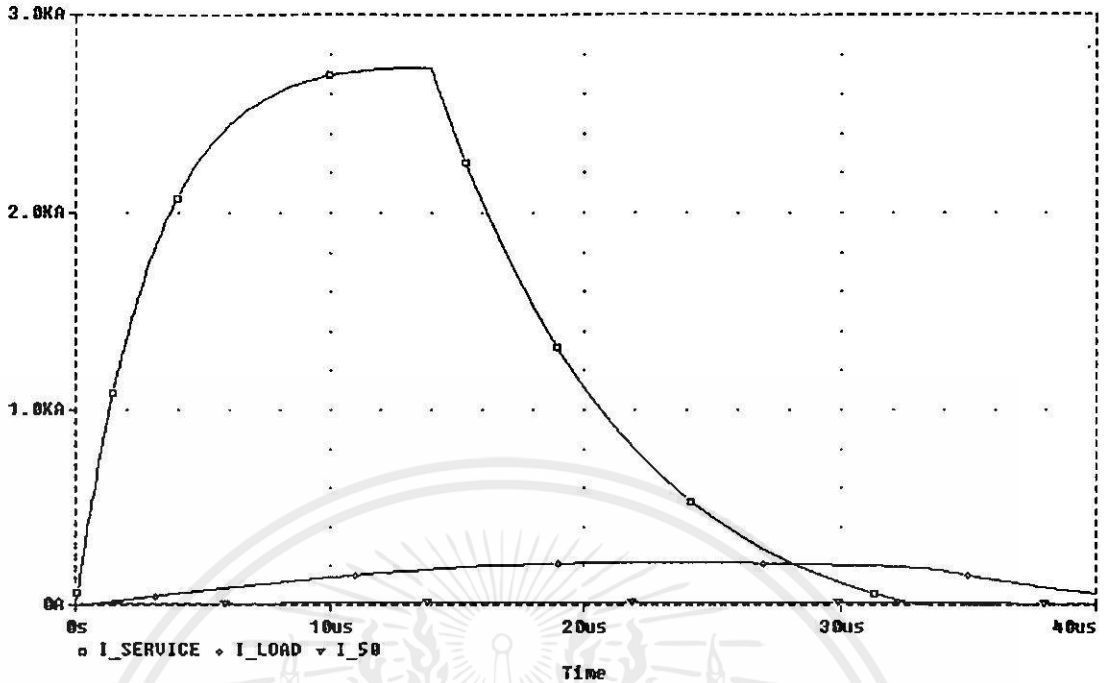
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับกรรฐ์เชิงนโยบายเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ข้อมูลเพื่อเผยแพร่ในเชิงธุรกิจ เช่น ใช้นำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 10 เมตร

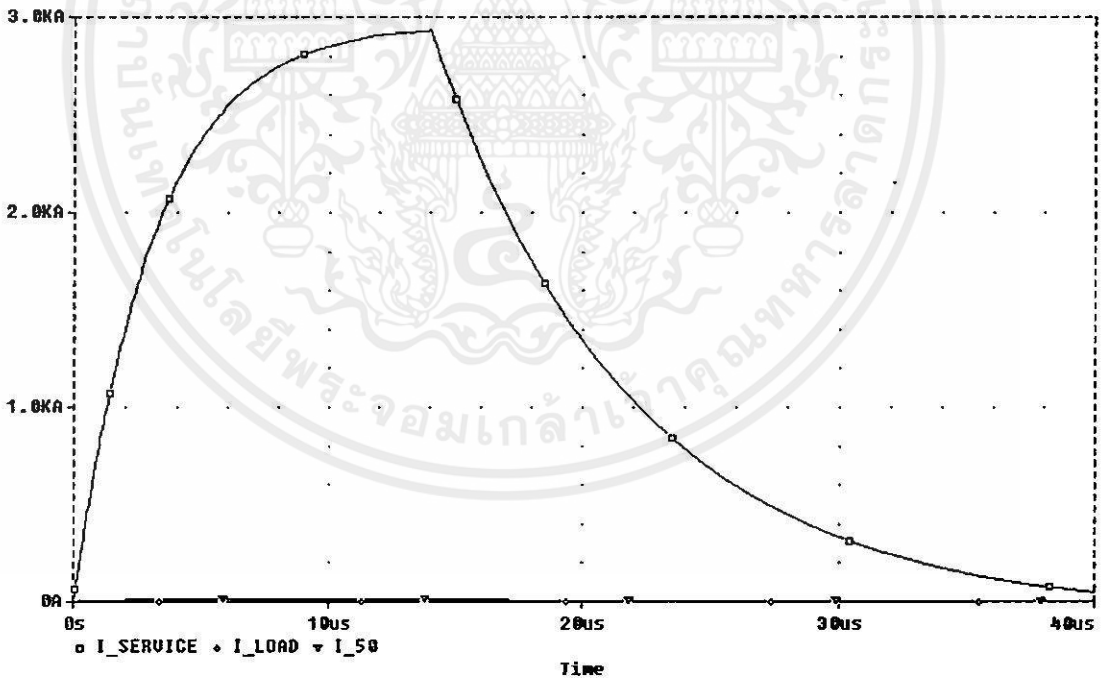
| รูปแบบ   | อุปกรณ์จัดเสิร์จ |           | แรงดันไฟฟ้า (V)  |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |        |             | พลังงานสะสม (J)  |        |
|----------|------------------|-----------|------------------|--------|----------------------|--------|-------------|------------------|--------|
|          | Service entrance | Load      | Service entrance | Load   | Service entrance     | Load   | 50 $\Omega$ | Service entrance | Load   |
| High-Low | B80K420          | V320LA20A | 991.67           | 804.86 | 2,480.00             | 461.18 | 16.09       | 39.19            | 9.090  |
|          |                  | V275LA20A | 985.81           | 710.71 | 2,343.20             | 685.61 | 14.21       | 35.36            | 10.910 |
|          |                  | V250LA20A | 982.85           | 658.26 | 2,275.90             | 808.79 | 13.17       | 33.57            | 11.350 |
|          | B80K320          | V275LA20A | 749.46           | 640.92 | 2,669.90             | 261.15 | 12.82       | 33.35            | 4.470  |
|          |                  | V250LA20A | 747.19           | 599.84 | 2,596.40             | 361.25 | 11.99       | 31.60            | 5.700  |
|          | B80K275          | V250LA20A | 633.61           | 560.62 | 2,762.90             | 172.39 | 11.21       | 29.94            | 2.550  |
| Low-High | B80K250          | V420LA20A | 579.37           | 577.14 | 2,933.30             | 1.04   | 11.54       | 29.95            | 0.001  |
|          |                  | V320LA20A | 579.33           | 576.72 | 2,931.60             | 1.65   | 11.53       | 29.94            | 0.010  |
|          |                  | V275LA20A | 578.40           | 561.12 | 2,891.40             | 42.30  | 11.22       | 29.534           | 0.375  |
|          | B80K275          | V420LA20A | 637.88           | 635.42 | 2,925.40             | 1.20   | 12.71       | 32.81            | 0.001  |
|          |                  | V320LA20A | 637.49           | 630.81 | 2,910.30             | 15.19  | 12.62       | 32.69            | 0.124  |
|          | B80K320          | V420LA20A | 756.89           | 753.75 | 2,908.40             | 1.32   | 15.08       | 38.49            | 0.007  |

ตารางที่ 4.16 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จ 20 เมตร

| รูปแบบ   | อุปกรณ์จัดเสิร์จ |           | แรงดันไฟฟ้า (V)  |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |        |             | พลังงานสะสม (J)  |       |
|----------|------------------|-----------|------------------|--------|----------------------|--------|-------------|------------------|-------|
|          | Service entrance | Load      | Service entrance | Load   | Service entrance     | Load   | 50 $\Omega$ | Service entrance | Load  |
| High-Low | B80K420          | V320LA20A | 998.70           | 756.80 | 2,643.40             | 282.82 | 15.32       | 43.23            | 5.760 |
|          |                  | V275LA20A | 995.40           | 670.30 | 2,564.80             | 411.11 | 13.41       | 40.87            | 6.850 |
|          |                  | V250LA20A | 993.85           | 658.26 | 2,525.60             | 481.16 | 12.37       | 39.74            | 7.120 |
|          | B80K320          | V275LA20A | 752.58           | 614.69 | 2,771.40             | 160.96 | 12.29       | 35.26            | 2.850 |
|          |                  | V250LA20A | 751.31           | 571.86 | 2,731.00             | 217.81 | 11.44       | 34.23            | 3.550 |
|          | B80K275          | V250LA20A | 635.38           | 540.48 | 2,830.40             | 107.28 | 10.81       | 30.97            | 1.670 |
| Low-High | B80K250          | V420LA20A | 579.40           | 574.96 | 2,934.40             | 0.97   | 11.50       | 29.98            | 0.001 |
|          |                  | V320LA20A | 579.37           | 574.21 | 2,932.90             | 1.45   | 11.48       | 29.98            | 0.009 |
|          |                  | V275LA20A | 578.71           | 550.01 | 2,905.40             | 29.60  | 11.00       | 29.68            | 0.283 |
|          | B80K275          | V420LA20A | 637.91           | 633.01 | 2,926.60             | 1.06   | 12.66       | 32.85            | 0.001 |
|          |                  | V320LA20A | 637.60           | 624.49 | 2,914.60             | 12.25  | 12.49       | 32.74            | 0.102 |
|          | B80K320          | V420LA20A | 756.96           | 750.72 | 2,910.00             | 1.23   | 15.01       | 38.55            | 0.006 |

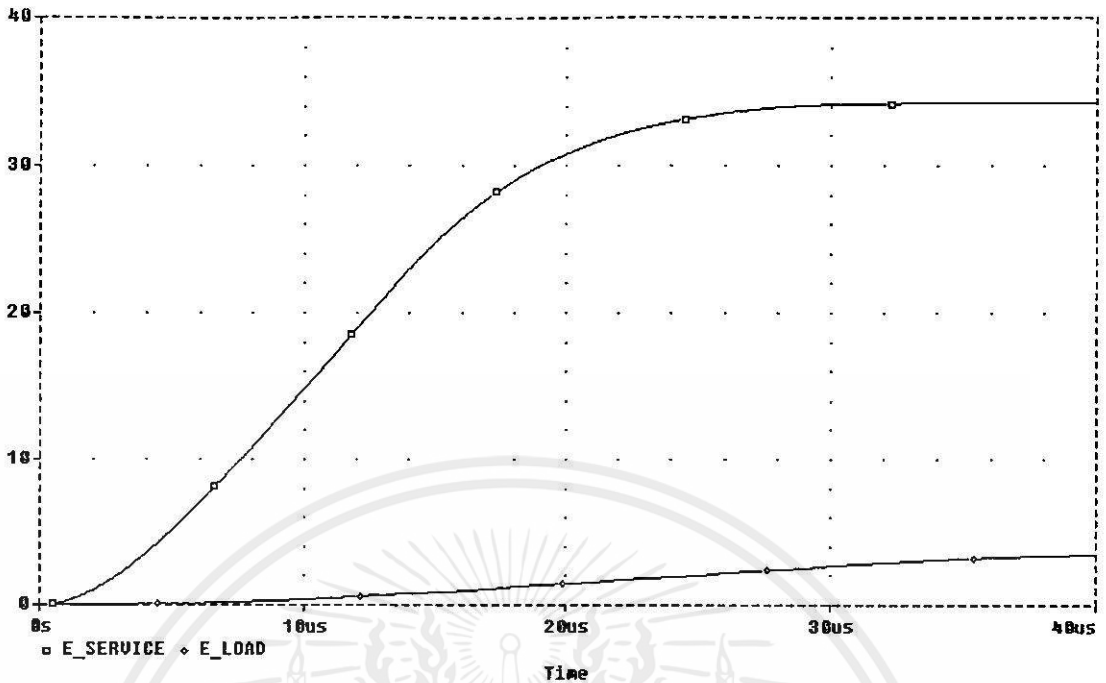


(a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load (High-Low)

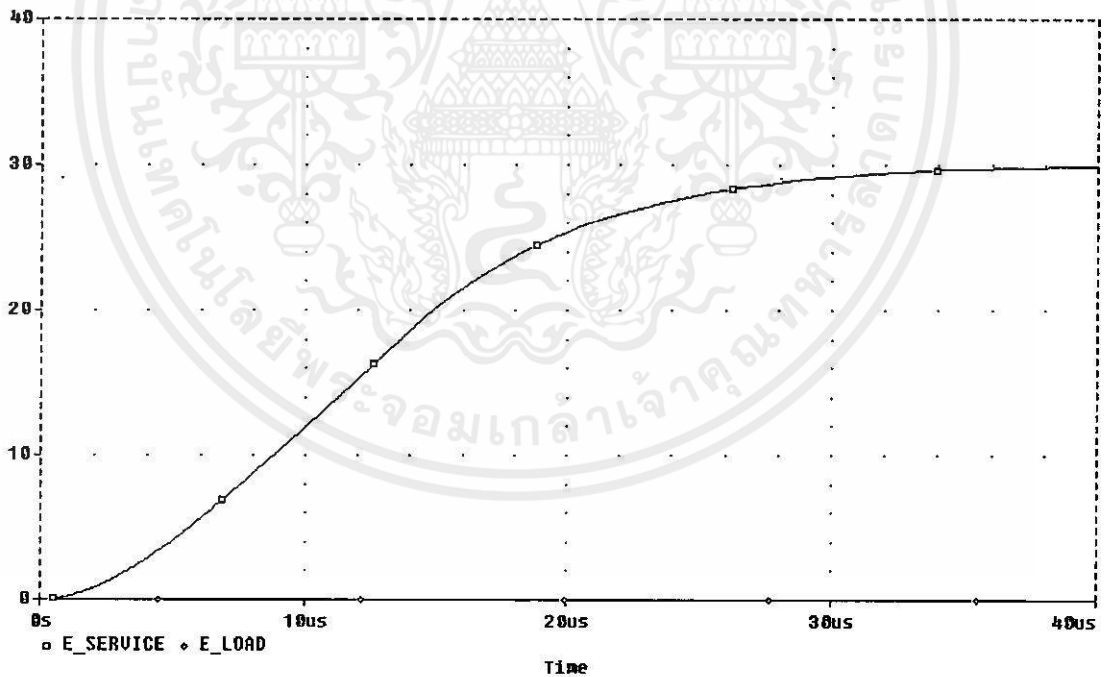


(b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K250 ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load (Low-High)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันฯ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 4.19 ผลการเขียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสีจทั้งแบบ High-Low และ Low-High แสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ Service entrance ที่ load และที่ 50 Ω ด้วยรูปคลื่นเสีจ 8/20 μs 3 kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสีจเท่ากับ 20 เมตร

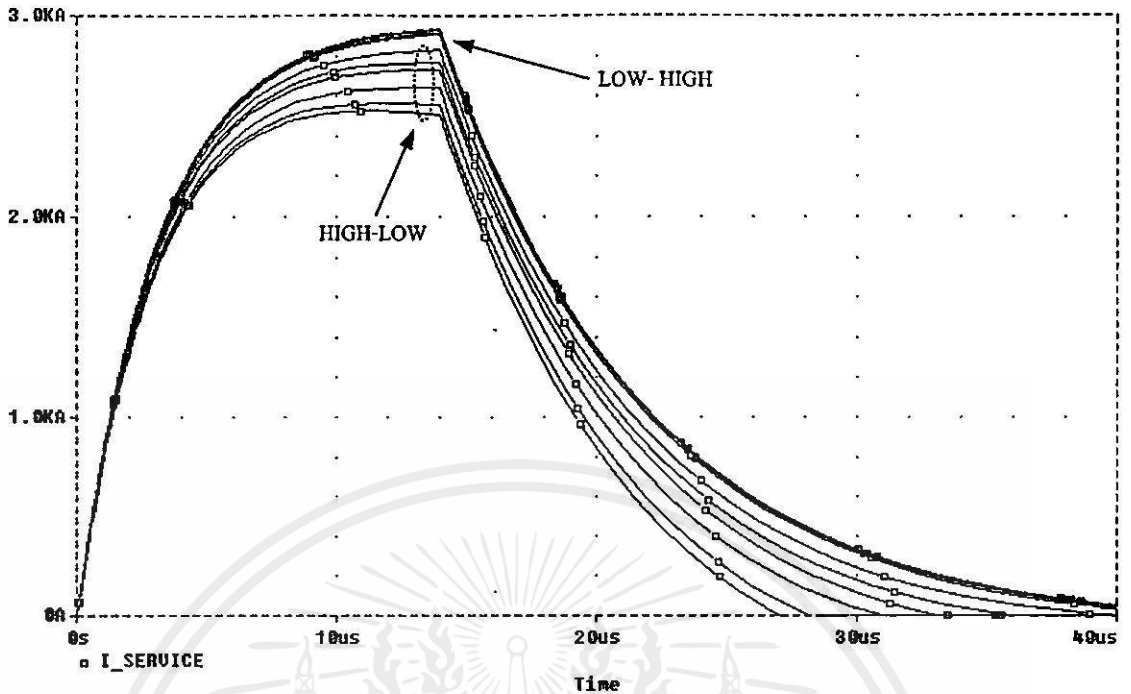


(a) พลังงานสะสมของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load (High-Low)

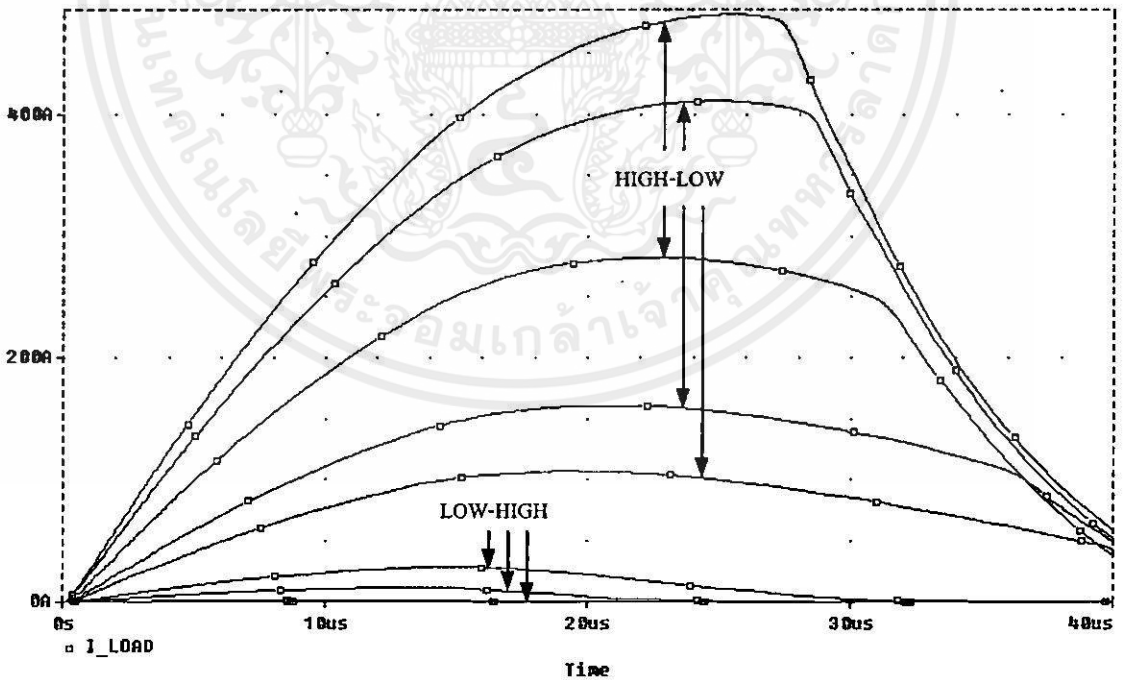


(b) พลังงานสะสมของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K250 ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load (Low-High)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 รูปที่ 4.20 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High แสดงพลังงานสะสมของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance และที่ load และด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20  $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 20 เมตร

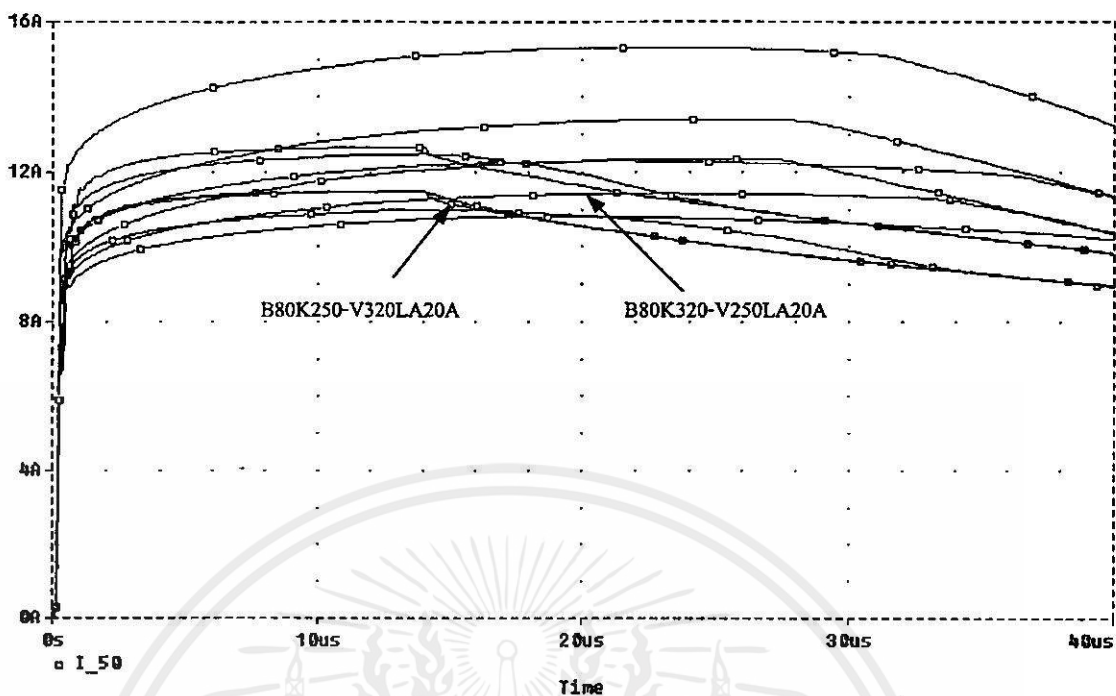


รูปที่ 4.21 ผลการเขียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสีจในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าสูงสุด  
ที่ Service entrance ด้วยรูปคลื่นเสีจ 8/20  $\mu s$  3 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร

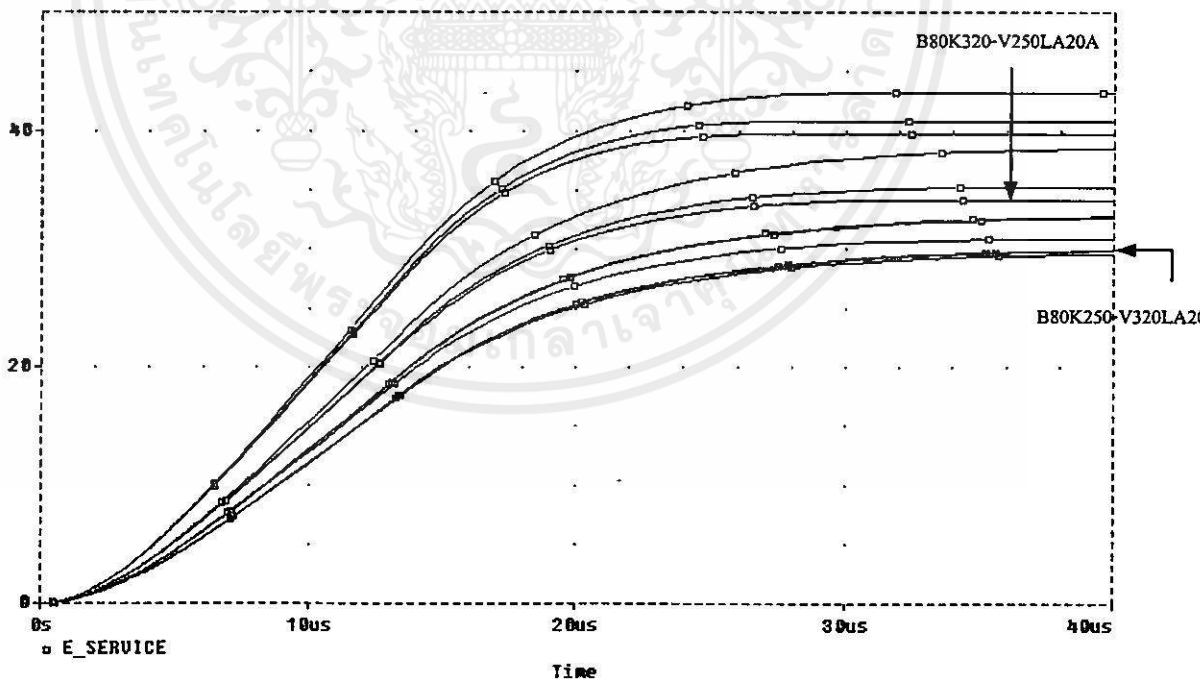


รูปที่ 4.22 ผลการเขียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสีจในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าสูงสุด  
ที่ Load ด้วยรูปคลื่นเสีจ 8/20  $\mu s$  3 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงไว้ก่อน เอกสารที่เผยแพร่ทั้งหมดนี้ใช้

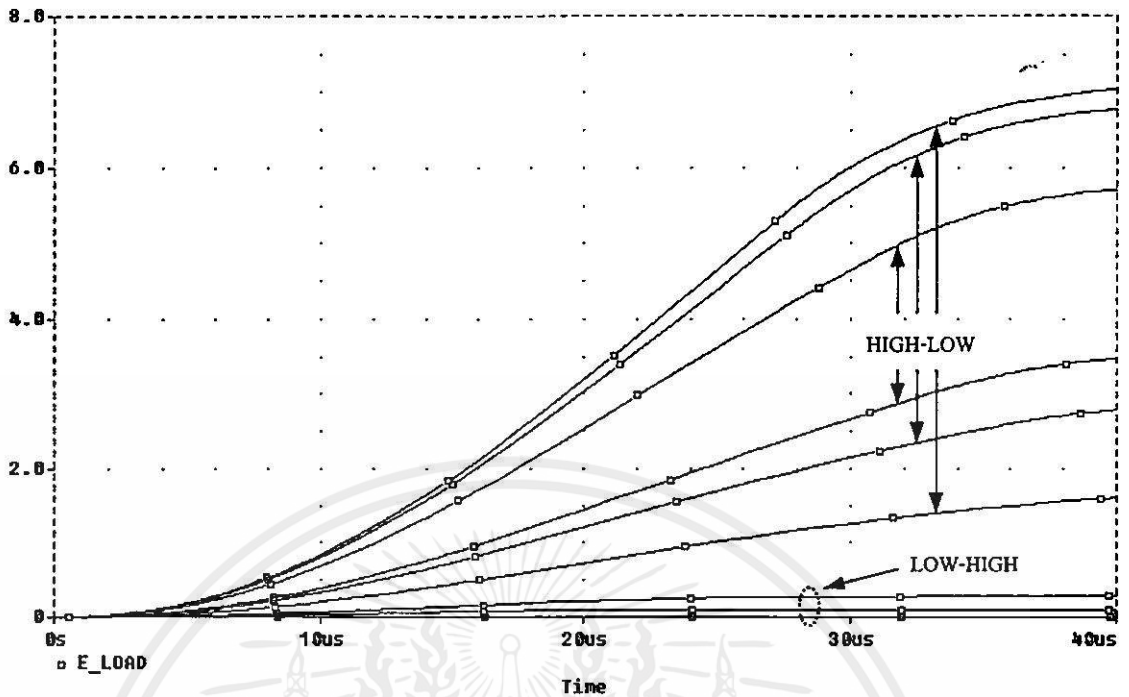


รูปที่ 4.23 ผลการเขียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุด  
ที่โหลด  $50 \Omega$  ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20  $\mu\text{s}$  3kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร



รูปที่ 4.24 ผลการเขียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จในรูปของพลังงานสะสมของ  
อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20  $\mu\text{s}$  3 kA ที่ระยะการติดตั้ง  
เท่ากับ 20 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งผู้พิมพ์ก็ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏและต้องขออภัยเป็นอย่างสูงต่อเจ้าของลิขสิทธิ์ที่พิมพ์เรื่องนี้ไว้ใช้



รูปที่ 4.25 ผลการเปลี่ยนแปลงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จในรูปของพลังงานสะสมของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 8/20  $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3.2 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จแบบ Low-High ทำให้การป้องกันระบบดีที่สุดในรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s 20 kA

ตารางที่ 4.17 – 4.19 และรูปที่ 4.26 – 4.32 แสดงผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance และ load ด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 4.4 ที่ระยะการติดตั้งตั้งแต่ 5 10 และ 20 เมตรรูปคลื่นเสิร์จเป็น 10/350  $\mu$ s 20 kA ทำการจำลองในวงจรตามรูป 4.1 ผลการเลียนแบบแสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าและพลังงานสะสมที่ตัวอุปกรณ์จัดเสิร์จรวมทั้งที่โหลด 50  $\Omega$  แสดงให้เห็นว่า การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จ Low-High ทำให้การป้องกันระบบจากเสิร์จดีที่สุด โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ load กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด 50  $\Omega$  มีค่าต่ำสุด นอกจากนี้พลังงานสะสมที่อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ load ยังมีค่าต่ำกว่าแบบ High-Low ที่ระยะการติดตั้งเท่ากัน ทำให้สามารถเลือกใช้ขนาดอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ load เล็กลงและราคาไม่แพง

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับรูปที่ 4.19 ถึง 4.25 พบว่าผลการเลียนแบบด้วยรูปคลื่นทั้ง 2 สอดคล้องกันถึงแม้ว่ารูปคลื่น 10/350  $\mu$ s มีคาบเวลาการเกิดที่ยาวกว่า

ตารางที่ 4.17 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 5 เมตร

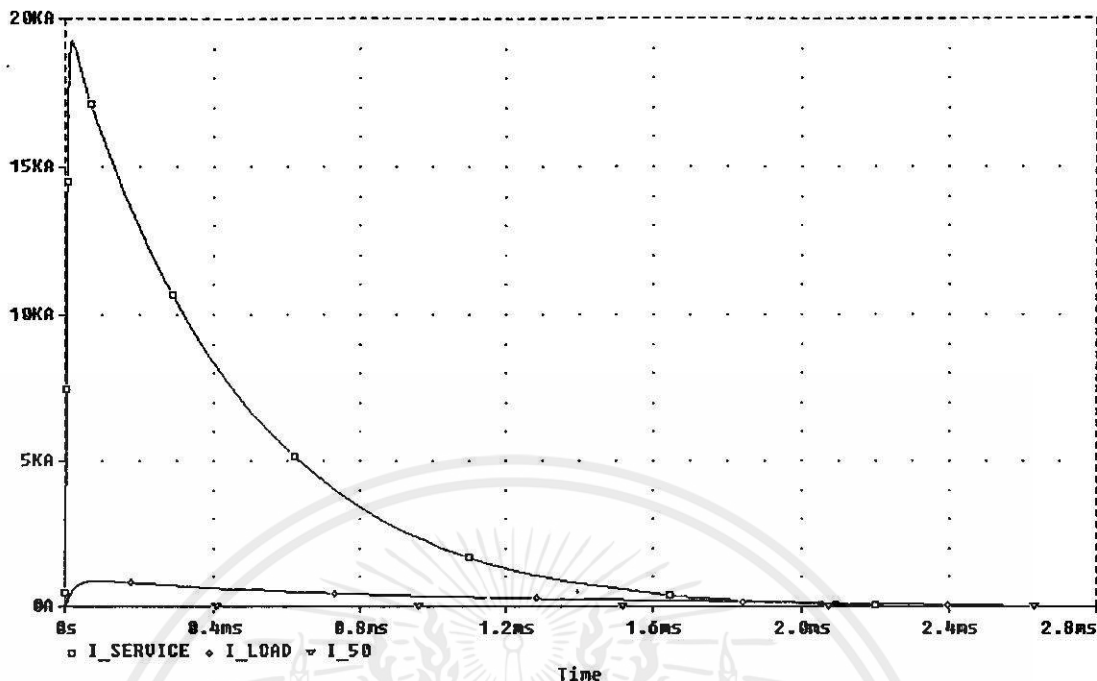
| รูปแบบ   | อุปกรณ์จัดเสิร์จ |           | แรงดันไฟฟ้า (V)  |          | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |          |             | พลังงานสะสม (J)  |          |
|----------|------------------|-----------|------------------|----------|----------------------|----------|-------------|------------------|----------|
|          | Service entrance | Load      | Service entrance | Load     | Service entrance     | Load     | 50 $\Omega$ | Service entrance | Load     |
| High-Low | B80K420          | V320LA20A | 1,364.90         | 1,054.60 | 17,845               | 2,839.80 | 21.09       | 8,622.90         | 2,051.20 |
|          |                  | V275LA20A | 1,360.50         | 1,036.00 | 17,582               | 3,077.80 | 20.72       | 8,090.40         | 2,375.40 |
|          |                  | V250LA20A | 1,356.80         | 975.45   | 17,382               | 3,474.80 | 19.51       | 7,521.50         | 2,651.90 |
|          | B80K320          | V275LA20A | 1,031.50         | 823.00   | 18,447               | 1,869.10 | 16.46       | 7,323.30         | 988.38   |
|          |                  | V250LA20A | 1,028.90         | 773.01   | 18,255               | 2,275.50 | 15.46       | 6,860.20         | 1,289.70 |
|          | B80K275          | V250LA20A | 869.42           | 712.34   | 18,782               | 1,405.80 | 14.25       | 6,520.60         | 588.74   |
| Low-High | B80K250          | V420LA20A | 801.69           | 803.68   | 19,780               | 5.01     | 16.03       | 6,649.80         | 355.58   |
|          |                  | V320LA20A | 801.02           | 766.96   | 19,537               | 287.43   | 15.34       | 6,590.60         | 50.58    |
|          |                  | V275LA20A | 798.06           | 716.48   | 19,223               | 731.83   | 14.33       | 6,406.10         | 159.39   |
|          | B80K275          | V420LA20A | 876.19           | 871.98   | 19,757               | 31.02    | 17.44       | 7,280.70         | 3.32     |
|          |                  | V320LA20A | 875.06           | 815.17   | 19,350               | 517.07   | 16.30       | 7,129.10         | 128.53   |
|          | B80K320          | V420LA20A | 1,044.60         | 1,013.60 | 19,511               | 261.61   | 20.27       | 8,564.70         | 55.38    |

ตารางที่ 4.18 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 10 เมตร

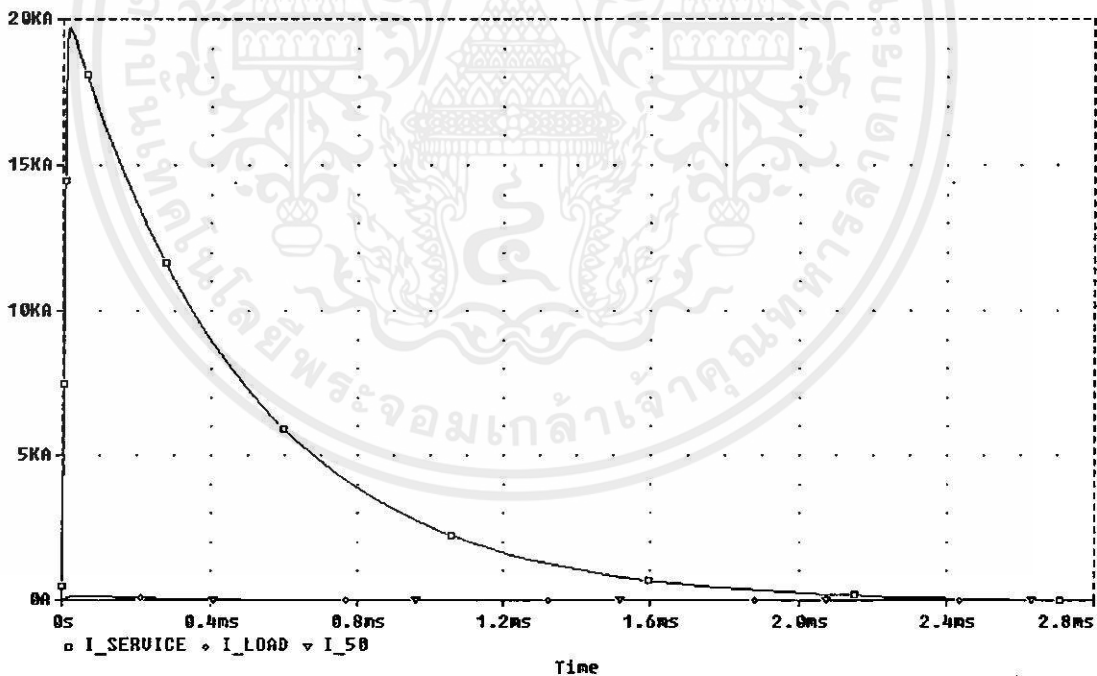
| รูปแบบ   | อุปกรณ์จัดเสิร์จ |           | แรงดันไฟฟ้า (V)  |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |          |             | พลังงานสะสม (J)  |          |
|----------|------------------|-----------|------------------|--------|----------------------|----------|-------------|------------------|----------|
|          | Service entrance | Load      | Service entrance | Load   | Service entrance     | Load     | 50 $\Omega$ | Service entrance | Load     |
| High-Low | B80K420          | V320LA20A | 1,378.10         | 975.94 | 18,597               | 1,867.20 | 19.52       | 9,418.60         | 1,399.80 |
|          |                  | V275LA20A | 1,375.50         | 929.29 | 18,454               | 2,066.00 | 18.59       | 8,968.70         | 1,638.40 |
|          |                  | V250LA20A | 1,371.90         | 795.99 | 18,263               | 2,656.90 | 15.92       | 8,218.00         | 1,902.70 |
|          | B80K320          | V275LA20A | 1,038.40         | 769.29 | 19,007               | 1,227.20 | 15.39       | 7,706.00         | 674.51   |
|          |                  | V250LA20A | 1,036.60         | 719.87 | 18,893               | 1,502.70 | 14.39       | 7,401.40         | 857.39   |
|          | B80K275          | V250LA20A | 873.80           | 672.21 | 19,167               | 946.52   | 13.44       | 6,936.10         | 255.94   |
| Low-High | B80K250          | V420LA20A | 803.89           | 799.87 | 19,773               | 4.73     | 15.99       | 6,652.00         | 335.68   |
|          |                  | V320LA20A | 802.12           | 747.57 | 19,627               | 216.99   | 14.95       | 6,603.60         | 40.97    |
|          |                  | V275LA20A | 800.46           | 684.84 | 19,430               | 500.74   | 13.69       | 6,469.70         | 143.09   |
|          | B80K275          | V420LA20A | 878.25           | 868.09 | 19,701               | 28.54    | 17.36       | 7,282.70         | 3.07     |
|          |                  | V320LA20A | 876.73           | 789.02 | 19,502               | 382.64   | 15.78       | 7,164.20         | 99.77    |
|          | B80K320          | V420LA20A | 1,045.50         | 994.25 | 19,581               | 210.88   | 19.89       | 8,576.30         | 46.83    |

ตารางที่ 4.19 ผลการเลียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High ด้วยรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จ 20 เมตร

| รูปแบบ   | อุปกรณ์จัดเสิร์จ |           | แรงดันไฟฟ้า (V)  |        | กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A) |          |             | พลังงานสะสม (J)  |          |
|----------|------------------|-----------|------------------|--------|----------------------|----------|-------------|------------------|----------|
|          | Service entrance | Load      | Service entrance | Load   | Service entrance     | Load     | 50 $\Omega$ | Service entrance | Load     |
| High-Low | B80K420          | V320LA20A | 1,386.80         | 900.11 | 19,065               | 1,119.40 | 18.00       | 10,113.00        | 875.34   |
|          |                  | V275LA20A | 1,385.10         | 788.45 | 18,977               | 1,440.70 | 15.77       | 9,630.00         | 1,075.90 |
|          |                  | V250LA20A | 1,383.80         | 725.71 | 18,923               | 1,579.60 | 14.51       | 9,380.50         | 1,142.10 |
|          | B80K320          | V275LA20A | 1,042.80         | 719.12 | 19,349               | 753.19   | 14.38       | 8,032.10         | 423.73   |
|          |                  | V250LA20A | 1,042.10         | 664.48 | 19,292               | 868.83   | 13.29       | 7,852.90         | 522.79   |
|          | B80K275          | V250LA20A | 876.83           | 630.04 | 19,468               | 567.27   | 12.60       | 6,936.10         | 255.94   |
| Low-High | B80K250          | V420LA20A | 804.14           | 796.14 | 19,812               | 4.20     | 15.92       | 6,653.80         | 295.74   |
|          |                  | V320LA20A | 802.92           | 726.61 | 19,697               | 154.43   | 14.53       | 6,618.40         | 30.54    |
|          |                  | V275LA20A | 802.19           | 653.71 | 19,602               | 321.43   | 13.07       | 6,529.70         | 96.22    |
|          | B80K275          | V420LA20A | 879.81           | 861.38 | 19,781               | 24.62    | 17.23       | 7,287.90         | 2.66     |
|          |                  | V320LA20A | 878.36           | 776.66 | 19,639               | 214.94   | 15.53       | 7,223.30         | 54.81    |
|          | B80K320          | V420LA20A | 1,046.50         | 968.48 | 19,649               | 153.79   | 19.37       | 8,592.40         | 36.38    |

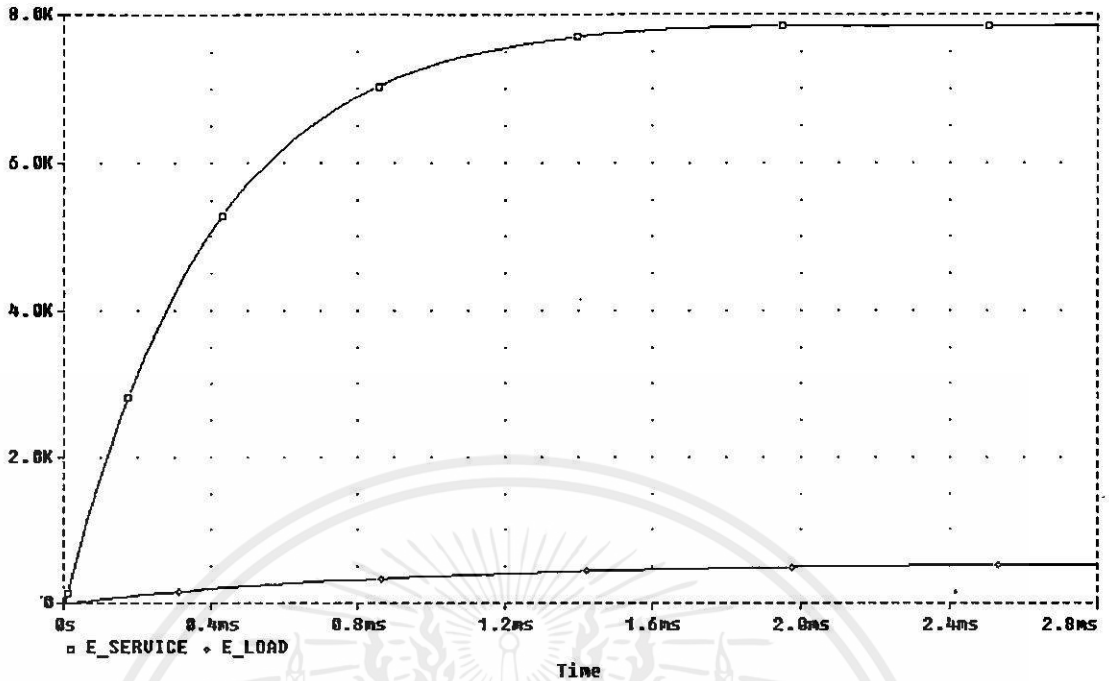


(a) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อติดตั้ง B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load (High-Low)

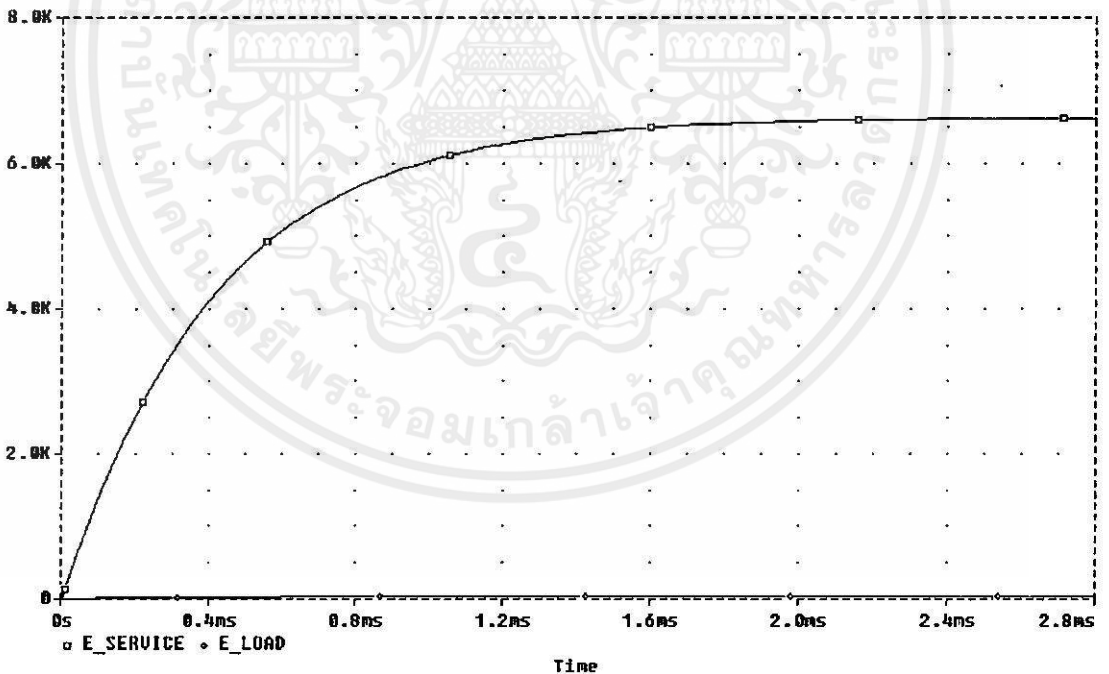


(b) กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อติดตั้ง B80K250 ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load (Low-High)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.26 ผลการเขียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ  
Low-High แสดงในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ Service entrance ที่ load และที่ 50 Ω  
ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350 μs 20 kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 20 เมตร

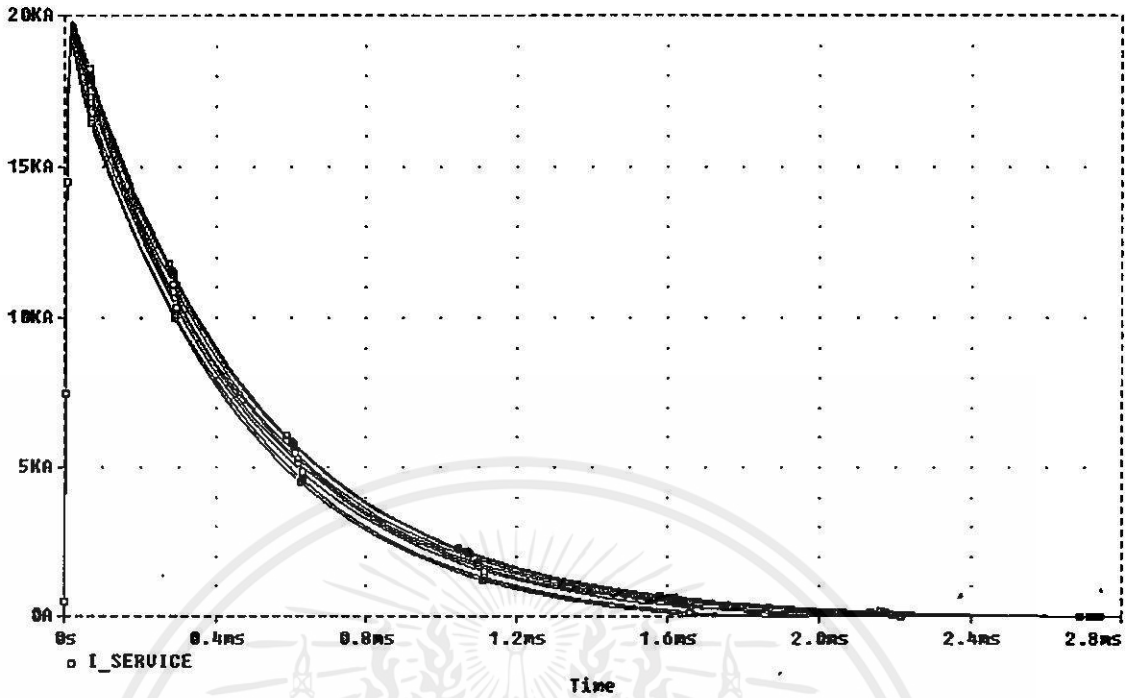


(a) พลังงานสะสมของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K320 ที่ Service entrance และ V250LA20A ที่ load (High-Low)

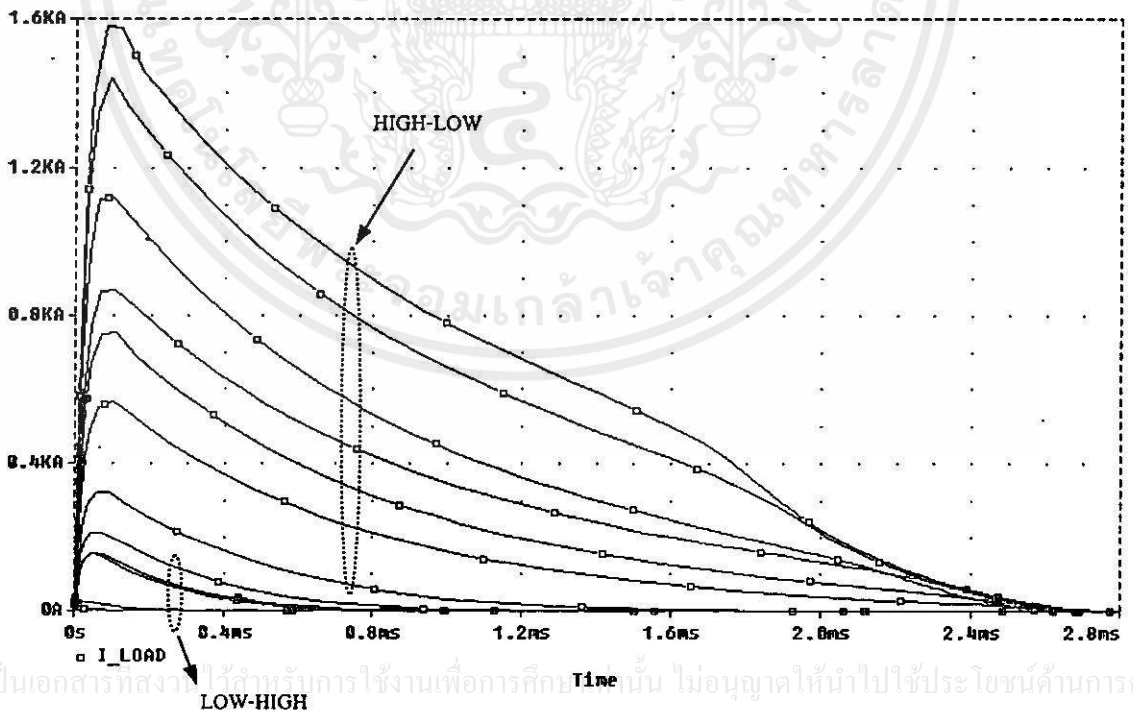


(b) พลังงานสะสมของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อติดตั้ง B80K250 ที่ Service entrance และ V320LA20A ที่ load (Low-High)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในทรัพย์สินของสถาบันฯ และขอสงวนลิขสิทธิ์ในเอกสารนี้ไว้ทุกประการ  
 รูปที่ 4.27 ผลการเปลี่ยนแปลงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จทั้งแบบ High-Low และ Low-High แสดงพลังงานสะสมของอุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Service entrance และที่ load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350  $\mu$ s 20kA ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์จัดเสิร์จเท่ากับ 20 เมตร



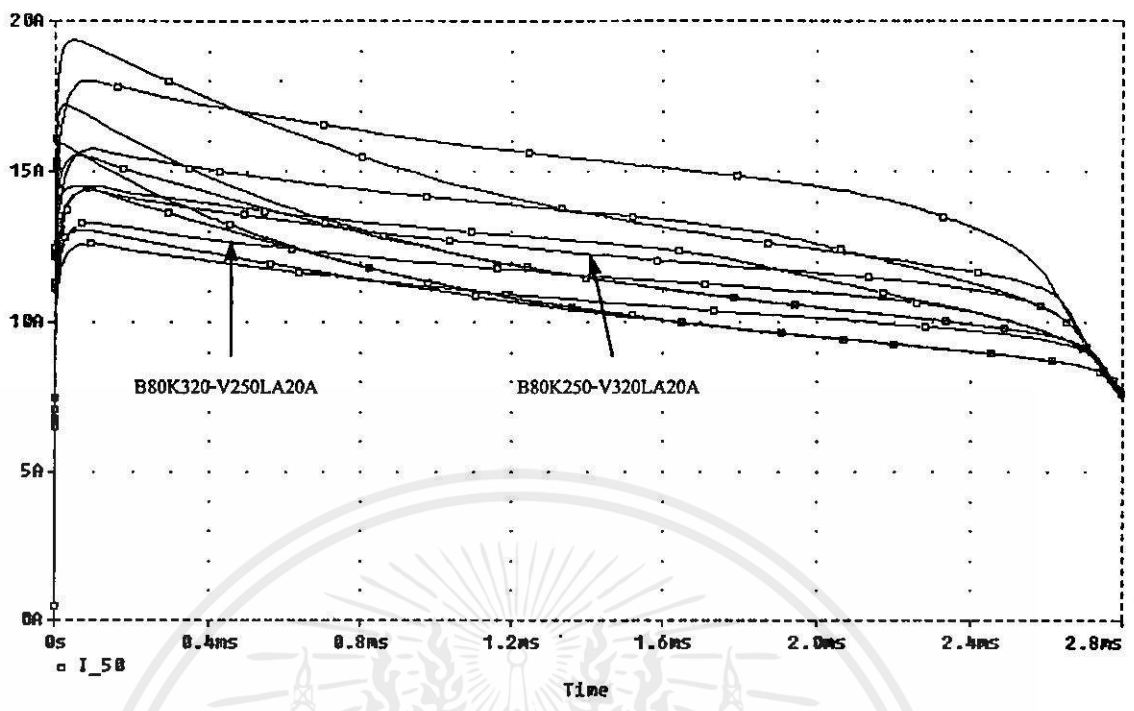
รูปที่ 4.28 ผลการเขียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสีจในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ Service entrance ด้วยรูปคลื่นเสีจ 10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร



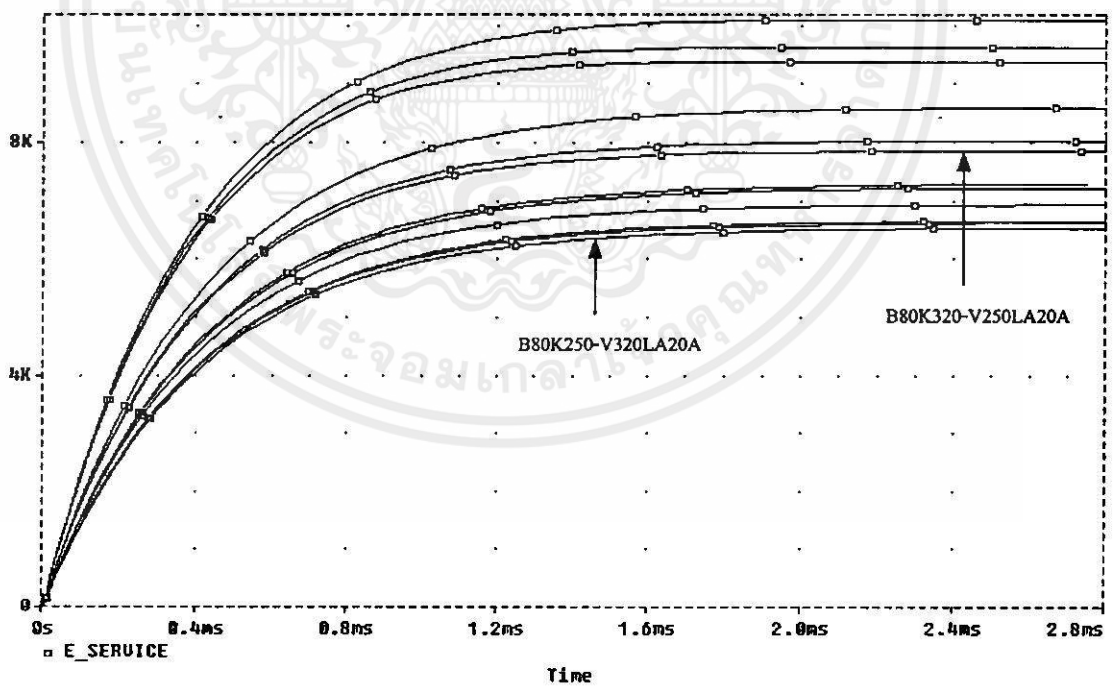
รูปที่ 4.29 ผลการเขียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสีจในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ Load ด้วยรูปคลื่นเสีจ 10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องแจ้งอธิบดีเจ้าพนักงานออกสารทุกครั้งที่มีสารไปใช้

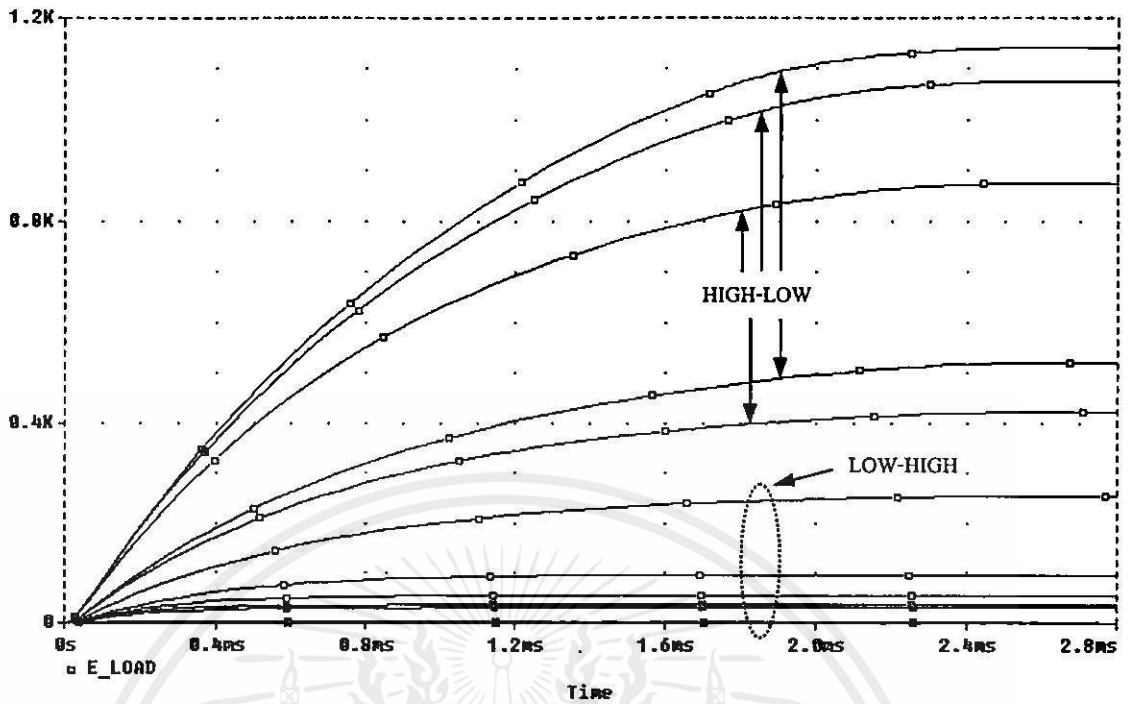


รูปที่ 4.30 ผลการเขียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จในรูปของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลลง 50 Ω ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร



รูปที่ 4.31 ผลการเขียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จในรูปของพลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ 20 เมตร

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามมิให้ผู้อื่นนำข้อมูลนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 4.32 ผลการเขียนแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จในรูปของพลังงานสะสมของ  
อุปกรณ์จัดเสิร์จที่ Load ด้วยรูปคลื่นเสิร์จ 10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งเท่ากับ  
20 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิเคราะห์

### 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการป้องกันเสิร์จภายในอาคารเลือกใช้ เมทอลลอกไซดาร์ริสเตอร์ เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จโดยอาศัยคุณลักษณะของเมทอลลอกไซดาร์ริสเตอร์ ที่เป็นตัวต้านทานที่มีความสัมพันธ์แรงดันกับกระแสเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น คือ มีความต้านทานสูง ที่แรงดันไฟฟ้าปกติและมีความต้านทานต่ำ เมื่อมีแรงดันสูงผิดปกติ (เสิร์จ) เกินแรงดัน threshold ซึ่งจะควบคุมให้แรงดันเสิร์จมีค่าเข้าใกล้แรงดันปกติมากที่สุด แต่อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จเพียงตัวเดียวไม่สามารถที่จะทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ จึงต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จทั้งที่ Service entrance และ load โดยทำการเลียนแบบการทำงานของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จด้วยโปรแกรม PSpice ศึกษาผลของตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ ระยะเวลาติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จ ระหว่าง Service entrance และ load รวมถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันเมื่อนำมาติดตั้งร่วมกัน

จากผลการเลียนแบบการทำงานของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ พบว่า อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance จะทำหน้าที่ป้องกันเสิร์จจากภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถที่จะป้องกันเสิร์จที่เกิดจากภายในอาคารได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเพิ่มที่ load นอกจากนั้นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance ยังเป็นตัวที่ขจัดเสิร์จส่วนใหญ่ (ทั้งแรงดันและกระแส) ออกจากระบบ ระยะเวลาติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลถึงการป้องกันเสิร์จภายในอาคาร กล่าวคือ เมื่อระยะเวลาติดตั้งเพิ่มขึ้นซึ่งก็คือ อิมพีแดนซ์ของระบบเพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายของกระแสเสิร์จในระบบลดลง แต่ระยะเวลาติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับแต่ละอุปกรณ์ขจัดเสิร์จนั้นทางผู้ผลิตอุปกรณ์ขจัดเสิร์จควรที่จะกำหนดออกมาให้ชัดเจน [14]

การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จทั้งแบบ Low-High และ High-Low สามารถป้องกันเสิร์จที่เกิดขึ้นได้แต่จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จแบบ Low-High จะให้ผลการป้องกันระบบจากเสิร์จได้ดีที่สุด [7,15] คือ กระแสเสิร์จจะถูกขจัดไปมากที่สุดที่ Service entrance ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน load หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าภายในอาคารมีค่าต่ำ (ใกล้กับกระแสใช้งานปกติ) เช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในอาคาร พลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance มีค่าใกล้เคียงกันทั้งแบบ High-Low และ Low-High ในขณะที่พลังงานสะสมของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ load มีค่าต่ำกว่าในแบบของ Low-High ดังนั้นทำให้สามารถเลือกใช้ขนาดของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ load เล็กกลงได้ เช่น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้อุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ load มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 14 mm แต่หลังจากการจำลองผลพบว่ามีความ

เป็นไปได้ที่จะเปลี่ยนไปใช้เส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 10 mm แทนและจากผลการจำลองการทำงานพบว่าเมื่อใช้ B80K250 เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ Service entrance และ V320LA20A เป็นอุปกรณ์ขจัดเสิร์จที่ load จะทำให้การป้องกันเสร็จเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้า 220 V



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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] R.B. Standler, "Transmission line models for coordination of surge-protective devices," IEEE Int. Sym. on Electromagnetic Compatibility, pp.358-362, Aug 1993.
- [6] J. S. Lai, F.D. Martzloff, "Coordinating cascade surge protection devices : High-Low versus Low-High," IEEE Trans. Industry Applications Vol. 29, pp. 680-687, Jul 1993.
- [7] R.B. Standler, "Coordination of surges arresters and suppressors for use on low-voltages mains," Ninth Int. Sym. on Electromagnetic Compatibility, pp.517-524, Aug 1993.
- [8] ANSI/IEEE C62.41-1991, IEEE Recommended Practice on surge voltages in low-voltage AC power circuits.
- [9] Technical Product Information : Passive components, Siemens Matsushita Components Corp., 1998.
- [10] Transient voltage suppression device, Harris Corp.
- [11] IEC 60-2 (1973), High voltage test techniques - Part 2 : Test procedures.
- [12] IEEE std. 4-1978, Standard Techniques for High voltage testing.
- [13] IEC 801-4 (1988), Electromagnetic Compatibility for Industrial process measurement and control equipment – Part 4 : Electrical Fast transient/Burst requirements.
- [14] A. Rousseau, T. Perche, "Coordination of surge arresters in the low voltage field," 17<sup>th</sup> INTELEC '95 Int. Telecommunications Energy Conference , pp.119-125, 1995.
- [15] O. T. Hostfret, T. Hervland, "Coordination of surge protective devices in power supply systems needs for secondary protection," 21<sup>st</sup> ICLP Int. Conference on Lightning protection, pp.381-386, 1992.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## ข้อมูลเชิงสถิติของการเกิดเสร็จ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.1 ข้อมูลเชิงสถิติของการเกิดเสิร์จ (Surge database)

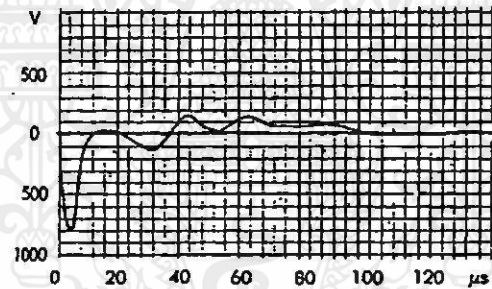
นับตั้งแต่ปี 1980 ได้มีการบันทึกจำนวนการเกิดเสิร์จเป็นข้อมูลเชิงสถิติ จากหลายๆ แหล่งกำเนิดเสิร์จ โดยหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

### ก.1.1 การบันทึกโดย Bell Telephone Laboratory

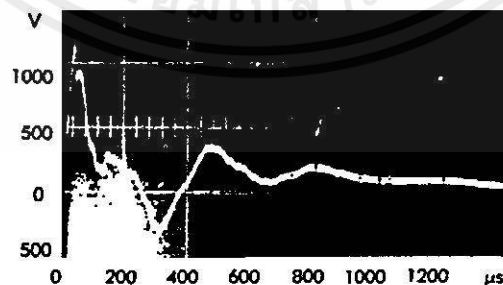
สถิติจำนวนการเกิดเสิร์จในระบบแรงดันไฟฟ้า 120 โวลต์ที่ BTL Facility ในเมือง Chester ตลอด 42 เดือนเป็นดังนี้

1. เกิดขึ้น 146 ครั้ง ที่แรงดัน 300 โวลต์ ถึง 500 โวลต์
2. เกิดขึ้น 14 ครั้ง ที่แรงดัน 500 โวลต์ ถึง 1000 โวลต์
3. เกิดขึ้น 3 ครั้ง ที่แรงดัน 1000 โวลต์ ถึง 1500 โวลต์
4. เกิดขึ้น 3 ครั้ง ที่แรงดันมีค่าเกิน 1500 โวลต์

ภาพของเสิร์จบันทึกจากหลายๆ สถานที่โดย Bell แสดงดังรูป ก.1

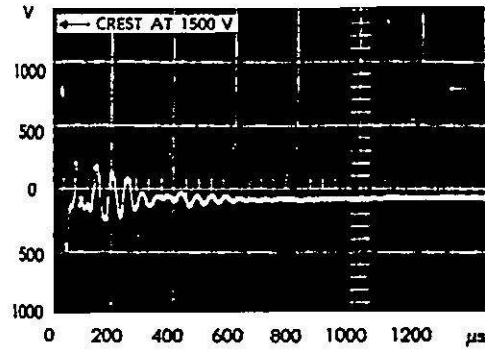


(ก) ที่จุดต่อไฟฟ้าที่แรงดัน 120 โวลต์ (Laboratory Bench)

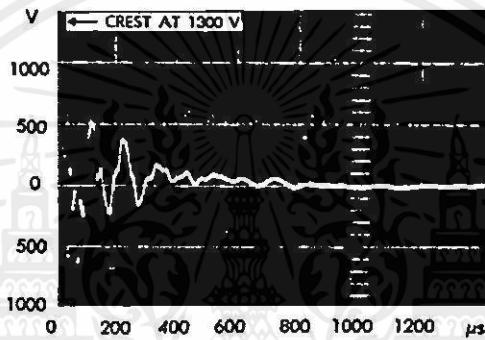


(ข) ที่ Service entrance ที่แรงดัน 277/480 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะผิดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ที่ Service entrance ที่แรงดัน 277/480 โวลต์



(ง) ที่ Service entrance ที่แรงดัน 277/480 โวลต์

รูป ก.1 การบันทึกเสิร์จโดย Bell Telephone Laboratory

#### ก.1.2 การบันทึกโดยบริษัท General Electric (GE)

ผลของจำนวนการเกิดเสิร์จแสดงในตารางที่ ก.1 และ ก.2 สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) 3 % ของจำนวนสถานที่ที่สำรวจในประเทศสหรัฐอเมริกาจะเกิดเสิร์จมากกว่า 1200 โวลต์

(2) อัตราความเสียหายของอุปกรณ์ต่างๆ ลดลง 100 : 1 เมื่อระดับการทนแรงดันไฟฟ้าเพิ่มจาก 2 kV เป็น 6 kV

การจำลองการโจมตีของฟ้าผ่าในวงจรไฟฟ้า เช่น กระแสอิมพัลส์ 1.5 kA (ประมาณ 8/20  $\mu$ s) ที่เกิดขึ้นในสายกราวด์ แสดงดังรูปที่ ก.2 แรงดันเปิดวงจรที่จุดต่อไฟฟ้าของวงจรย่อยมีค่าแรงดันสูงสุด 2200 โวลต์ แสดงดังรูป ก.3 เมื่อทำการต่อโหลด 130  $\Omega$  ที่จุดต่อไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเหลือ 1400 โวลต์โดยมีการหน่วงมากขึ้น แสดงดังรูปที่ ก.4 เมื่อมีกระแสอิมพัลส์ 30 kA กระทบกับระบบจ่าย กระแสดีสชาร์จที่ผ่านในกับดักฟ้าผ่าจะมีค่า 3.5 kA แสดงดังรูปที่ ก.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกริใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 การบันทึกจำนวนเสร็จที่มีค่ามากกว่า 1200 โวลต์

| สถานที่         | จำนวนบ้าน<br>ที่สำรวจ | ผลคูณจำนวน<br>บ้านกับสัปดาห์ | จำนวนเสร็จที่<br>เกิด |
|-----------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|
| Providence, RI  | 6                     | 60                           | 1                     |
| Ashboro, NC     | 13                    | 85                           | ไม่มี                 |
| Dekalb, IL      | 11                    | 60                           | 2                     |
| Somersworth, NH | 3                     | 48                           | 1                     |
| Chicago, IL     | 12                    | 58                           | ไม่มี                 |
| Cleveland, OH   | 8                     | 106                          | 1                     |
| Decatur, IL     | 12                    | 72                           | 2                     |
| Holland, MI     | 7                     | 56                           | ไม่มี                 |
| Auburn, NY      | 3                     | 70                           | ไม่มี                 |
| Springfield, PA | 1                     | 24                           | ไม่มี                 |
| Ashland, MA     | 6                     | 72                           | ไม่มี                 |
| Pittsfield, MA  | 3                     | 60                           | 1                     |
| Plainville, CT  | 3                     | 60                           | ไม่มี                 |
| Lynchburg, VA   | 3                     | 15                           | ไม่มี                 |
| Total           | 91                    | 846                          | 8 ใน 18 บ้าน          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

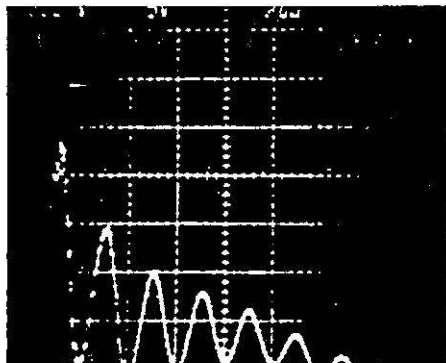
ตารางที่ ก.2 จำนวนบ้านในสถานที่ที่สำรวจที่เกิดเสร็จมากกว่า 1200 โวลต์

| สถานที่         | จำนวนบ้าน<br>ที่สำรวจ | ระยะเวลาบันทึก<br>(สัปดาห์) | จำนวนบ้านที่<br>เกิดเสร็จ |
|-----------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Providence, RI  | 4                     | 2 ~ 6                       | ไม่มี                     |
| Cleveland, OH   | 28                    | 2 ~ 4                       | ไม่มี                     |
| Auburn, NY      | 12                    | 2 ~ 3                       | ไม่มี                     |
| Lynchburg, VA   | 3                     | 2 ~ 3                       | ไม่มี                     |
| Syracuse, NY    | 8                     | 1 ~ 2                       | 1                         |
| Chicago, IL     | 23                    | 1 ~ 6                       | ไม่มี                     |
| Ashland, MA     | 24                    | 1 ~ 2                       | 1                         |
| Holland, MI     | 6                     | 2 ~ 10                      | ไม่มี                     |
| Louisville, KY  | 10                    | 2 ~ 6                       | ไม่มี                     |
| Somersworth, NH | 50                    | 1 ~ 2                       | 1                         |
| Plainville, CT  | 5                     | 10                          | ไม่มี                     |
| Ashboro, NC     | 24                    | 1 ~ 2                       | ไม่มี                     |
| Fort wayne, IN  | 38                    | 1 ~ 4                       | 3                         |
| Dekalb, IL      | 14                    | 3 ~ 12                      | ไม่มี                     |

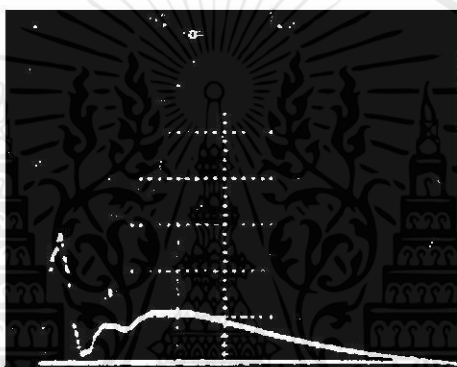


รูปที่ ก.2 กระแสอิมพัลส์ : 500 A/div และ 5  $\mu$ s/div

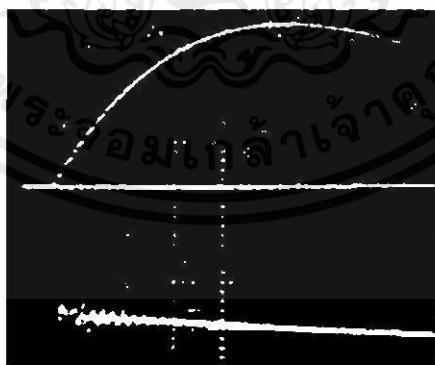
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 กระแสอิมพัลส์ : 500 V/div และ 2  $\mu$ s/div



รูปที่ ก.4 ที่โหลด 130  $\Omega$  : 500 V/div และ 2  $\mu$ s/div



รูปที่ ก.5 กระแสดีสชาร์จ : 500 V/div และ 2  $\mu$ s/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

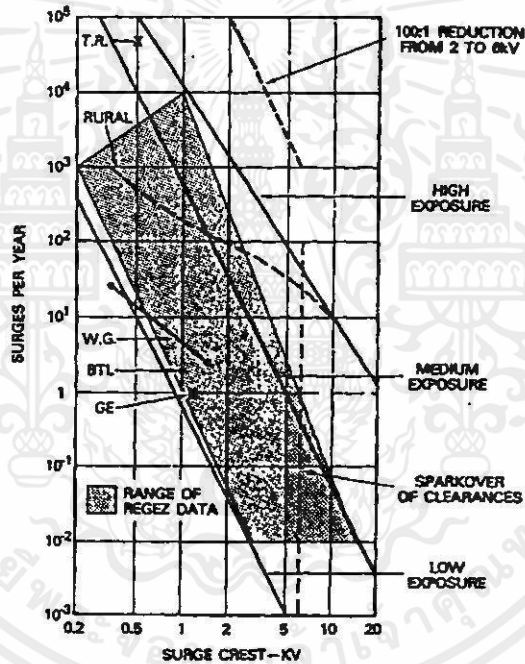
ก.1.3 การบันทึกสถิติโดย Landis และบริษัท Gyr.  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตามที่มีเหตุอันสมควรและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
เครื่องบันทึกที่ติดตั้งไว้หลายๆ สถานที่ในระบบ 220/380 V. ในประเทศสวิตเซอร์  
แลนด์ รูปที่ ก.6 แสดงตามความถี่ของการเกิดกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่อาคารเซิงพานิชย์ อาคารเซิง



### ก.1.5 การรวบรวมผลการบันทึก

จากฐานข้อมูลทั้งหมดสามารถนำมาแสดงด้วยกราฟของแรงดันเสิร์จกับความถี่ของการเกิดเสิร์จ ดังรูปที่ ก.7

- (1) Bell Telephone Laboratory (BTL) รายงานสถิติจะเกิดเสิร์จ 1 kV ประมาณ 2 ครั้งต่อปี
- (2) บริษัท General Electric (GE) รายงานสถิติจะเกิดเสิร์จ 1.2 kV ประมาณ 1 ครั้งต่อปี
- (3) ข้อมูลจาก GE clock แสดงอัตราส่วน 100 : 1 ในอัตราการเกิดเสิร์จจาก 2 kV เป็น 6 kV
- (4) ข้อมูลจาก Regez แสดงบริเวณสถานที่ส่วนใหญ่ของการเกิดเสิร์จซึ่งไม่รวมพื้นที่แถบชนบทที่มีสายส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดผ่าน
- (5) รายงานสถิติจาก Working Group (WG) แสดงถึงเส้นกราฟที่มีความชันไม่สูงมากเนื่องจากอิทธิพลของสถานที่ซึ่งอยู่ภายนอกอาคาร



รูปที่ ก.7 การบันทึกข้อมูลผสมของเสิร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

## โปรแกรมการเลียนแบบการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. โปรแกรมจำลองการป้องกันเสิร์จจากภายใน ด้วยรูปคลื่น  $8/20 \mu\text{s}$  3 kA มีระยะการติดตั้งที่ Service entrance และ load เป็น 20 เมตร ติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จทั้งที่ Service entrance และ Load

I 70

+EXP 0 3.04k 0 3usec 14.5usec 7.88usec

T1 1 2 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=20 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T2 1 8 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T3 1 9 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T4 1 10 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T5 1 11 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T6 1 12 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T7 2 14 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

R1 14 7 2

R2 3 4 1u

R3 5 6 13.97m

R4 8 0 10

R5 9 0 240

R6 10 0 180

R7 11 0 200

R8 12 13 40

R9 2 0 50

C1 3 0 14000p

C2 5 0 500p

C3 11 0 0.005u

L1 1 3 30n

L2 2 5 12nH

L3 13 0 6m

MOV1 4 0 B80K320 PARAMS:TOL=-10

MOV2 6 0 V250LA20A PARAMS:TOL=-10

.TRAN 20ns 40us

.PROBE

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากฝ่าฝืนมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โปรแกรมจำลองการป้องกันลัดวงจรจากภายนอก ด้วยรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งระหว่าง Service entrance และ load เท่ากับ 20 เมตร โดยติดตั้งอุปกรณ์ขจัดลัดวงจรที่ Service entrance เพียงตำแหน่งเดียว

I1 1 0

+EXP 0 20.96k 0 480usec 1usec 4usec

T1 2 5 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=20 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T2 2 6 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T3 2 7 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T4 2 8 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T5 2 9 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T6 2 10 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

R1 1 2 2

R2 3 4 1u

R4 6 0 10

R5 7 0 240

R6 8 0 180

R7 9 0 200

R8 10 11 40

R9 5 0 50

C1 3 0 11000p

C3 9 0 0.005u

L1 2 3 30n

L3 11 0 6m

MOV1 4 0 B80K320 PARAMS:TOL=-10

.TRAN 20ns 2800us

.PROBE

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โปรแกรมสำหรับการป้องกันเสิร์จจากภายนอก ด้วยรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งระหว่าง Service entrance และ load เท่ากับ 20 เมตร โดยติดตั้งอุปกรณ์ขจัดเสิร์จทั้งที่ Service entrance และ Load

I1 1 0

+EXP 0 20.96k 0 480usec 1usec 4usec

T1 2 5 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=20 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T2 2 8 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T3 2 9 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T4 2 10 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T5 2 11 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T6 2 12 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

R1 1 2 2

R2 3 4 1u

R3 6 7 13.97u

R4 8 0 10

R5 9 0 240

R6 10 0 180

R7 11 0 200

R8 12 13 40

R9 5 0 50

C1 3 0 11000p

C2 6 0 500p

C3 11 0 0.005u

L1 2 3 30n

L2 5 6 12n

L3 13 0 6m

MOV1 4 0 B80K320 PARAMS:TOL=-10

MOV2 7 0 V250LA20A PARAMS:TOL=-10

.TRAN 20ns 2800us

.PROBE

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โปรแกรมจำลองการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จแบบ Low-High ด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งระหว่าง Service entrance และ load เท่ากับ 5 เมตร

I1 1 0

+EXP 0 3.04k 0 3usec 14.5usec 7.88usec

T1 2 5 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=5 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T2 2 8 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T3 2 9 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T4 2 10 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T5 2 11 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T6 2 12 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

R1 1 2 2

R2 3 4 1u

R3 6 7 18.27u

R4 8 0 10

R5 9 0 240

R6 10 0 180

R7 11 0 200

R8 12 13 40

R9 5 0 50

C1 3 0 14000p

C2 6 0 380p

C3 11 0 0.005u

L1 2 3 30n

L2 5 6 12n

L3 13 0 6m

MOV1 4 0 B80K250 PARAMS:TOL=-10

MOV2 7 0 V320LA20A PARAMS:TOL=-10

.TRAN 20ns 40us

.PROBE

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. โปรแกรมจำลองการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสีร้จแบบ Low-High ด้วยรูปคลื่น  
8/20  $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งระหว่าง Service entrance และ load เท่ากับ 10 เมตร

II 1 0

+EXP 0 3.04k 0 3usec 14.5usec 7.88usec

T1 2 5 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T2 2 8 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T3 2 9 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T4 2 10 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T5 2 11 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T6 2 12 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

R1 1 2 2

R2 3 4 1u

R3 6 7 18.27u

R4 8 0 10

R5 9 0 240

R6 10 0 180

R7 11 0 200

R8 12 13 40

R9 5 0 50

C1 3 0 14000p

C2 6 0 380p

C3 11 0 0.005u

L1 2 3 30n

L2 5 6 12n

L3 13 0 6m

MOV1 4 0 B80K250 PARAMS:TOL=-10

MOV2 7 0 V320LA20A PARAMS:TOL=-10

.TRAN 20ns 40us

.PROBE

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. โปรแกรมจำลองการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสีร้จแบบ Low-High ด้วยรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s 3 kA ที่ระยะการติดตั้งระหว่าง Service entrance และ load เท่ากับ 20 เมตร

I1 1 0

+EXP 0 3.04k 0 3usec 14.5usec 7.88usec

T1 2 5 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=20 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T2 2 8 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T3 2 9 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T4 2 10 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T5 2 11 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T6 2 12 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

R1 1 2 2

R2 3 4 1u

R3 6 7 18.27u

R4 8 0 10

R5 9 0 240

R6 10 0 180

R7 11 0 200

R8 12 13 40

R9 5 0 50

C1 3 0 14000p

C2 6 0 380p

C3 11 0 0.005u

L1 2 3 30n

L2 5 6 12n

L3 13 0 6m

MOV1 4 0 B80K250 PARAMS:TOL=-10

MOV2 7 0 V320LA20A PARAMS:TOL=-10

.TRAN 20ns 40us

.PROBE

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. โปรแกรมจำลองการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ขจัดเสิร์จแบบ Low-High ด้วยรูปคลื่น  
10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งระหว่าง Service entrance และ load เท่ากับ 5 เมตร

II 1 0

+EXP 0 20.96k 0 480usec 1usec 4usec

T1 2 5 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=5 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T2 2 8 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T3 2 9 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T4 2 10 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T5 2 11 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T6 2 12 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

R1 1 2 2

R2 3 4 1u

R3 6 7 18.27u

R4 8 0 10

R5 9 0 240

R6 10 0 180

R7 11 0 200

R8 12 13 40

R9 5 0 50

C1 3 0 14000p

C2 6 0 380p

C3 11 0 0.005u

L1 2 3 30n

L2 5 6 12n

L3 13 0 6m

MOV1 4 0 B80K250 PARAMS:TOL=-10

MOV2 7 0 V320LA20A PARAMS:TOL=-10

TRAN 20ns 2800us

.PROBE

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. โปรแกรมจำลองการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสีจแบบ Low-High ด้วยรูปคลื่น  
10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งระหว่าง Service entrance และ load เท่ากับ 10 เมตร

II 1 0

+EXP 0 20.96k 0 480usec 1usec 4usec

T1 2 5 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T2 2 8 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T3 2 9 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T4 2 10 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T5 2 11 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T6 2 12 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

R1 1 2 2

R2 3 4 1u

R3 6 7 18.27u

R4 8 0 10

R5 9 0 240

R6 10 0 180

R7 11 0 200

R8 12 13 40

R9 5 0 50

C1 3 0 14000p

C2 6 0 380p

C3 11 0 0.005u

L1 2 3 30n

L2 5 6 12n

L3 13 0 6m

MOV1 4 0 B80K250 PARAMS:TOL=-10

MOV2 7 0 V320LA20A PARAMS:TOL=-10

เอกสารนี้ TRAN 20ns 2800us ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ก็ตาม ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

.END

9. โปรแกรมจำลองการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จัดเสิร์จแบบ Low-High ด้วยรูปคลื่น  
10/350  $\mu$ s 20 kA ที่ระยะการติดตั้งระหว่าง Service entrance และ load เท่ากับ 20 เมตร

I1 1 0

+EXP 0 20.96k 0 480usec 1usec 4usec

T1 2 5 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=20 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T2 2 8 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T3 2 9 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T4 2 10 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T5 2 11 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

T6 2 12 0 TLUMP8 PARAMS: LEN=10 R=0.024 L=0.75u G=0 C=75p NLUMP=10

R1 1 2 2

R2 3 4 1u

R3 6 7 18.27u

R4 8 0 10

R5 9 0 240

R6 10 0 180

R7 11 0 200

R8 12 13 40

R9 5 0 50

C1 3 0 14000p

C2 6 0 380p

C3 11 0 0.005u

L1 2 3 30n

L2 5 6 12n

L3 13 0 6m

MOV1 4 0 B80K250 PARAMS:TOL=-10

MOV2 7 0 V320LA20A PARAMS:TOL=-10

.TRAN 20ns 2800us

.PROBE

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

## การเผยแพร่งานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สนธยา เมืองน้อย, กอบชัย เคชหาญ, สมยศ จุณณะปิยะ, “อุปกรณ์ขจัดเสิร์จในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำโดยใช้ผลลัพท์เชิงเลข,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2, หน้า 89-94, มิถุนายน, 2543



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายสนธยา เมืองน้อย เกิดเมื่อวันที่ 8 มีนาคม 2518 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2539 ปัจจุบันทำงาน อยู่ในตำแหน่งวิศวกร แผนกวิศวกรรม ที่ บริษัทมิตซูบิชิ อิเล็กทริก คอนซูมเมอร์ โปรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้