

การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่า
พิกัดกระแส 5 kA และ 2.5 kA



นายอรรถพงษ์ ปาติบ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

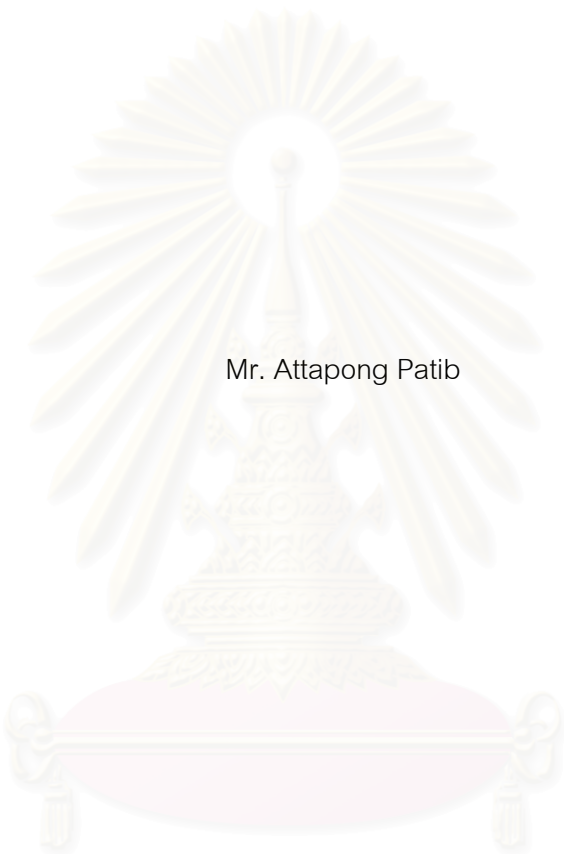
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2690-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE DEVELOPMENT OF LONG DURATION IMPULSE CURRENT GENERATOR
FOR TESTING ON 5 kA AND 2.5 kA ARRESTER



Mr. Attapong Patib

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering

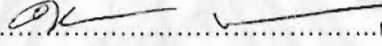
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2690-9


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดัก
ฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA และ 2.5 kA
โดย นายอรรถพงษ์ ปาติบ
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

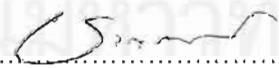
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย สิตาร์จิติ)

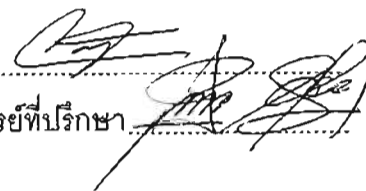
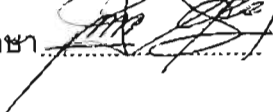

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

อรรถพงษ์ ปาติบ : การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดัก
ฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA และ 2.5 kA (THE DEVELOPMENT OF LONG DURATION
IMPULSE CURRENT GENERATOR FOR TESTING ON 5 KA AND 2.5 KA
ARRESTER) อ. ที่ปรึกษา : ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา, 78 หน้า.
ISBN 974-53-2690-9

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับ
ทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA และ 2.5 kA เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาวิจัย พัฒนา
และวิเคราะห์สมรรถนะของกับดักฟ้าผ่า โดยมีลักษณะสมบัติรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว
เป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC 60099-4 กำหนดทั้งในช่วงเวลา 10%, ช่วงเวลา 90% และค่ายอด
กระแสอิมพัลส์ ในส่วนของเทคนิคและสมการสำหรับหาค่าองค์ประกอบความเหนี่ยวนำ ตัวเก็บ
ประจุอิมพัลส์ และความต้านทานของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ได้นำเสนออย่างมี
ลำดับขั้นตอน ความสัมพันธ์ของสมการต่าง ๆ จะเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดค่าองค์ประกอบ
ของวงจร ก่อนการประกอบสร้างและใช้งานจริงได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรเครื่องกำเนิด
กระแสอิมพัลส์ช่วงยาว โดยใช้โปรแกรม PSPICE

จากการทดสอบใช้งานเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว พบว่าเครื่องกำเนิดสามารถ
สร้างกระแสอิมพัลส์สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA และ 2.5 kA ได้ โดยมีลักษณะ
สมบัติเป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC 60099-4 กำหนดไว้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต 
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ปีการศึกษา 2548

4570642021 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : ARRESTER / LONG DURATION / CURRENT IMPULSE

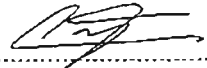
ATTAPONG PATIB : THE DEVELOPMENT OF LONG DURATION IMPULSE
CURRENT GENERATOR FOR TESTING ON 5 kA AND 2.5 kA ARRESTER.

THESIS ADVISOR : WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA, Dr.-Ing, 78 pp.

ISBN 974-53-2690-9

This thesis presents the development of long duration impulse current generator for testing on 5 kA and 2.5 kA arrester in order to make a research and development, performance analysis for lightning arrester. The long duration impulse current waveforms have met the requirements in accordance with IEC 60099-4 including 10% duration, 90% duration and peak value. Techniques and equations which be used to determine the inductance, capacitance and matching resistance of the constructed impulse current generator are represented in orders. The relation of equations is an importance variable for circuit component determination. PSPICE was used to simulate the waveform of the long duration impulse current generator circuit prior construction.

The long duration impulse current generator was used to generate the impulse current for testing on 5 kA and 2.5 kA arrester. The waveform characteristics were satisfied to IEC 60099-4.

Department..... Electrical Engineering..... Student's signature..... 

Field of study..... Electrical Power Engineering..... Advisor's signature..... 

Academic year..... 2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัศมี และ อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณพีรฤตมิ ยุทธโกวิท ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูล และให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านที่อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง และท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ทดสอบ

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

อรรถพงศ์ ปาตีบ

มีนาคม 2549

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	2
1.4 ขอบข่ายของงานวิจัย.....	2
1.5 ผลงานการศึกษาที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. หลักการสร้างกระแสมัลส์ช่วงยาว.....	4
2.1 สาเหตุการเกิดกระแสมัลส์ช่วงยาว.....	4
2.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ.....	5
3. การออกแบบและประกอบสร้าง.....	8
3.1 เงื่อนไขในการออกแบบสร้างและค่าที่กำหนด.....	8
3.2 การออกแบบโครงสร้าง.....	10
3.3 การออกแบบการคำนวณ.....	12
3.4 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสมัลส์ช่วงยาว.....	13
3.5 องค์ประกอบความต้านทานแม่เหล็ก.....	16
3.6 การออกแบบสร้างตัวเหนี่ยวนำ.....	19
3.7 ความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกแกนร่วม.....	22
4. การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในระบบการวัดและการทดสอบ.....	23
5. การจำลองวงจรทดสอบโดยใช้โปรแกรม PSPICE.....	26

บทที่	หน้า
6. การทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาว.....	34
6.1 การทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าช่วงยาว.....	34
6.2 การทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่น กระแสไฟฟ้าช่วงยาว.....	40
6.3 การทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่น กระแสไฟฟ้าช่วงยาว.....	44
6.4 การทดสอบสร้างกระแสไฟฟ้าช่วงยาวแบบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 2.5 kA.....	48
6.5 การทดสอบสร้างกระแสไฟฟ้าช่วงยาวแบบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA.....	52
6.6 การทดสอบสร้างกระแสไฟฟ้าช่วงยาวจริงสำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA.....	57
7. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	64
7.1 สรุปผลการทดสอบ.....	64
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	65
รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	67
ก. การจัดแบ่งกลุ่มของกับดักฟ้าผ่าและข้อกำหนดการทดสอบ.....	68
ข. โปรแกรม Tektronix OpenChoice Desktop.....	69
ค. การวัดกระแสไฟฟ้าด้วยชั้นความต้านทานต่ำ.....	70
ง. ความเร็วของคลื่นจรและเสิร์จอิมพีแดนซ์.....	73
จ. ช่องว่างทรงกลม.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	78

สารบัญญัตินำ

	หน้า
2.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่ยอมรับได้.....	7
3.1 ข้อกำหนดสำหรับการทดสอบความทนได้กระแสอิมพัลส์ซ้ำยาว.....	8
5.1 แสดงปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่า	
พิกัดกระแส 2.5 kA.....	27
5.2 แสดงปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่า	
พิกัดกระแส 5 kA.....	27
6.1 การปรับค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาของรูปคลื่น	
กระแสอิมพัลส์ช่วงยาว.....	35
6.2 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำในการทดสอบ.....	39
6.3 การปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว.....	40
6.4 การปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว.....	44
6.5 ผลการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า	
พิกัดกระแส 2.5 kA.....	48
6.6 ผลการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า	
พิกัดกระแส 5 kA.....	52
6.7 ผลการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจริง สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA.....	57
6.8 ลักษณะสมบัติของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่สร้างได้.....	63
ก.1 การจัดแบ่งกลุ่มของกับดักฟ้าผ่าและข้อกำหนดการทดสอบ.....	68

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบสายซึ่งในอากาศ.....	1
2.1 ปริมาณและช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ที่เกิดจากฟ้าผ่าซ้ำ.....	4
2.2 แผนภาพแสดงการแบ่งกลุ่มการทดสอบความทนได้ต่อกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว.....	5
2.3 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4.....	6
2.4 ลักษณะกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4.....	7
3.1 การติดตั้งตัวเก็บประจุอิมพัลส์.....	10
3.2 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์แบบตัวถังเหล็กขนาด 0.4 μ F พิกัดแรงดัน 50 kV.....	10
3.3 การเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุอิมพัลส์และตัวเหนี่ยวนำ.....	11
3.4 การติดตั้งตัวเก็บประจุอิมพัลส์และตัวเหนี่ยวนำลงบนฐานเหล็ก.....	11
3.5 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 2.5 kA จากการคำนวณ.....	14
3.6 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA จากการคำนวณ.....	15
3.7 การพันลวดความต้านทานที่ไม่คำนึงการลดค่าความเหนี่ยวนำ.....	16
3.8 รูปแบบของตัวเหนี่ยวนำ ที่ทำการออกแบบสร้าง.....	19
3.9 ตัวเหนี่ยวนำแบบชั้นเดียว.....	20
3.10 ตัวเหนี่ยวนำแบบหลายชั้น.....	21
3.11 ความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกแกนร่วม.....	22
4.1 แผนภาพระบบทดสอบความทนได้กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่ใช้คอมพิวเตอร์ ช่วยในการบันทึกผลการทดสอบ.....	23
4.2 การควบคุมการทดสอบ.....	24
4.3 การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการบันทึกผลระหว่างการทดสอบ.....	24
4.4 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทดสอบที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการบันทึกผล.....	25

รูปที่	หน้า
5.1 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ที่ใช้จำลองการทำงาน.....	26
5.2 ผลการจำลองวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 2.5 kA.....	28
5.3 ผลการจำลองวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA.....	29
5.4 รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ.....	30
5.5 อิทธิพลของตัวเหนี่ยวนำ L8 ที่มีต่อช่วงหน้าคลื่นของกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว.....	31
5.6 อิทธิพลของตัวเหนี่ยวนำ L1 ที่มีต่อช่วงหางคลื่นของกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว.....	32
5.7 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักเสิร์จขนาด 2.5 kA.....	33
5.8 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักเสิร์จขนาด 5 kA.....	33
6.1 วงจรการทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว.....	34
6.2 ผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาของรูปคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 1.....	35
6.3 ผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาของรูปคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 2.....	36
6.4 ผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาของรูปคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 3.....	36
6.5 ผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาของรูปคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 4.....	37
6.6 ผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาของรูปคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 5.....	37
6.7 เปรียบเทียบผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว.....	38

รูปที่	หน้า
6.8 วงจรการทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่น กระแสिमพัลส์ช่วงยาว.....	40
6.9 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่น กระแสिमพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 1.....	41
6.10 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่น กระแสिमพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 2.....	41
6.11 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่น กระแสिमพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 3.....	42
6.12 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่น กระแสिमพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 4.....	42
6.13 เปรียบเทียบผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุม ช่วงหน้าคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาว.....	43
6.14 วงจรการทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่น กระแสिमพัลส์ช่วงยาว.....	44
6.15 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่น กระแสिमพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 1.....	45
6.16 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่น กระแสिमพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 2.....	45
6.17 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่น กระแสिमพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 3.....	46
6.18 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่น กระแสिमพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 4.....	46
6.19 เปรียบเทียบผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุม ช่วงหลังคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาว.....	47
6.20 วงจรการทดสอบสร้างกระแสिमพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 2.5 kA.....	48

รูปที่	หน้า
6.21 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 2.5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 5 kV.....	49
6.22 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 2.5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 10 kV.....	49
6.23 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 2.5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 15 kV.....	50
6.24 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 2.5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 20 kV.....	50
6.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสिमพัลส์ช่วงยาว กับแรงดันอัดประจุ จากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA.....	51
6.26 วงจรการทดสอบสร้างกระแสिमพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA.....	52
6.27 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 15 kV.....	53
6.28 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 20 kV.....	53
6.29 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 25 kV.....	54
6.30 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 30 kV.....	54
6.31 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 35 kV.....	55
6.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสिमพัลส์ช่วงยาว กับแรงดันอัดประจุ จากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA.....	56

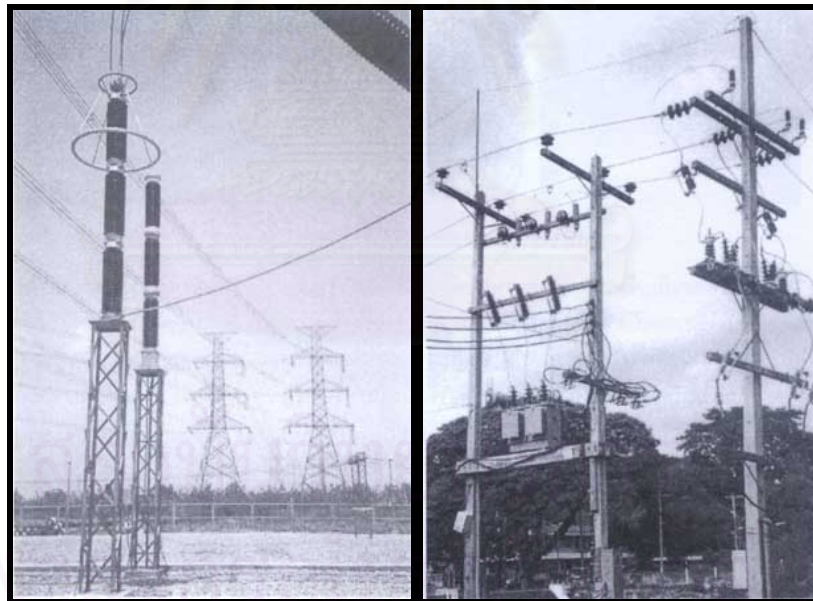
รูปที่	หน้า
6.33 วงจรการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจริง สำหรับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA.....	57
6.34 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง สำหรับกับดักฟ้าผ่า ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 20 kV.....	58
6.35 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง สำหรับกับดักฟ้าผ่า ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 25 kV.....	58
6.36 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง สำหรับกับดักฟ้าผ่า ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 30 kV.....	59
6.37 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง สำหรับกับดักฟ้าผ่า ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 35 kV.....	59
6.38 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง สำหรับกับดักฟ้าผ่า ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 40 kV.....	60
6.39 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง สำหรับกับดักฟ้าผ่า ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 45 kV.....	60
6.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว กับแรงดันอัดประจุ สำหรับการทดสอบจริง.....	61
6.41 เปรียบเทียบผลการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร กับการทดสอบจริง.....	62
7.1 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 2.5 kA.....	64
7.2 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 2.5 kA.....	64
ข.1 การถ่ายโอนข้อมูลระหว่างดิจิตอลออกสซิลโลสโคปกับคอมพิวเตอร์.....	69
ค.1 วงจรวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยเซ็นท์.....	70
ค.2 วงจรสมมูลของเซ็นท์.....	71
ง.1 วงจรสมมูลของสายส่งจ่าย.....	73
ง.2 ค่า L และ C กระจายตลอดสายส่ง.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

เนื่องจากการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะใช้สายส่งแบบซึ่งในอากาศดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งอาศัยอากาศเป็นฉนวนหลักเพื่อให้ประหยัดค่าใช้จ่าย อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่กลางแจ้งจึงมีโอกาสได้รับแรงดันเกินเสิร์จ และกระแสฟ้าผ่า จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ทั้งทางตรงและทางอ้อม ที่มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบส่งจ่าย ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (Lighting arrester) เพื่อทำหน้าที่กำจัดแรงดันเกินเสิร์จ และกระแสฟ้าผ่าให้ลงสู่ดินโดยเร็ว



รูปที่ 1.1 ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบสายซึ่งในอากาศ

เพื่อป้องกันความเสียหายกับตัวกับดักเสิร์จเอง และเพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่า กับดักเสิร์จที่ใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าสามารถทำงานป้องกันอุปกรณ์ได้ มาตรฐาน IEC 60099-4 [1] จึงกำหนดให้มีการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักเสิร์จ ซึ่งแบ่งได้เป็นการทดสอบรับรองแบบ (Design test or type test) การทดสอบประจำ (Routine test) และการทดสอบเพื่อการตรวจรับ (Acceptance test)

1.2 ที่มาของปัญหา

เครื่องกำเนิดกระแสลิมิตส์ช่วงยาว จัดเป็นอุปกรณ์ทดสอบที่สำคัญรายการหนึ่ง ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่า ในหัวข้อการทดสอบความทนได้ต่อกระแสลิมิตส์ช่วงยาว ซึ่งจัดเป็นการทดสอบย่อยรายการหนึ่งที่สำคัญมากของการทดสอบรับรองแบบ นอกจากนี้การใช้งานกับดักฟ้าผ่าที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน และการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดกระแสลิมิตส์ช่วงยาวภายในประเทศไทยยังไม่มี จึงเป็นเหตุจูงใจให้เกิดการพัฒนาออกแบบตัวเครื่องกำเนิดกระแสลิมิตส์ช่วงยาว เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพของกับดักฟ้าผ่าที่ผลิตภายในประเทศต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดกระแสลิมิตส์ช่วงยาว เพื่อใช้ในการทดสอบความทนได้กระแสลิมิตส์ช่วงยาว สำหรับกับดักฟ้าผ่าฟิวด์กระแส 5 kA และ 2.5 kA ตามมาตรฐาน IEC 60099-4

1.4 ขอบข่ายของงานวิจัย

ทำการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสลิมิตส์ช่วงยาว เพื่อใช้ในการทดสอบความทนได้กระแสลิมิตส์ช่วงยาว สำหรับกับดักฟ้าผ่าฟิวด์กระแส 5 kA และ 2.5 kA โดยเครื่องกำเนิดกระแสลิมิตส์ช่วงยาวที่สร้างขึ้น จะต้องจ่ายกระแสลิมิตส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ได้กำหนดไว้อย่างมีเสถียรภาพ สำหรับการวัดและการทดสอบ จะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการควบคุมการทำงานและจัดเก็บข้อมูล

1.5 ผลงานการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

จากผลงานการศึกษาของ M.Modrušan [2] เกี่ยวกับการออกแบบ และประกอบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว เพื่อใช้ในการทดสอบความทนได้กระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับกับดักฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ทำให้เรารู้ถึงหลักการทำงาน และองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในงานวิจัยนี้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การออกแบบและประกอบสร้าง เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ในการทดสอบความทนได้กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4 สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่กัดกระแส 5 kA และ 2.5 kA ได้ นอกจากนี้ ความรู้ที่ได้จากการวิจัย สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัย เกี่ยวกับการออกแบบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว และใช้ในการพัฒนากับดักฟ้าผ่าที่ผลิตในประเทศไทยต่อไป

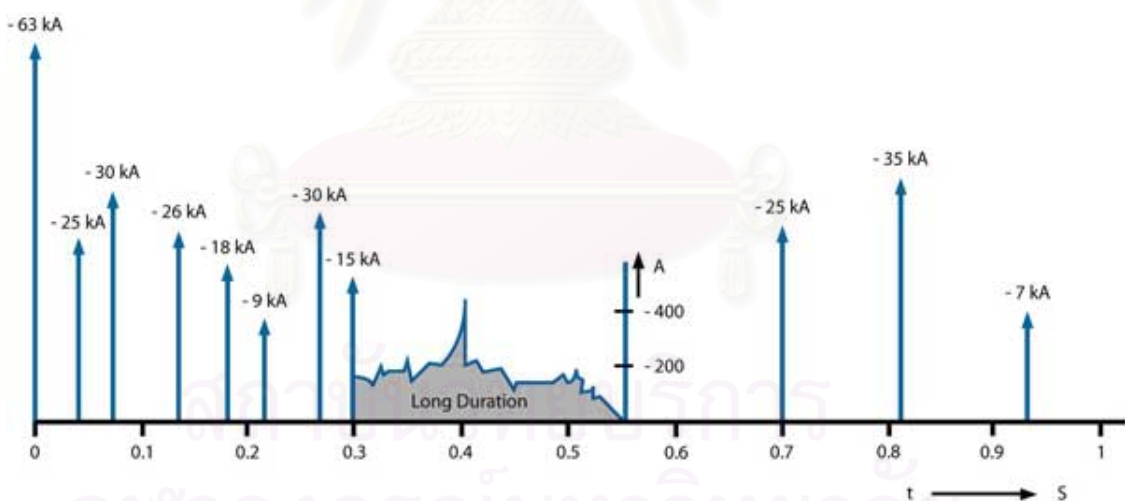
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการสร้างกระแสимพัลส์ช่วงยาว

2.1 สาเหตุการเกิดกระแสимพัลส์ช่วงยาว

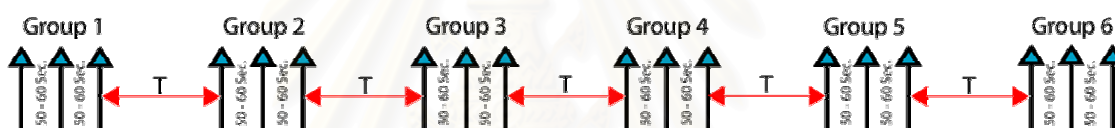
จากผลงานการวิจัยของ Berger [3] พบว่าความเครียดที่เกิดจากแรงดันเกินเสิร์จบนกับดักฟ้าผ่า เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกระแสимพัลส์ช่วงยาว นอกจากนี้ในงานการวิจัยยังแสดงให้เห็นถึงปริมาณและช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ที่เกิดจากฟ้าผ่าซ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จากรูปแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่าง กระแสимพัลส์ช่วงยาว กับกระแสимพัลส์รูปแบบอื่นเช่น กระแสимพัลส์สวิตชิง หรือ กระแสимพัลส์ฟ้าผ่า โดยจะเห็นได้ว่ากระแสимพัลส์ช่วงยาวจะให้ปริมาณพลังงานสูงกระแสимพัลส์รูปแบบอื่นมาก ความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถทำให้กับดักฟ้าผ่าเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการทดสอบความทนได้กระแสимพัลส์ช่วงยาวจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ก่อนการนำกับดักฟ้าผ่ามาใช้ในงานในระบบ



รูปที่ 2.1 ปริมาณและช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ที่เกิดจากฟ้าผ่าซ้ำ

2.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

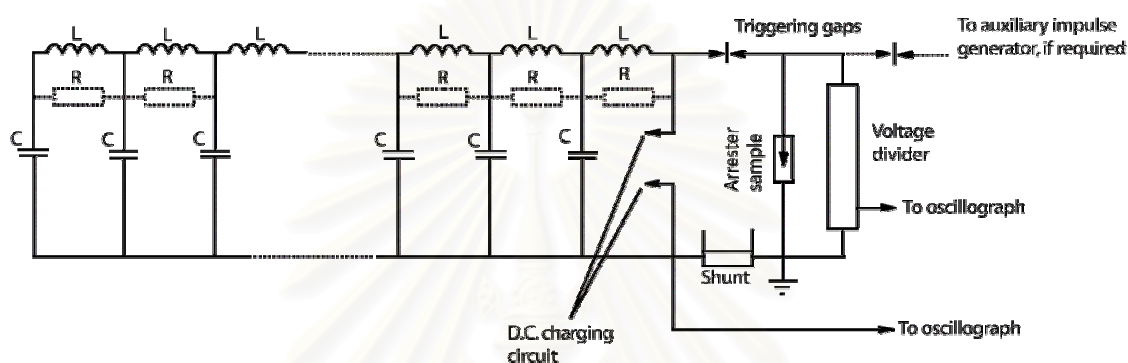
มาตรฐาน IEC 60099-4 ได้กำหนดเงื่อนไขเกี่ยวกับการทดสอบความทนได้ ต่อกระแสลัดวงจร ช่วงยาวไว้ว่าการทดสอบกระแสลัดวงจรช่วงยาวบนกับดักฟ้าผ่า วัสดุที่ใช้ในการทดสอบหรือกับดักฟ้าผ่าจะต้องมีพิกัดแรงดันไม่น้อยกว่า 3 kV นอกจากนี้ในการทดสอบ กับดักฟ้าผ่าต้องมีความสมบูรณ์ และก่อนที่จะทำการทดสอบกับดักฟ้าผ่า ต้องทำการวัดค่าแรงดันคงค้างที่สภาวะปกติก่อน เพื่อที่จะได้ใช้เป็นข้อมูลในการประเมินผลเปรียบเทียบต่อไป โดยการทดสอบ จะทำการจ่ายกระแสลัดวงจรฟ้าผ่าให้แก่วัสดุทดสอบ หรือกับดักฟ้าผ่าเป็นจำนวนทั้งสิ้น 18 ครั้ง โดยแบ่งเป็นหกกลุ่ม กลุ่มละสามครั้ง ระยะห่างของช่วงเวลาในการจ่ายกระแสลัดวงจรแต่ละครั้งห่างกัน 50 ถึง 60 วินาที และระยะห่างของช่วงเวลาระหว่างกลุ่มการทดสอบ จะพิจารณาจากอุณหภูมิของวัสดุทดสอบ (T) หากวัสดุทดสอบมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อมก็สามารถทำการทดสอบกลุ่มต่อไปได้ทันที ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการแบ่งกลุ่มการทดสอบความทนได้ต่อกระแสลัดวงจรช่วงยาว

หลังจากทำการทดสอบครบทั้งหกกลุ่ม เมื่ออุณหภูมิของวัสดุทดสอบเย็นตัวลง จนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม ขั้นตอนต่อไปคือการวัดค่าแรงดันคงค้าง ซึ่งค่าแรงดันคงค้างที่วัดนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ทำการวัดก่อนการทดสอบ ซึ่งจะต้องมีความแตกต่างกันไม่เกิน 5 % นอกจากนี้แล้ววัสดุทดสอบจะต้องไม่มีร่องรอยของการเกิด วาบไฟตามผิว เจาะทะลุ รอยแตกร้าวหรือ อากาศอย่างหนึ่งอย่างใดที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุทดสอบเกิดความเสียหาย

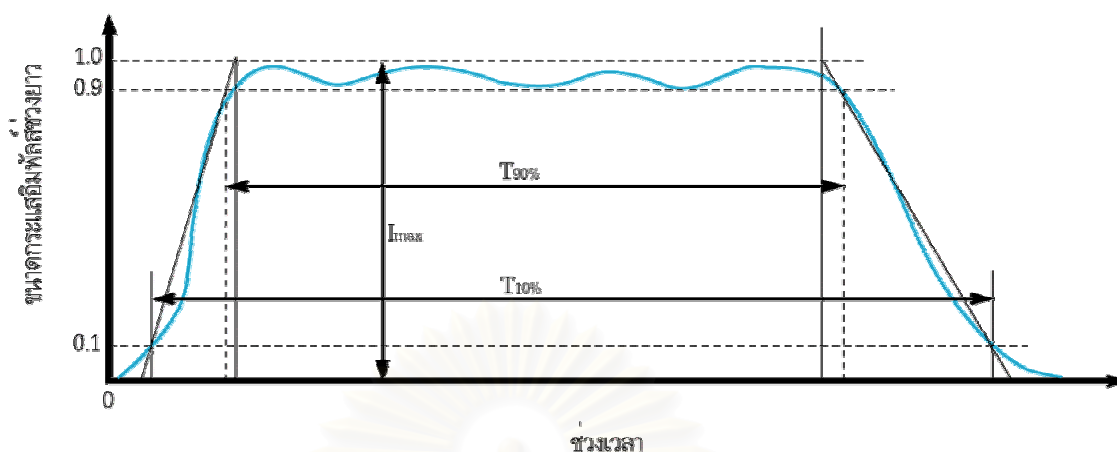
ในการออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว มาตรฐานได้แนะนำวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งปริมาณของค่าพารามิเตอร์ R, L และ C มีส่วนสำคัญทำให้ลักษณะรูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้แก่วัสดุทดสอบ เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ อย่างไรก็ตามในการออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ควรที่จะออกแบบให้มีจำนวนชั้นน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้าง



รูปที่ 2.3 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4

ลักษณะสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว คือลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ได้กำหนดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าขึ้น โดยพยายามเลียนแบบรูปคลื่นให้ใกล้เคียงมากที่สุดกับที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่า ลักษณะสมบัติของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่พิจารณาประกอบไปด้วย ช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$), ช่วงเวลา 10% ($T_{10\%}$) และขนาดค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว (I_{max})

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 ลักษณะกระแสลัดสวามยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4

สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA และ 5 kA มาตรฐานได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสลัดสวามยาวที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีข้อกำหนดตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสลัดสวามยาวที่ยอมรับได้

Arrester classification	Peak current	Impulse duration	
	I_{max} (A)	$T_{90\%}$ (ms)	$T_{10\%}$ (ms)
5000 A	75	$1 \leq T_{90\%} \leq 1.2$	$T_{10\%} \leq 1.5T_{90\%}$
2500 A	50	$0.5 \leq T_{90\%} \leq 0.6$	$T_{10\%} \leq 1.5T_{90\%}$

จากข้อกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสลัดสวามยาว ในตารางที่ 2.1 หมายความว่า ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ค่ายอดกระแสลัดสวามยาวต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 75 A และช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1 ms แต่ไม่เกิน 1.2 ms โดยช่วงเวลา 10% ($T_{10\%}$) จะต้องมีค่าไม่เกิน 1.5 เท่าหรือ 150% ของช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA ค่ายอดกระแสลัดสวามยาวต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 50 A และช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.5 ms แต่ไม่เกิน 0.6 ms โดยช่วงเวลา 10% ($T_{10\%}$) จะต้องมีค่าไม่เกิน 1.5 เท่าหรือ 150% ของช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$)

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

การออกแบบและพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในโครงการนี้ อาศัยรูปแบบผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศมาดัดแปลงให้จ่ายต่อการประกอบสร้างและใช้งาน สำหรับด้านคุณภาพและสมรรถนะ จะใช้เกณฑ์มาตรฐานเป็นเงื่อนไขในการออกแบบและประเมินผล

3.1 เงื่อนไขในการออกแบบสร้างและค่าที่กำหนด

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว เพื่อสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับใช้ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA และ 2.5 kA เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวนี้ จะใช้สร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามที่มาตรฐาน IEC 60099-4 กำหนด ซึ่งมีข้อกำหนดสำหรับการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดสำหรับการทดสอบความทนได้กระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

Arrester classification	Peak current I_{max} (A)	Impulse duration $T_{90\%}$ (ms)	Impulse duration $T_{10\%}$ (ms)
5000 A	75	1	$T_{10\%} \leq 1.5T_{90\%}$
2500 A	50	0.5	$T_{10\%} \leq 1.5T_{90\%}$

จากข้อกำหนดสำหรับการทดสอบความทนได้กระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ตามตารางที่ 3.1 หมายความว่า เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ต้องสามารถสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่มีช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) เท่ากับ 1 ms สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA โดยที่มีค่ายอดกระแสไม่น้อยกว่า 75 A และต้องสามารถสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ที่มีช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) เท่ากับ 0.5 ms สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA โดยมีค่ายอดกระแสไม่น้อยกว่า 50 A

การประกอบสร้างจะใช้ตัวเก็บประจุที่มีอยู่แล้วขนาด 0.4 μF พิกัดแรงดัน 50 kV จำนวน 8 ตัว เป็นตัวเก็บประจุอิมพัลส์เพื่อเก็บพลังงาน โดยพลังงานสูงสุดของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์หาได้จากสมการ

$$W = (C_s V^2) / 2 \quad (3.1)$$

เมื่อ W คือพลังงานสูงสุดของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์
 C_s คือค่าความจุรวมของวงจร
 V คือค่าแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุอิมพัลส์

การออกแบบสร้างองค์ประกอบความต้านทานแมทซิ่ง ที่มีความเหนียวนำ จะทำการออกแบบสร้าง ในรูปแบบความต้านทานชนิดพัน โดยใช้ลวดความต้านทาน NiCr พันบนกระบอกพีวีซี ซึ่งมีเงื่อนไขสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ การถ่ายเทความร้อน โดยพลังงานที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จากสมการ

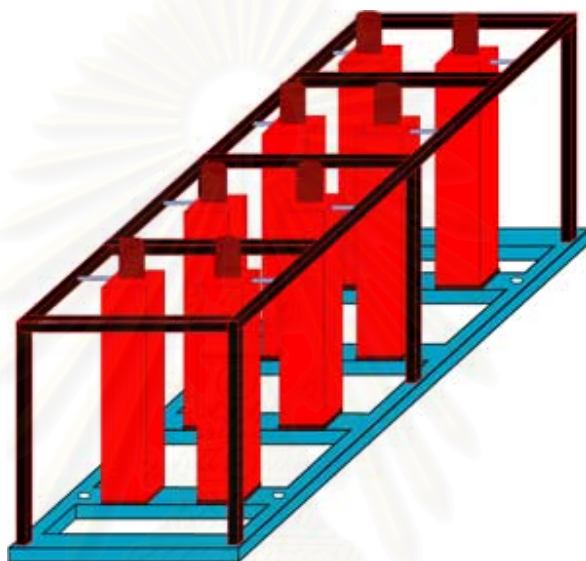
$$W = m * c * \Delta t \quad (3.2)$$

เมื่อ W คือพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น
 m คือมวลของวัสดุ
 c คือความจุความร้อนจำเพาะ
 Δt คืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

การออกแบบสร้างองค์ประกอบตัวเหนียวนำ ออกแบบสร้างโดยใช้ลวดทองแดงเคลือบฉนวน พันบนท่อพีวีซี ซึ่งมีเงื่อนไขสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ ระดับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนียวนำ และค่าความเหนียวนำรวมที่อาจเกิดขึ้นในการทดสอบ ดังนั้นตัวเหนียวนำที่ออกแบบสร้างขึ้นจะเป็นตัวเหนียวนำที่สามารถปรับค่าความเหนียวนำได้ เพื่อลดระดับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนียวนำ และใช้ปรับค่าความเหนียวนำเพื่อชดเชยค่าความเหนียวนำรวม

3.2) การออกแบบโครงสร้าง

การออกแบบโครงสร้างเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าพัลส์ช่วงยาวในงานวิทยานิพนธ์นี้ ต้องการให้เกิดความสะดวกในการเคลื่อนย้ายและจัดเก็บ โดยทำการติดตั้งตัวเก็บประจุพัลส์แบบตัวถังเหล็กไว้ภายในฐานเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.1



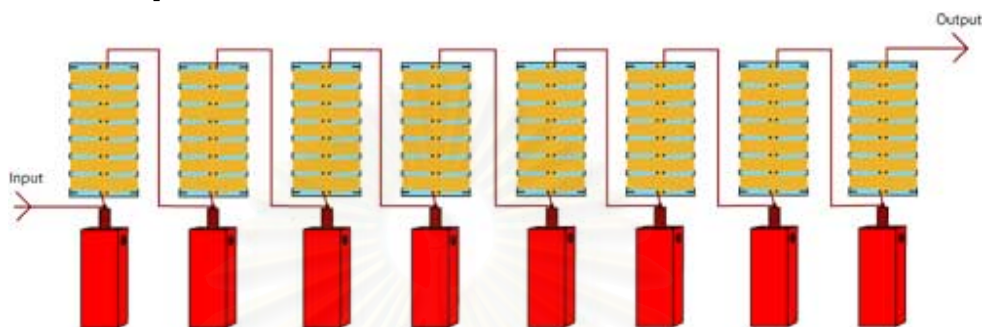
รูปที่ 3.1 การติดตั้งตัวเก็บประจุพัลส์

ตัวเก็บประจุพัลส์แบบตัวถังเหล็กที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้ตัวเก็บประจุพัลส์ที่มีอยู่แล้ว ขนาด $0.4 \mu\text{F}$ พิกัดแรงดัน 50 kV ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวเก็บประจุพัลส์แบบตัวถังเหล็กขนาด $0.4 \mu\text{F}$ พิกัดแรงดัน 50 kV

ในการเชื่อมต่อขั้วแรงสูงของตัวเก็บประจุอิมพัลส์กับตัวเหนี่ยวนำ จะทำการเชื่อมต่อด้วยตัวนำทองแดงหุ้มฉนวน และเพื่อให้เกิดความสะดวกในการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบความเหนี่ยวนำที่ใช้ปรับรูปคลื่น จะติดตั้งตัวเหนี่ยวนำไว้ด้านบนของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ ซึ่งมีรูปแบบการเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุอิมพัลส์และตัวเหนี่ยวนำ

การติดตั้งตัวเหนี่ยวนำบนตัวเก็บประจุอิมพัลส์ จะใช้ท่อฉนวนพีวีซีเป็นวัสดุรองรับ โดยท่อฉนวนพีวีซีที่ใช้ในการรองรับจะถูกยึดติดกับฐานเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การติดตั้งตัวเก็บประจุอิมพัลส์และตัวเหนี่ยวนำลงบนฐานเหล็ก

3.2) การออกแบบการฉนวน

ฉนวนจัดเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่ง ที่ต้องให้ความสนใจในการออกแบบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว การออกแบบฉนวนพิจารณาจากสถานที่ติดตั้งใช้งาน ในโครงการนี้เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่สร้างขึ้นจะถูกติดตั้งใช้งานอยู่ในสภาวะบรรยากาศภายในห้อง ที่มีอากาศเป็นฉนวนที่สำคัญ ส่วนฉนวนแข็งภายนอกเป็นเพียงตัวยึดหรือรับแรงกล เท่านั้น ดังนั้นมิติภายนอก ความสูง ความกว้าง ของการฉนวนจะกำหนดด้วยความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศซึ่งจะสัมพันธ์กับพื้นผิวฉนวนแข็ง ลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวฉนวนแข็งจะต้องมีผิวเรียบสม่ำเสมอ ไม่เก็บสะสมฝุ่น ละออง หรือสิ่งสกปรกได้ง่าย ไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้พอสมควร ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับ ฉนวนเหลวหรือก๊าซอื่น ๆ มีความแข็งแรงทางกลเพียงพอ สามารถกลึงประกอบเข้ารูป ตกแต่งได้ ฉนวนแข็งที่มีคุณสมบัติดังกล่าวและเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ในประเทศ ราคาประหยัด หาซื้อได้ง่าย ในปัจจุบันฉนวนที่เหมาะสมได้แก่ท่อฉนวนพีวีซี จากรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการฉนวนโดยใช้ท่อ PVC [4] พบว่าท่อพีวีซีไม่ดูดความชื้น มีอุณหภูมิใช้งานปกติ 60°C และมีความต้านทานจำเพาะสูงถึง 10^{13} - 10^{16} Ω -cm นอกจากนั้นพบว่าฉนวนพีวีซีมีความคงทนตามผิวฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ประมาณ 6.6 kV/cm

3.3) การคำนวณหาค่าองค์ประกอบของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

การคำนวณหาค่าองค์ประกอบสำหรับสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สามารถอาศัยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ [2]

$$T_{90\%} = 2 \frac{n-1}{n} \sqrt{LC} \quad (3.3)$$

$$R_m \equiv Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) สามารถหาค่าความจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์รวมดังต่อไปนี้

$$C = \frac{nT_{90\%}}{2R_m(n-1)} \quad (3.5)$$

เมื่อ	$T_{90\%}$	คือช่วงเวลา 90% ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์
	n	คือจำนวนชั้นของตัวเก็บประจุอิมพัลส์
	L	คือค่าความเหนี่ยวนำรวมทั้งหมดในวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว
	C	คือค่าความจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์รวมทั้งหมดในวงจร
	Z	อิมพีแดนซ์คลื่นจรของวงจร
	R_m	ความต้านทานแมทซิ่ง

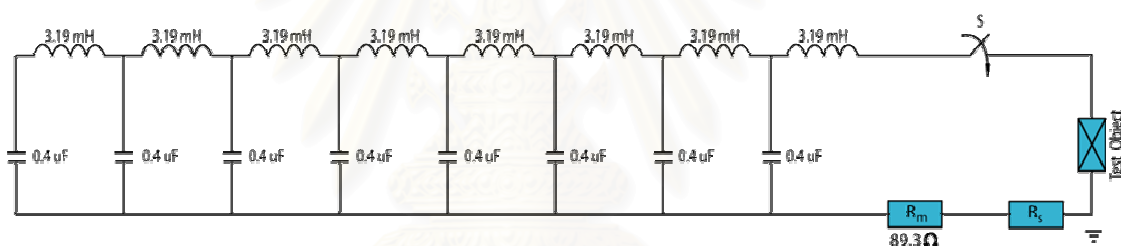
ในงานวิจัยนี้ ใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่มีอยู่แล้วขนาด 0.4 μF จำนวน 8 ตัว และต้องการรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ ที่มีช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) เท่ากับ 1 ms สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA และ ต้องการรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ ที่มีช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) เท่ากับ 0.5 ms สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA ดังนั้นจากสมการ (3.3) และ (3.4) สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำรวมสำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว และค่าความต้านทานแมทซิ่งได้

ค่าความเหนี่ยวนำรวมสำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว และค่าความต้านทานแมทซิ่ง ที่ใช้ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA สามารถหาได้โดยแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (3.3) – (3.5) จะได้

$$L = \frac{1}{C} \left[\frac{n * T_{90\%}}{2(n-1)} \right]^2 = 25.5 \text{ mH}$$

$$Z = R_m = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{25.5 * 10^{-3}}{3.2 * 10^{-6}}} = 89.3 \text{ } \Omega$$

ผลที่ได้จากการคำนวณหาค่าองค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA แสดงไว้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA จากการคำนวณ

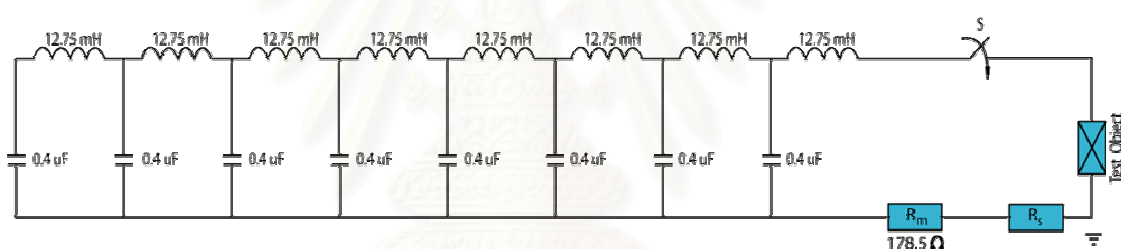
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความเหนี่ยวนำรวมสำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว และค่าความต้านทานแม่เหล็ก ที่ใช้ในการทดสอบดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA สามารถหาได้โดยแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (3.3) – (3.5) จะได้

$$L = \frac{1}{C} \left[\frac{n * T_{90\%}}{2(n-1)} \right]^2 = 102 \text{ mH}$$

$$Z = R_m = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{102 * 10^{-3}}{3.2 * 10^{-6}}} = 178.5 \text{ } \Omega$$

ผลที่ได้จากการคำนวณหาค่าองค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA แสดงไว้ดังรูปที่ 3.6

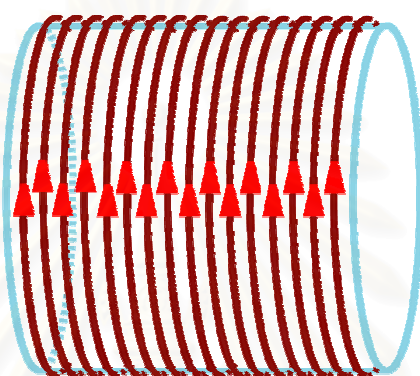


รูปที่ 3.6 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA จากการคำนวณ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4) องค์ประกอบความต้านทานแมทซิ่ง

ในการออกแบบขององค์ประกอบความต้านทานแมทซิ่ง จะสร้างโดยใช้ลวดความต้านทาน พันแบบมีความเหนียวนำบนกระบอกพีวีซีดังรูปที่ 3.7 [5] เพราะในทางอุตสาหกรรมจะใช้ลวดชนิดนี้พันเป็นขดลวดความร้อนในเครื่องทำความร้อน เนื่องจากมีคุณสมบัติทนความร้อนได้ดี



รูปที่ 3.7 การพันลวดความต้านทานที่ไม่คำนึงการลดค่าความเหนียวนำ

การคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะคิดจากพลังงานที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว แต่ละครั้ง โดยยอมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ไม่เกิน 60°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่กระบอกพีวีซียังสามารถทนได้โดยปลอดภัย สำหรับการคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในการวิจัยนี้ แบ่งออกได้เป็นสองกรณี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีนี้หนึ่งพิจารณาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าฟัดกระแส 2.5 kA ซึ่งจากมาตรฐาน IEC 60099-4 ได้กำหนดให้ทำการจ่ายกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่มีค่ายอดไม่น้อยกว่า 50 A เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 0.5 ms ผ่านวัสดุทดสอบหรือกับดักฟ้าผ่า ดังนั้นความต้านทานแมทซึ่งขนาด 89.3 Ω จะต้องได้รับกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 0.5 ms เช่นเดียวกันพลังงานที่เกิดขึ้นต่อการทดสอบหนึ่งครั้ง สามารถหาได้จากสมการ

$$W = I^2 R * \Delta T \quad (3.6)$$

$$W = (50)^2 * 89.3 * 0.5 * 10^{-3} = 0.11 \text{ kJ}$$

ความต้านทานแมทซึ่งที่ใช้ในวงจรการทดสอบกับดักฟ้าผ่าฟัดกระแส 2.5 kA คือ 89.3 Ω ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ลวดความต้านทาน NiCr ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 mm พื้นที่หน้าตัด 0.95 mm² ความต้านทานของลวดความต้านทานเท่ากับ 1.15 Ω/m และมีมวล 7.874 g/m ดังนั้นที่ 89.3 Ω จะต้องใช้ลวดความต้านทานยาว 77.7 m ซึ่งมีมวลรวมทั้งหมดเท่ากับ 0.61 kg จากสมการที่ (3.2) สามารถหาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อการทดสอบหนึ่งครั้งได้ดังนี้

$$\Delta t = \frac{W}{c * m} = \frac{0.11 \text{ kJ}}{0.46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} * 0.61 \text{ kg}} = 0.39^\circ\text{C}$$

ผลจากการคำนวณได้อุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อเกิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวไหลผ่านความต้านทานแมทซึ่งขนาด 89.3 Ω เท่ากับ 0.39 $^\circ\text{C}$ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีที่สองพิจารณาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าฟัดกระแส 5 kA ซึ่งจากมาตรฐาน IEC 60099-4 ได้กำหนดให้ทำการจ่ายกระแสลิมิตส์ช่วงยาวที่มีค่ายอดไม่น้อยกว่า 75 A เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ms ผ่านวัสดุทดสอบหรือกับดักฟ้าผ่า ดังนั้นความต้านทานแมทซ์ซึ่งขนาด 178.5 Ω จะต้องได้รับกระแสลิมิตส์ช่วงยาวเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ms เช่นเดียวกันพลังงานที่เกิดขึ้นต่อการทดสอบหนึ่งครั้ง จากสมการที่ (3.6) สามารถหาพลังงานที่เกิดขึ้นต่อการทดสอบหนึ่งครั้งได้ดังนี้

$$W = I^2 R * \Delta T$$

$$W = (75)^2 * 178.5 * 1 * 10^{-3} = 1 \text{ kJ}$$

ความต้านทานแมทซ์ที่ใช้ในวงจรการทดสอบกับดักฟ้าผ่าฟัดกระแส 5 kA คือ 178.5 Ω ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ลวดความต้านทาน NiCr ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 mm พื้นที่หน้าตัด 0.95 mm² ความต้านทานของลวดความต้านทานเท่ากับ 1.15 Ω/m และมีมวล 7.874 g/m ดังนั้นที่ 178.5 Ω จะต้องใช้ลวดความต้านทานยาว 155.2 m ซึ่งมีมวลรวมทั้งหมดเท่ากับ 1.2 kg จากสมการที่ (3.2) สามารถหาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อการทดสอบหนึ่งครั้งได้ดังนี้

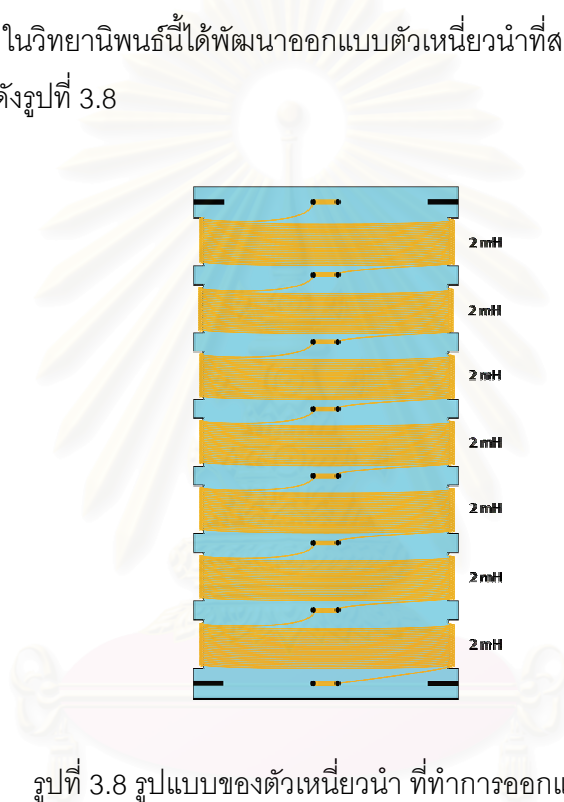
$$\Delta t = \frac{W}{c * m} = \frac{1 \text{ kJ}}{0.46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} * 1.2 \text{ kg}} = 1.8^\circ\text{C}$$

ผลจากการคำนวณได้อุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อเกิดกระแสลิมิตส์ช่วงยาวไหลผ่านความต้านทานแมทซ์ขนาด 178.5 Ω เท่ากับ 1.8 $^\circ\text{C}$ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5) การออกแบบสร้างตัวเหนี่ยวนำ

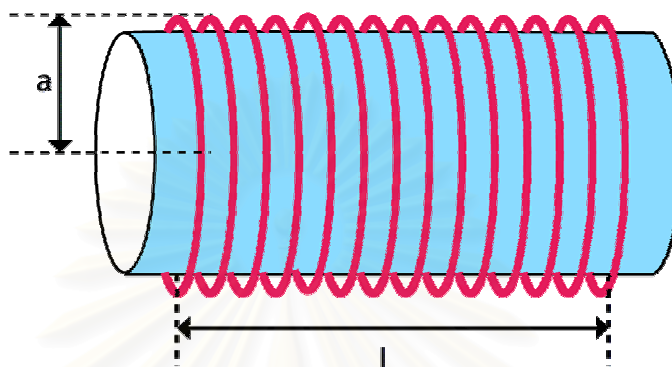
สำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าสลับช่วงยาว องค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งคือตัวเหนี่ยวนำ ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบสร้างประกอบด้วย แกนขดลวด และ ขดลวดทองแดงเคลือบฉนวน ตัวเหนี่ยวนำที่จะนำมาใช้งาน ต้องสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างรวดเร็ว ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำแกนขดลวดต้องไม่อิ่มตัว ในการออกแบบจะใช้ท่อพีวีซี ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กและหาได้ง่ายในท้องตลาด ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าของความเหนี่ยวนำได้ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รูปแบบของตัวเหนี่ยวนำ ที่ทำการออกแบบสร้าง

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามต้องการ จะอาศัยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำดังนี้ [6]

สำหรับตัวเหนี่ยวนำแบบชั้นเดียวดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวเหนี่ยวนำแบบชั้นเดียว

สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำจากสมการ

$$L(\mu H) = \frac{(aN)^2}{22.9l + 25.4a} \quad (3.6)$$

เมื่อ L = ความเหนี่ยวนำของขดลวด มีหน่วยเป็นไมโครเฮนรี่

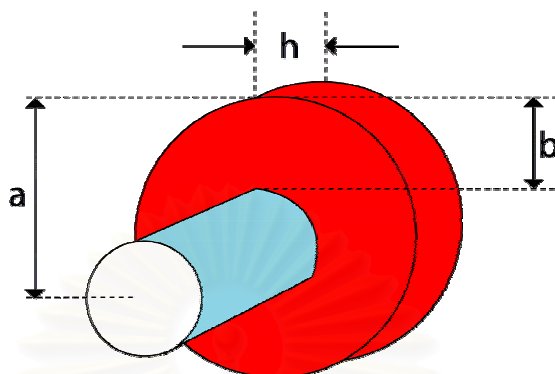
a = รัศมีของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

l = ความยาวของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

N = จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวด

สำนักงานวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับตัวเหนี่ยวนำแบบหลายชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตัวเหนี่ยวนำแบบหลายชั้น

สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำจากสมการ

$$L(\mu H) = \frac{0.31(aN)^2}{6a + 9h + 10b} \quad (3.7)$$

เมื่อ L = ความเหนี่ยวนำของขดลวด มีหน่วยเป็นไมโครเฮนรี่

a = รัศมีเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

N = จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวด

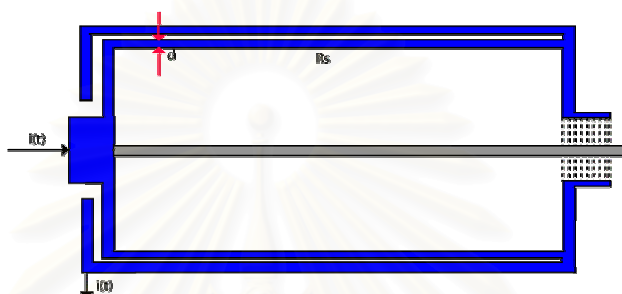
b = ความหนาของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

h = ความยาวของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.7) ความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกแกนร่วม

ความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกแกนร่วม ทำมาจากโลหะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันสองชั้น วางซ้อนกันดังรูปที่ 3.11 ทำให้ไม่มีความเหนี่ยวนำที่เกิดจากวงรอบเนื่องจากการหักล้างกันของสนามแม่เหล็ก [7]



รูปที่ 3.11 ความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกแกนร่วม

การหาผลตอบสนองเพื่อหาเวลาตอบสนองเป็นไปในลักษณะเดียวกับการหาเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานล้วน [8] ดังสมการ

$$T = \frac{\mu\sigma d^2}{6} \quad (3.8)$$

เมื่อ μ_0 คือ เปรอริมิบิลิตี = $4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}$ เพราะใช้โลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก

σ = สภาพความนำของความต้านทาน $\frac{m}{\Omega mm^2}$

d = ความหนาของชั้นที่

ทำนองเดียวกับแบนด์วิดท์ของชั้นที่คำนวณได้จากสมการ

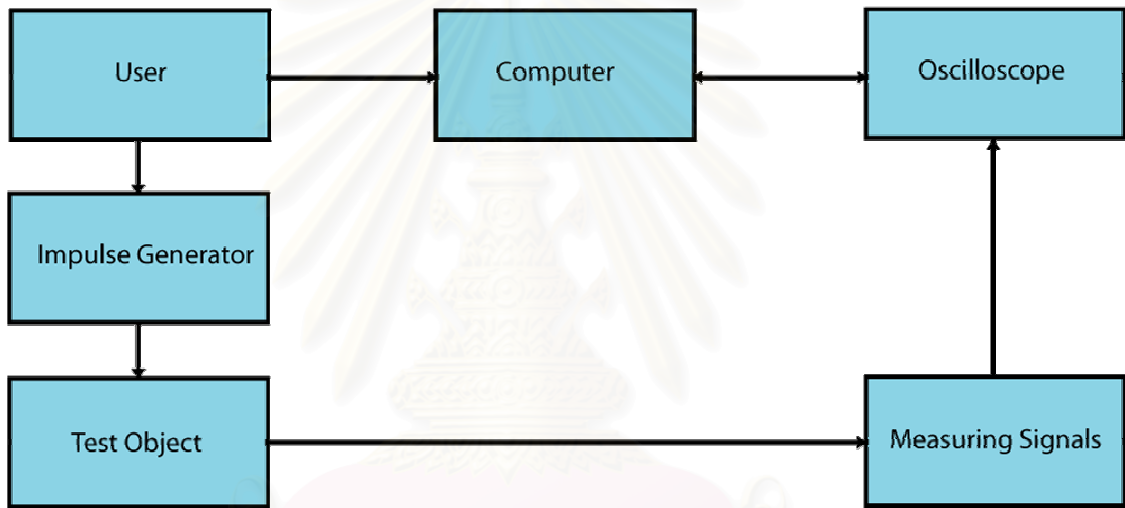
$$f_B = \frac{1.46}{\mu\sigma d^2} \quad (3.9)$$

จะเห็นได้ว่าถ้าทำให้ชั้นที่มีความหนา d บาง ๆ จะทำให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้น และเวลาขึ้น (rise time) T_r จะน้อยลง ผลของกระแสเชิงผิวจะน้อยลง การระบายความร้อนดีขึ้น

บทที่ 4

การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในระบบการวัดและการทดสอบ

การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในระบบการวัดและการทดสอบ จะทำให้มีระบบการวัดและการทดสอบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งด้านความเร็วและความถูกต้อง ซึ่งแผนภาพโดยรวมของระบบวัด และระบบทดสอบความทนได้กระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการบันทึกผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพระบบทดสอบความทนได้กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการบันทึกผลการทดสอบ

รูปที่ 4.2 แสดงการควบคุมการทดสอบ เริ่มต้นจากการปรับระดับแรงดัน โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้ จนได้ระดับแรงดันที่ต้องการสำหรับการทดสอบ กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจะถูกจ่ายให้แก่วัสดุทดสอบ ผ่านเก็บทรงกลมที่ได้ทำการตั้งระยะไว้ รูปคลื่นสัญญาณกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่ได้จากการวัดโดยใช้ออสซิลโลสโคป จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เพื่อทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

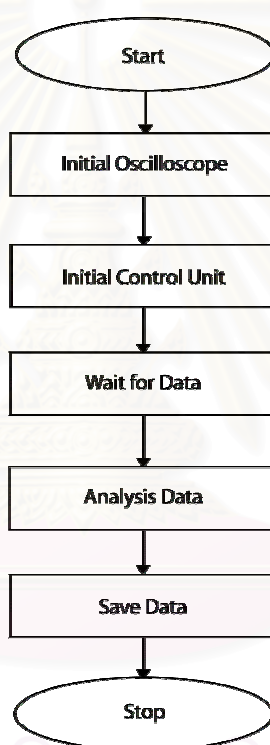


รูปที่ 4.2 การควบคุมการทดสอบ



รูปที่ 4.3 การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการบันทึกผลระหว่างการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบความทนได้กระแสิมพัลส์ช่วงยาว ที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการบันทึกผล การทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยเริ่มต้นจากการตั้งค่าดิจิตอลออสซิลโลสโคป ให้พร้อมสำหรับการรับ ข้อมูล ต่อจากนั้นทำการปรับระดับแรงดัน โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้จนได้ระดับแรงดันที่ ต้องการสำหรับการทดสอบ เมื่อกระแสิมพัลส์ช่วงยาวถูกจ่ายให้แก่วัสดุทดสอบ ข้อมูลรูป คลื่นสัญญาณกระแสิมพัลส์ช่วงยาว จะถูกส่งไปแสดงที่หน้าจอออสซิลโลสโคป ข้อมูลนี้จะถูกนำเข้ามา แสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์เพื่อทำการตรวจสอบ และทำการบันทึกลงในฐานข้อมูลที่ได้เตรียมไว้ ต่อไป

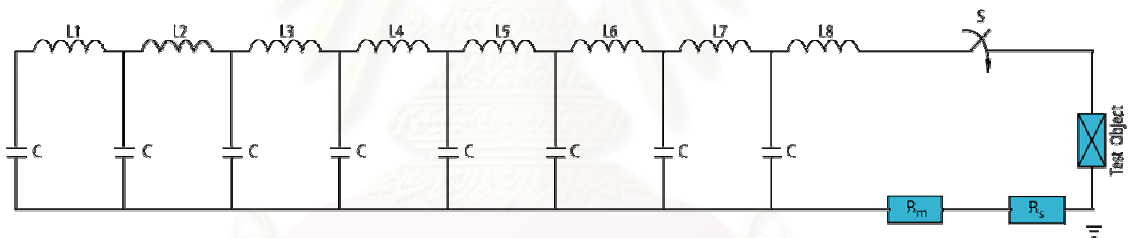


รูปที่ 4.4 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทดสอบที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการบันทึกผล

บทที่ 5

การจำลองวงจรทดสอบโดยใช้โปรแกรม PSPICE

ในปัจจุบันนี้การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ นิยมนำโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์หาคำตอบการทำงาน เพื่อทำการออกแบบวงจรให้ได้ตามต้องการ เพราะโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน มีประสิทธิภาพที่ดีและมีความผิดพลาดในการทำงานต่ำ อีกทั้งยังสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการคำนวณและออกแบบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า โปรแกรม PSPICE ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการทำงาน (Simulation) มาทำการวิเคราะห์หาคำตอบของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว แสดงดังรูปที่ 5.1 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA และ 2.5 kA



รูปที่ 5.1 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ที่ใช้จำลองการทำงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการคำนวณหาค่าองค์ประกอบวงจรในหัวข้อ 3.4 นำปริมาณขององค์ประกอบเหล่านั้นมาแทนในรูปที่ 5.1 จะได้ปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA และ 5 kA ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

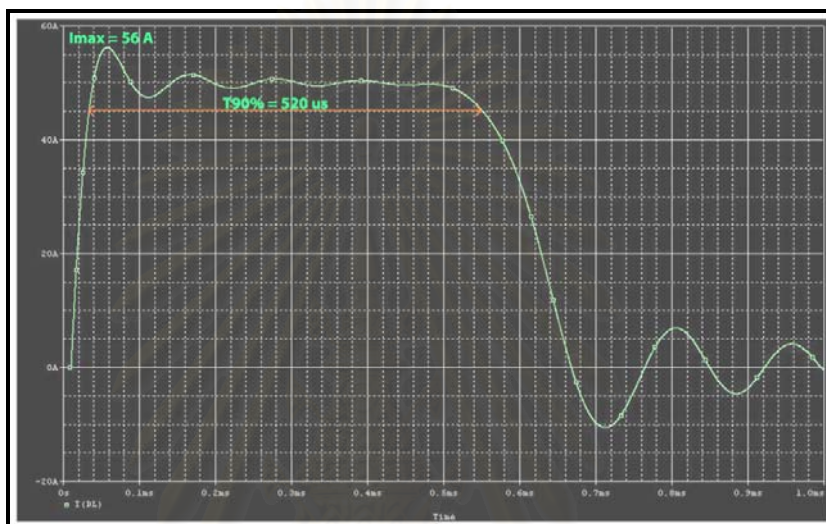
ตารางที่ 5.1 ปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA

L1 (mH)	L2 (mH)	L3 (mH)	L4 (mH)	L5 (mH)	L6 (mH)	L7 (mH)	L8 (mH)	C (uF)	Rm+Rs (Ω)
3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	0.4	89.3

ตารางที่ 5.2 ปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

L1 (mH)	L2 (mH)	L3 (mH)	L4 (mH)	L5 (mH)	L6 (mH)	L7 (mH)	L8 (mH)	C (uF)	Rm+Rs (Ω)
12.75	12.75	12.75	12.75	12.75	12.75	12.75	12.75	0.4	178.5

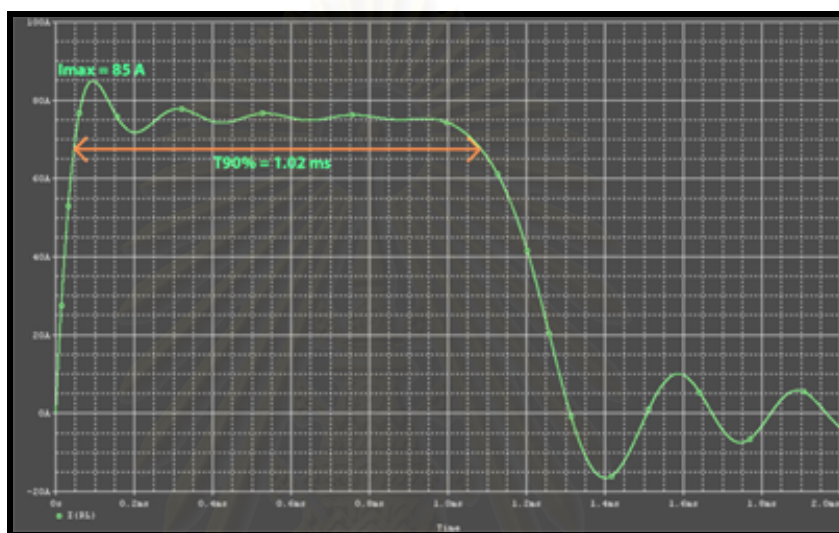
สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าฟัดกระแส 2.5 kA นำปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ในตารางที่ 5.1 แทนลงในวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวรูปที่ 5.1 แล้วใช้โปรแกรม PSPICE ทำการวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุต ในแบบทรานเซียน คือดูรูปสัญญาณเอาต์พุตในฐานของเวลา เช่นเดียวกับออสซิลโลสโคป ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ผลการจำลองวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวสำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าฟัดกระแส 2.5 kA

จากผลการจำลองวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าฟัดกระแส 2.5 kA ดังแสดงในรูปที่ 5.2 พบว่าช่วงเวลา 90% มีค่าเท่ากับ 520 μ s ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานยอมรับได้ อย่างไรก็ตามการวัดแกว่งของรูปคลื่นที่ค่ายอด มีค่าเกิน 10% ซึ่งเกินกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าฟัดกระแส 5 kA นำปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ในตารางที่ 5.2 แทนลงในวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวรูปที่ 5.1 แล้วใช้โปรแกรม PSPICE ทำการวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุต ในแบบทรานเซียนชัน คือดูรูปสัญญาณเอาต์พุตในฐานะของเวลา เช่นเดียวกับออสซิลโลสโคปได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.3

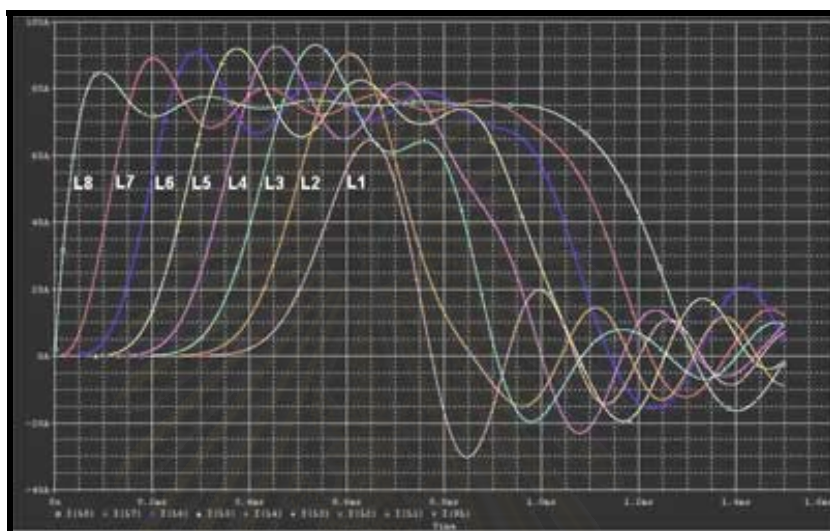


รูปที่ 5.3 ผลการจำลองวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวสำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าฟัดกระแส 5 kA

จากผลการจำลองวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าฟัดกระแส 5 kA ดังแสดงในรูปที่ 5.3 พบว่าช่วงเวลา 90% มีค่าเท่ากับ 1.02 ms ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานยอมรับได้ อย่างไรก็ตามการวัดแกว่งของรูปคลื่นที่ค่ายอด มีค่าเกิน 10% ซึ่งเกินกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากปัญหาที่พบเกี่ยวกับการกวัดแกว่งของรูปคลื่นที่ค่ายอด มีค่าเกิน 10% ซึ่งเกินกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด เมื่อใช้โปรแกรม PSPICE วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.4

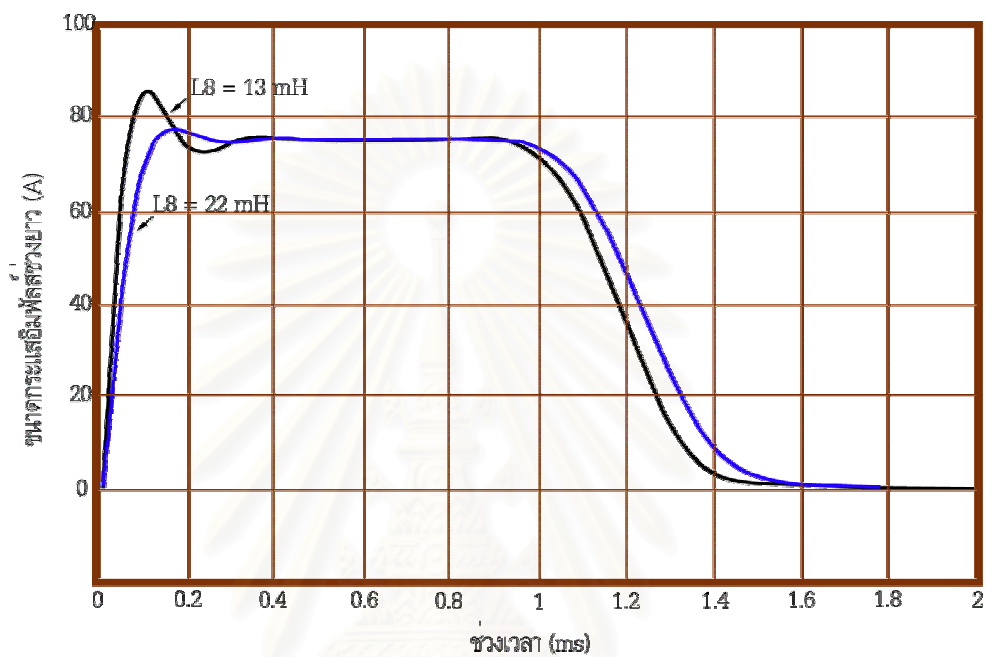


รูปที่ 5.4 รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ L8 มีผลทำให้ช่วงหน้าคลื่นสัญญาณกระแสมีพัลส์เปลี่ยนแปลง เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L8 เป็นกระแสที่เกิดขึ้นในช่วงหน้าคลื่น และการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ L1 มีผลทำให้ช่วงหลังคลื่นกระแสมีพัลส์ช่วงยาวเปลี่ยนแปลง เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L1 เป็นกระแสที่เกิดขึ้นในช่วงหลังคลื่น

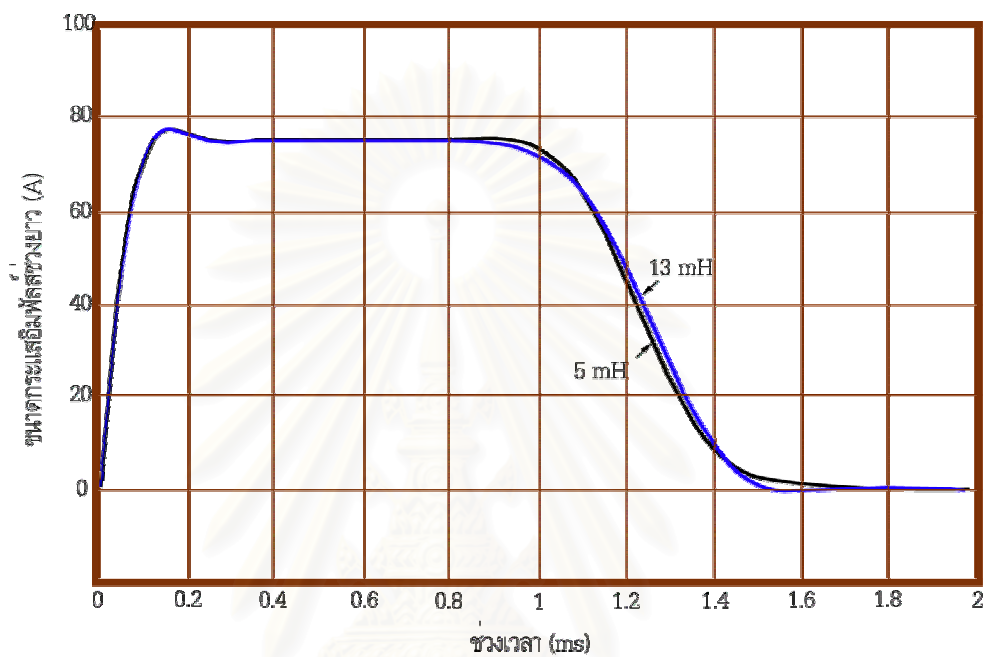
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อใช้โปรแกรม PSPICE วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ โดยทำการจำลองการทดสอบพบว่าสามารถลดค่ากระแสพ่วงพรวดช่วงหน้าคลื่นของกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวได้ โดยทำการเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ L8 ให้มีค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.5



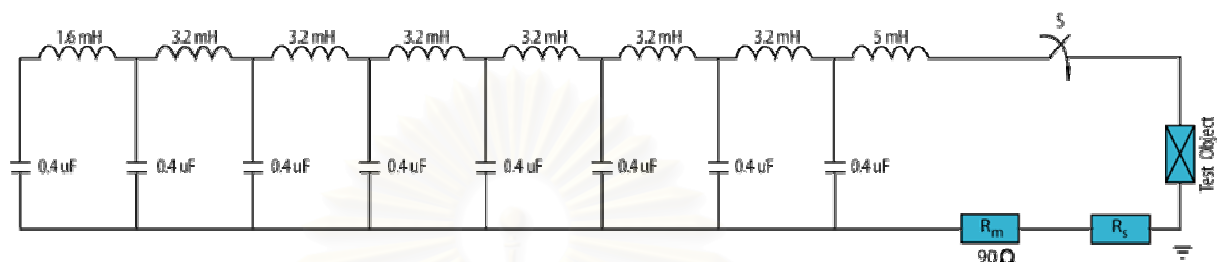
รูปที่ 5.5 อิทธิพลของตัวเหนี่ยวนำ L8 ที่มีต่อช่วงหน้าคลื่นของกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

และเมื่อใช้โปรแกรม PSPICE วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ โดยทำการจำลองการทดสอบพบว่า สามารถควบคุมช่วงหางคลื่นของกระแสพัลส์ช่วงยาวได้ โดยทำการเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ L1 ให้มีค่าลดลง ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.6

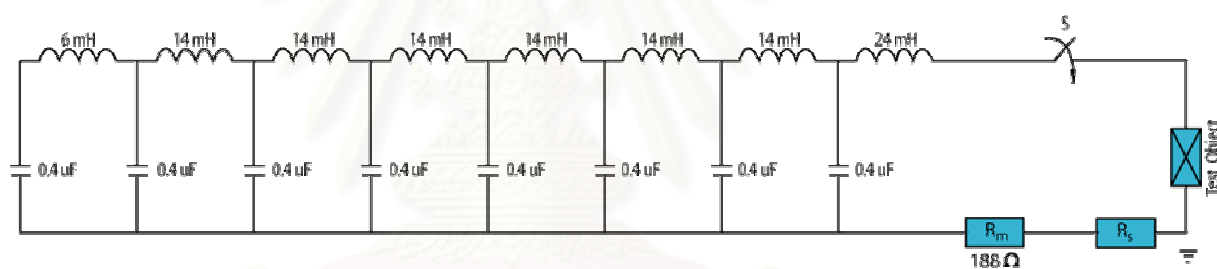


รูปที่ 5.6 อิทธิพลของตัวเหนี่ยวนำ L1 ที่มีต่อช่วงหางคลื่นของกระแสพัลส์ช่วงยาว

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม PSPICE วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ โดยทำการจำลอง การทดสอบสามารถหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA และ 5 kA แสดงดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ



รูปที่ 5.7 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบ กับดักเสิร์จขนาด 2.5 kA



รูปที่ 5.8 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบ กับดักเสิร์จขนาด 5 kA

การใช้งานโปรแกรม PSPICE มาทำการจำลองการทำงานของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวทำให้สะดวกและได้ผลลัพธ์ที่รวดเร็ว และยังสะดวกต่อการเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร

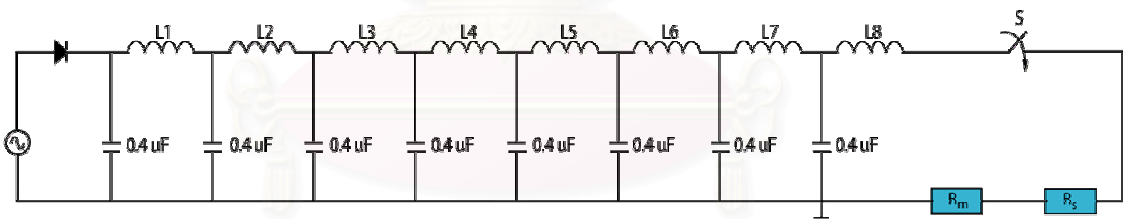
บทที่ 6

การทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

การทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว เพื่อดูถึงรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่สร้างได้มีพารามิเตอร์ที่ต้องคำนึงถึงตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ประกอบด้วย ช่วงเวลา 90%, ช่วงเวลา 10% และ ค่ายอดกระแส นอกจากนี้เสถียรภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ก็เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องพิจารณาถึงด้วย โดยหัวข้อการทดสอบจะเป็นไปตามลำดับดังนี้

6.1) การทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

การทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ ของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในหัวข้อนี้ เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว กับค่าความเหนี่ยวนำของวงจร สำหรับวงจรการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 วงจรการทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

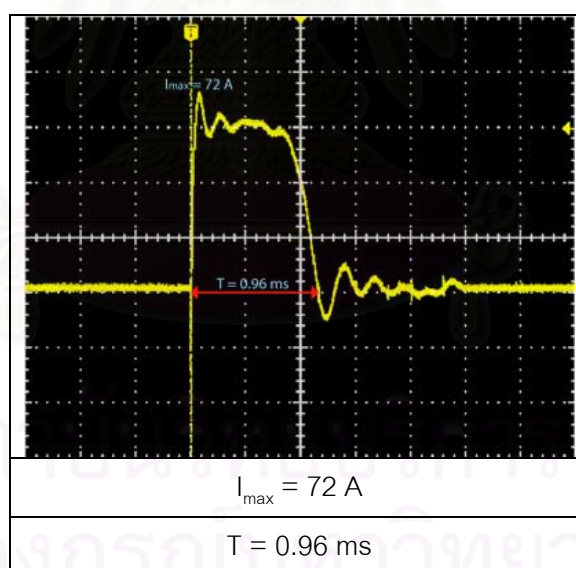
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการทดสอบจะทำการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำของวงจร ตามตารางที่ 6.1

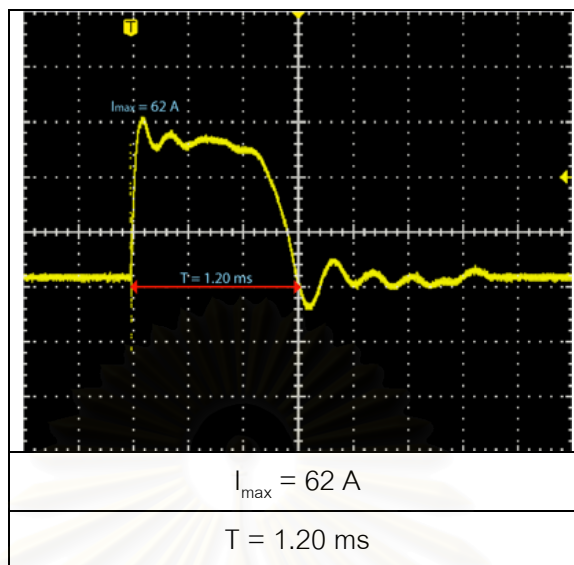
ตารางที่ 6.1 การปรับค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ ช่วงยาว

ครั้งที่	ความเหนี่ยวนำ (mH)								ความต้านทาน แมทซ์
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	
1	5.25	4.97	4.93	5.37	5.25	4.98	4.98	4.31	120 Ω
2	7.87	7.27	7.28	6.80	7.86	7.34	7.34	6.66	150 Ω
3	10.50	9.56	9.64	10.66	10.20	9.70	9.69	9.29	176 Ω
4	13.12	11.91	12.00	14.60	12.50	12.01	12.04	13.11	176 Ω
5	18.37	16.50	16.71	17.54	17.08	16.67	16.60	16.02	210 Ω

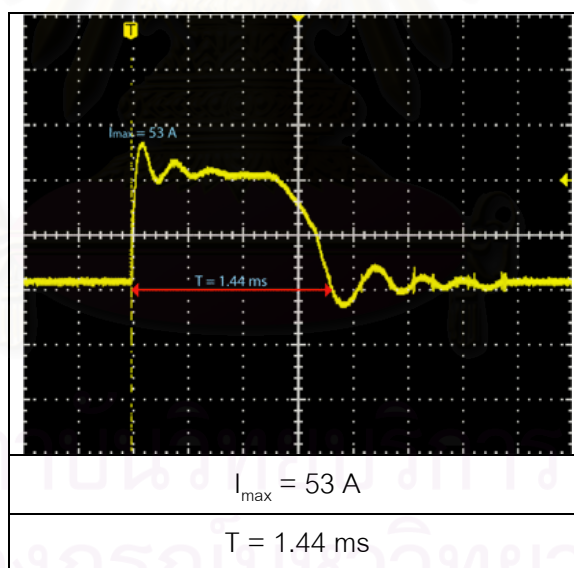
ผลที่ได้จากการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำตามตารางที่ 6.1 แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



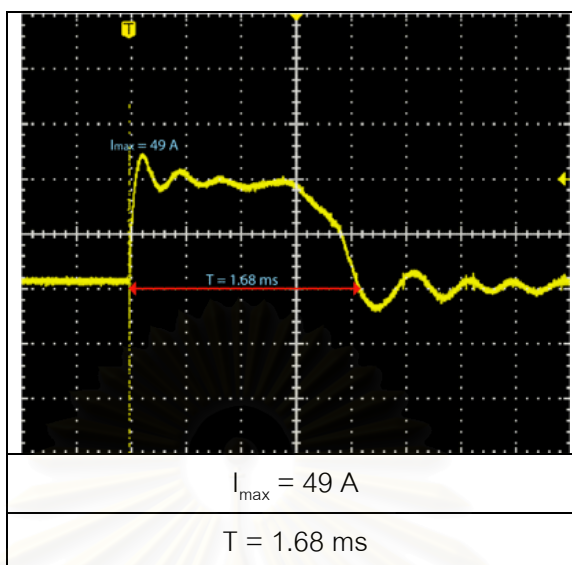
รูปที่ 6.2 ผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา
ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 1



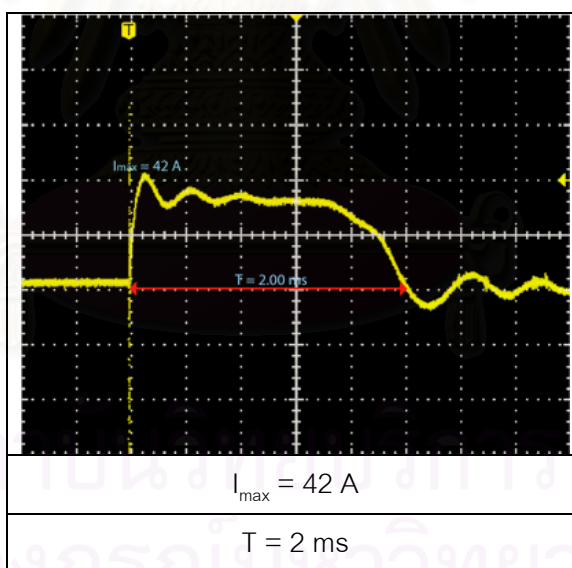
รูปที่ 6.3 ผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา
ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 2



รูปที่ 6.4 ผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา
ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 3

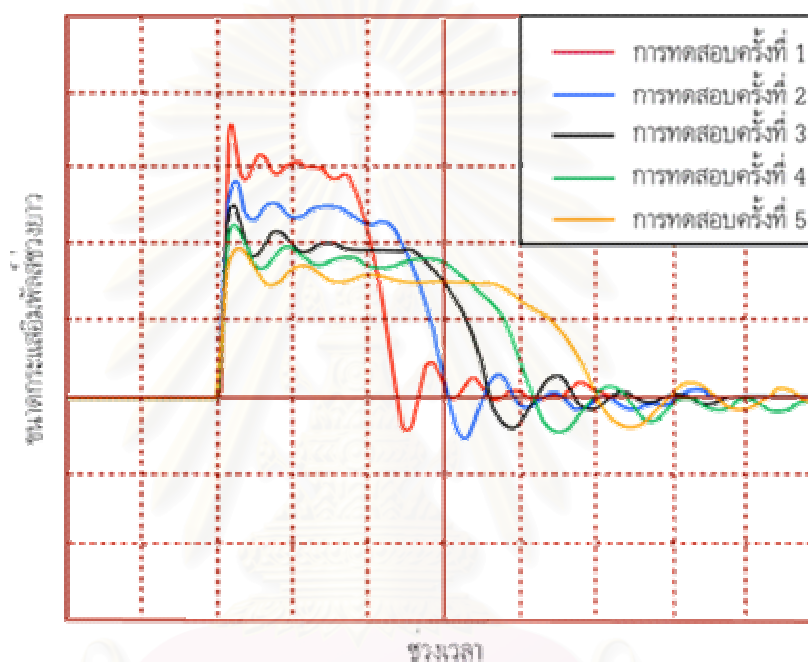


รูปที่ 6.5 ผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา
ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 4



รูปที่ 6.6 ผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา
ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 5

จากผลการทดสอบพบว่า หลังจากทำการเพิ่มค่าความเหนียวทำให้แกว่งจรเครื่องกำเนิด กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจะทำให้ช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่า ยอดกระแสอิมพัลส์มีค่าลดลง เนื่องมาจากผลของค่าความต้านทานภายในตัวเหนียวที่มีค่าสูงขึ้น หลังจากทำการเพิ่มค่าความเหนียว เมื่อนำผลการทดสอบทั้งห้าครั้งมาเปรียบเทียบกันแสดงได้ดัง รูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 เปรียบเทียบผลการปรับเปลี่ยนค่าความเหนียว เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา
ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม PSPICE พบว่ารูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวที่สร้างขึ้น จะมีค่าช่วงเวลาของรูปคลื่นคลาดเคลื่อนไป เนื่องจากผลของค่าความเหนี่ยวนำรวม ทำให้ค่าช่วงเวลาของรูปคลื่นที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการจำลอง จากการทดสอบพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำในวงจรทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำในการทดสอบ

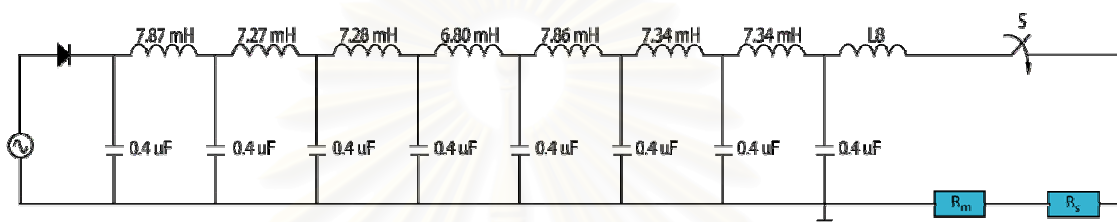
การทดสอบ ครั้งที่	ช่วงเวลารูปคลื่น (us)		ค่าความแตกต่าง (%)
	จากการทดสอบ	จากการจำลอง	
1	0.96	0.83	13.50
2	1.20	1.00	17.00
3	1.44	1.16	19.00
4	1.68	1.30	22.60
5	2.00	1.50	25.00

นอกจากนี้ผลของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสิมพัลส์ที่ได้จากการจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากวงจรที่ใช้ในการจำลองไม่ได้พิจารณา ถึงผลของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2) การทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

การทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในหัวข้อนี้ เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม PSPICE ในบทที่ 5 สำหรับวงจรการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.8



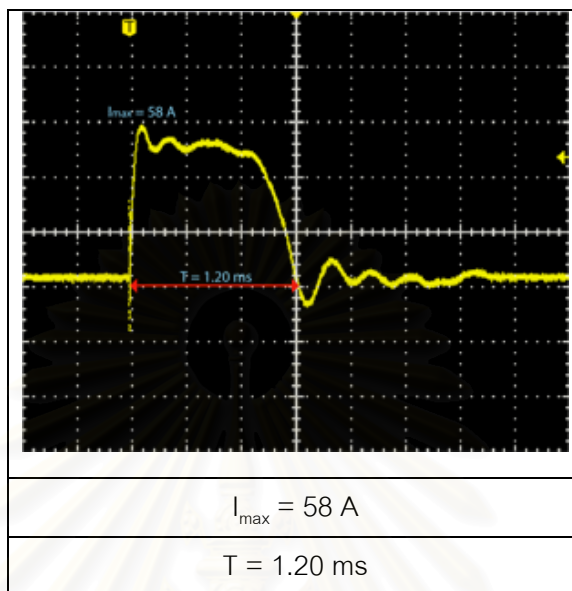
รูปที่ 6.8 วงจรการทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

ในการทดสอบนี้ จะทำการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 ของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ตามตารางที่ 6.3

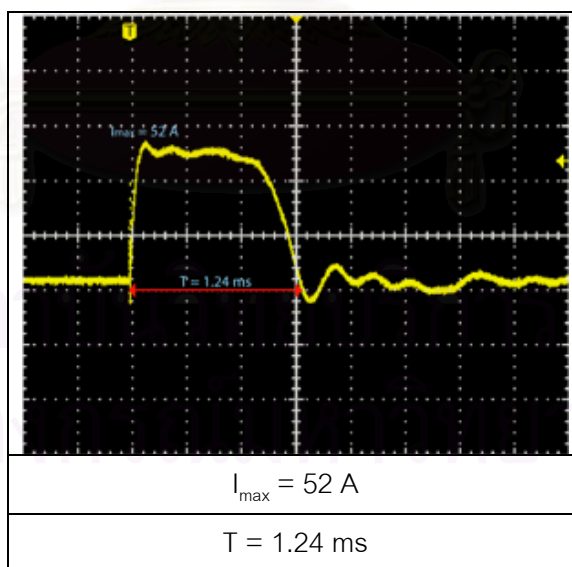
ตารางที่ 6.3 การปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

ครั้งที่	ความเหนี่ยวนำ (mH)								ความต้านทาน แมทซิ่ง
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	
1	7.87	7.27	7.28	6.80	7.86	7.34	7.34	9.29	150 Ω
2	7.87	7.27	7.28	6.80	7.86	7.34	7.34	13.11	150 Ω
3	7.87	7.27	7.28	6.80	7.86	7.34	7.34	14.54	150 Ω
4	7.87	7.27	7.28	6.80	7.86	7.34	7.34	16.02	150 Ω

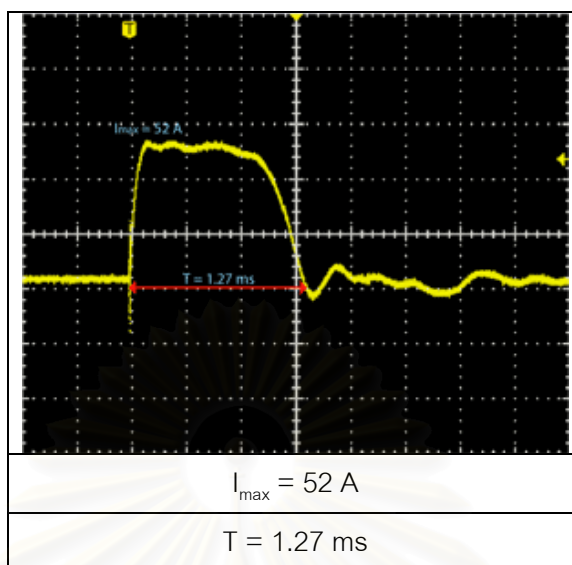
ผลที่ได้จากการปรับค่าความเหนี่ยวนำตามตารางที่ 6.3 แสดงดังรูปต่อไปนี้



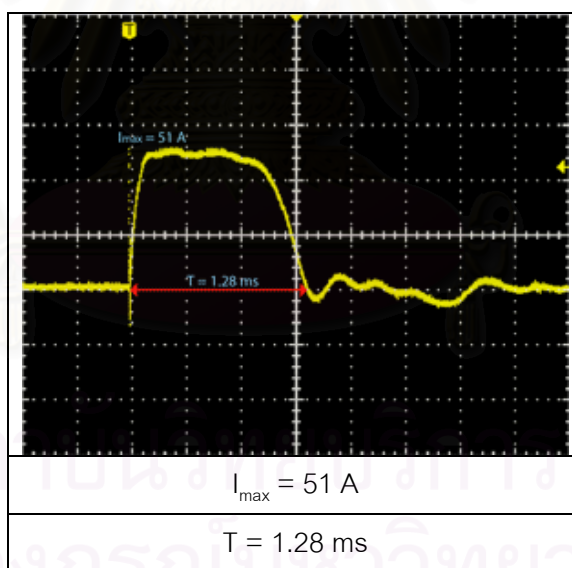
รูปที่ 6.9 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 1



รูปที่ 6.10 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 2

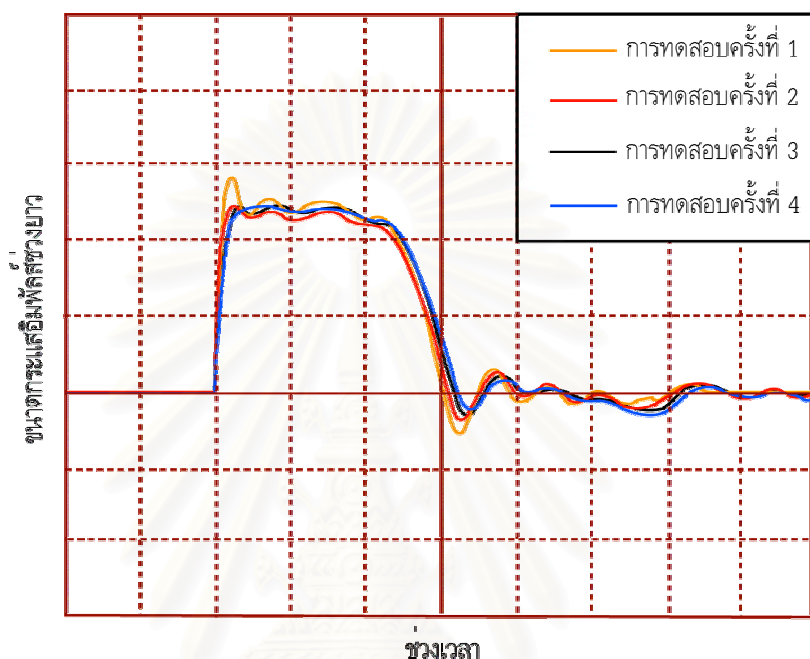


รูปที่ 6.11 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 3



รูปที่ 6.12 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L8 เพื่อควบคุมช่วงหน้าคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 4

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าความเหนียวนำ L8 ให้แก่วงจรเครื่องกำเนิด กระแสอิมพัลส์ช่วงยาว จะทำกระแสฟุ้งพรวดในช่วงเวลาหน้าคลื่นมีค่าลดลง และเมื่อนำผลการทดสอบทั้งสี่ครั้งมาเปรียบเทียบกัน จะแสดงได้ดังรูปที่ 6.13

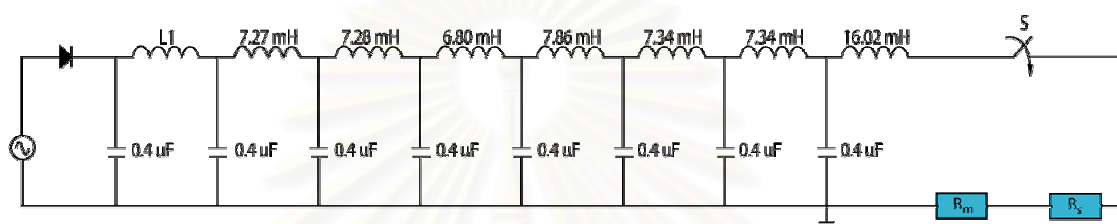


รูปที่ 6.13 เปรียบเทียบผลการทดสอบการปรับค่าความเหนียวนำ L8 เพื่อควบคุม ช่วงหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม PSPICE พบว่าผลการเปลี่ยนแปลงของช่วงหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว หลังจากทำการปรับค่าความเหนียวนำ L8 มีผลสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามผลของค่าความต้านทานภายในตัวเหนียวนำ ทำให้ค่ากระแสอิมพัลส์ที่ได้จากการจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากวงจรที่ใช้ในการจำลอง ไม่ได้พิจารณา ถึงผลของค่าความต้านทานภายในตัวเหนียวนำนั่นเอง

6.3) การทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่นกระแสिमพัลส์ ช่วงยาว

การทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวในหัวข้อนี้ เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม PSPICE ในบทที่ 5 สำหรับวงจรการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.14



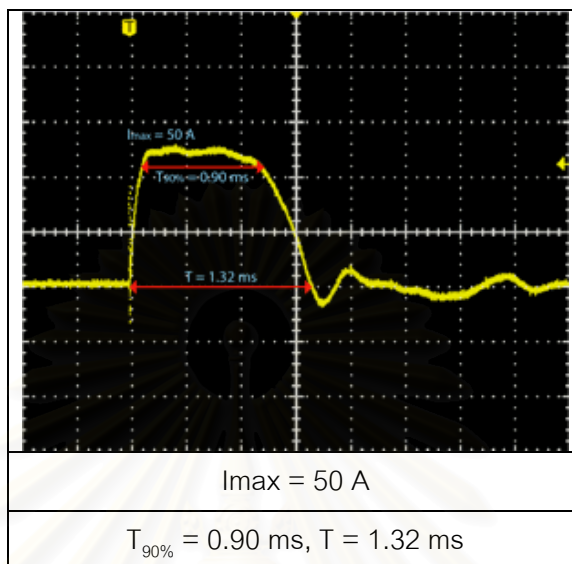
รูปที่ 6.14 วงจรการทดสอบปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาว

ในการทดสอบนี้ จะทำการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 ของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์ช่วงยาว ตามตารางที่ 6.4

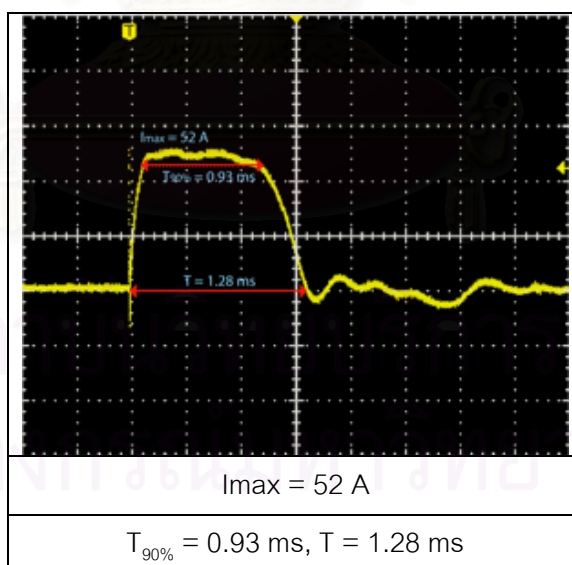
ตารางที่ 6.4 การปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาว

ครั้งที่	ความเหนี่ยวนำ (mH)								ความต้านทาน แมทซิ่ง
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	
1	10.50	7.27	7.28	6.80	7.86	7.34	7.34	16.02	150 Ω
2	7.87	7.27	7.28	6.80	7.86	7.34	7.34	16.02	150 Ω
3	5.25	7.27	7.28	6.80	7.86	7.34	7.34	16.02	150 Ω
4	2.62	7.27	7.28	6.80	7.86	7.34	7.34	16.02	150 Ω

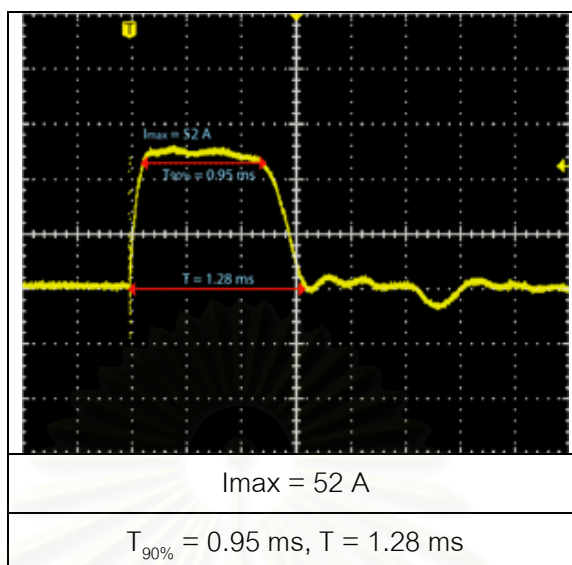
ผลที่ได้จากการปรับค่าความเหนี่ยวนำตามตารางที่ 6.4 แสดงดังรูปต่อไปนี้



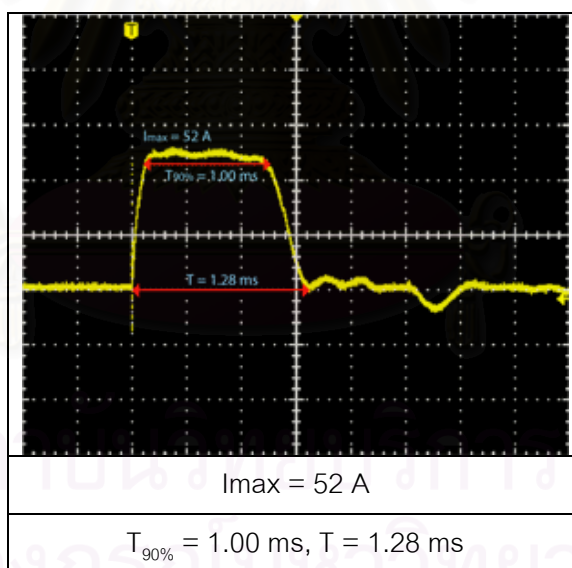
รูปที่ 6.15 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 1



รูปที่ 6.16 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 2

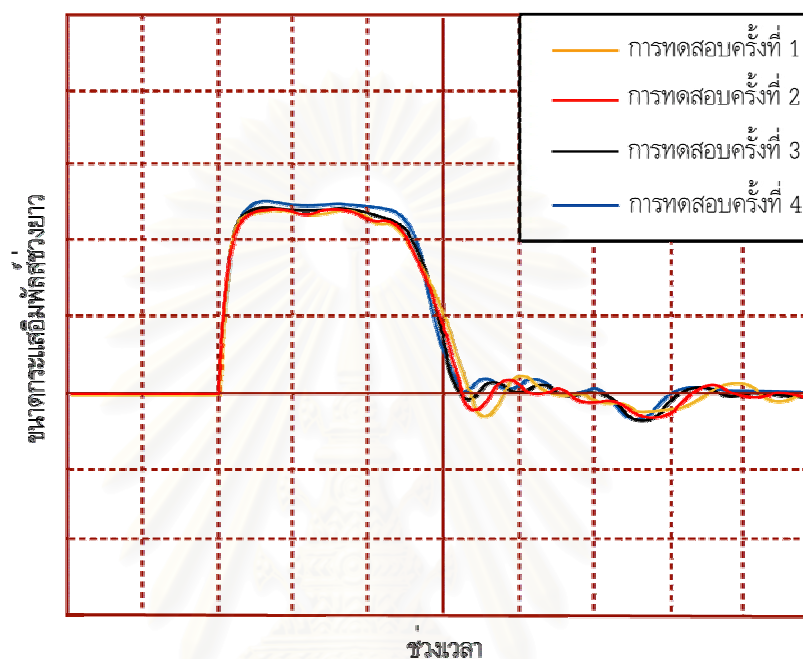


รูปที่ 6.17 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 3



รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุมช่วงหลังคลื่น กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวครั้งที่ 4

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อทำการลดค่าความเหนี่ยวนำ L1 ให้แก่วงจรเครื่องกำเนิดกระแส อิมพัลส์ช่วงยาวจะทำให้กระแสในช่วงหางคลื่นยกสูงขึ้น ส่งผลให้ช่วงเวลา $T_{90\%}$ มีค่ามากขึ้น เมื่อนำผลการทดสอบทั้งสี่ครั้งมาเปรียบเทียบกัน จะแสดงได้ดังรูปที่ 6.19

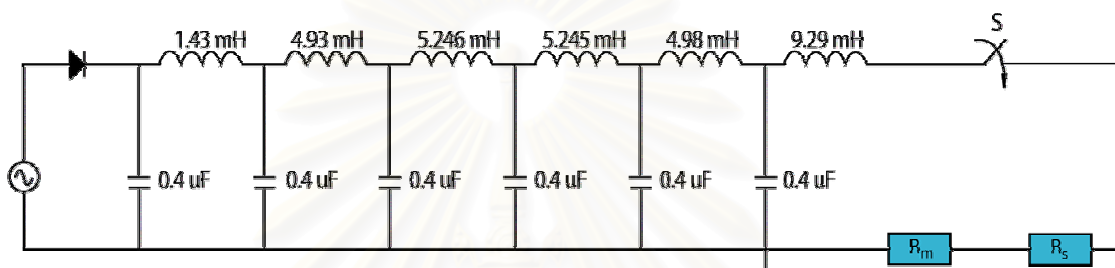


รูปที่ 6.19 เปรียบเทียบผลการทดสอบการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 เพื่อควบคุม ช่วงหลังคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม PSPICE พบว่าผลการเปลี่ยนแปลงของช่วงหลังคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว หลังจากทำการปรับค่าความเหนี่ยวนำ L1 มีผลสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามผลของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสอิมพัลส์ที่ได้จากการจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากวงจรที่ใช้ในการจำลอง ไม่ได้พิจารณา ถึงผลของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง

6.4) การทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA

การทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจรสำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA ของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในงานวิจัยนี้ เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุกับค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่เกิดขึ้น สำหรับวงจรการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.20



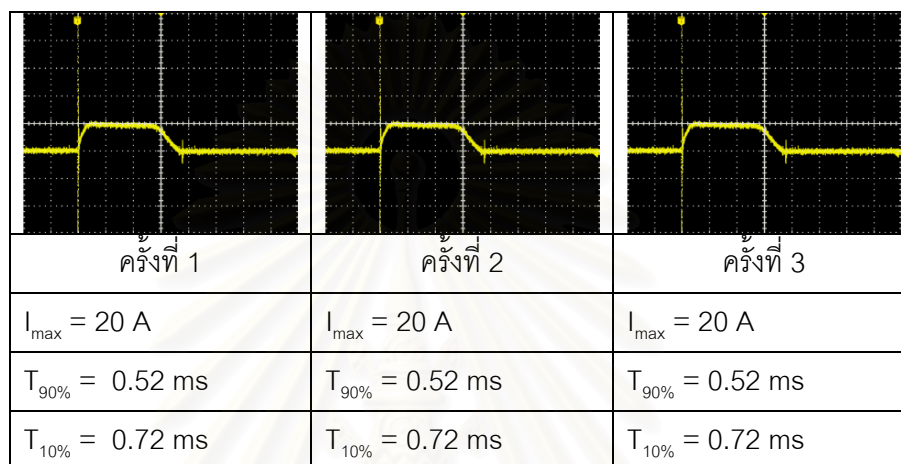
รูปที่ 6.20 วงจรการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA

ในการทดสอบจะควบคุมค่าช่วงเวลา $T_{90\%}$ และค่าช่วงเวลา $T_{10\%}$ ให้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานยอมรับ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6.5

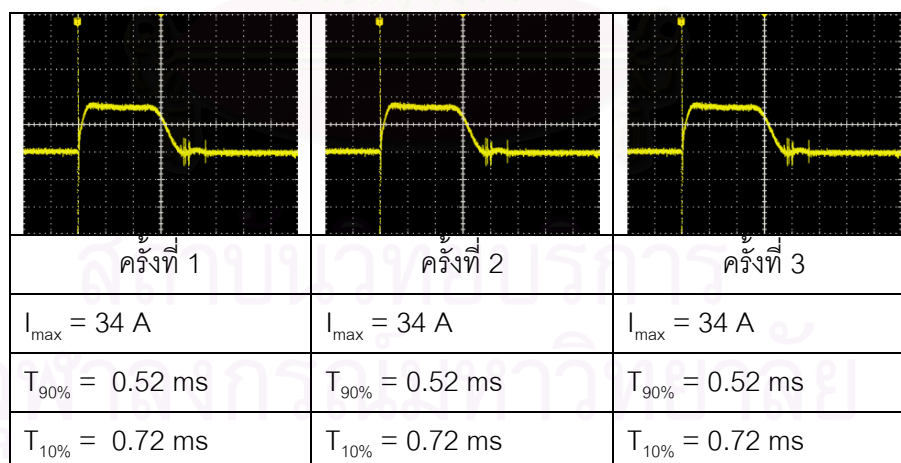
ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA

แรงดันอัดประจุ (kV)	ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว (A)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
5	20	20	20	20
10	34	34	34	34
15	55	55	55	55
20	72	72	72	72

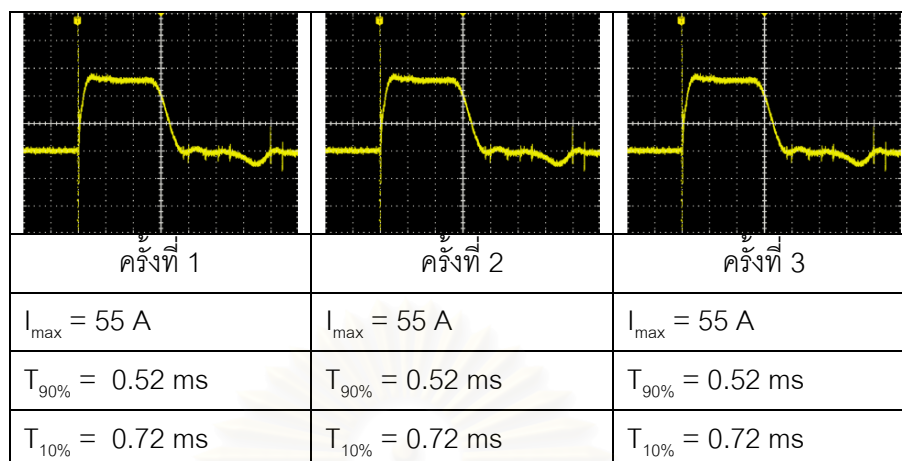
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุ กับค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.5 เป็นผลที่ได้จากการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร ซึ่งผลที่ได้จะถูกบันทึกลงบนคอมพิวเตอร์ผ่านทาง ออสซิลโลสโคป ข้อมูลรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากตารางที่ 6.5 แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



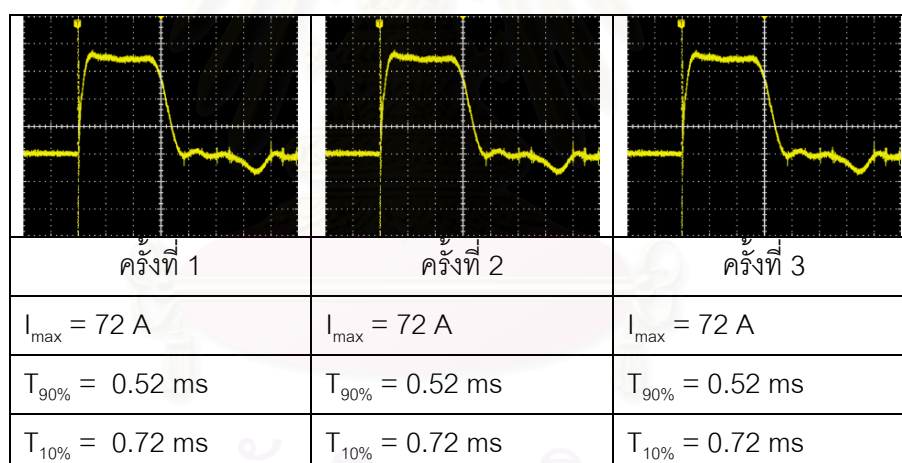
รูปที่ 6.21 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 5 kV



รูปที่ 6.22 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 10 kV



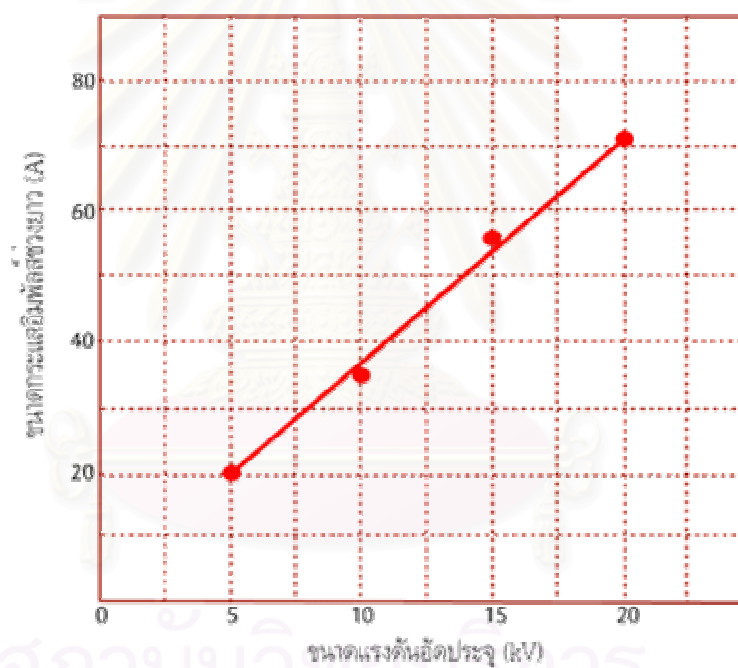
รูปที่ 6.23 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า
พิกัดกระแส 2.5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 15 kV



รูปที่ 6.24 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า
พิกัดกระแส 2.5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 20 kV

จากการทดสอบพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าแรงดันอัดประจุให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้ขนาดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้ยังคงมีค่าเท่าเดิม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับระดับแรงดันอัดประจุ ไม่ได้ทำให้ค่าช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสเปลี่ยนแปลง และเมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม PSPICE พบว่ามีผลสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามผลของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสอิมพัลส์ที่ได้จากการจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากวงจรที่ใช้ในการจำลองไม่ได้พิจารณาถึงผลของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง

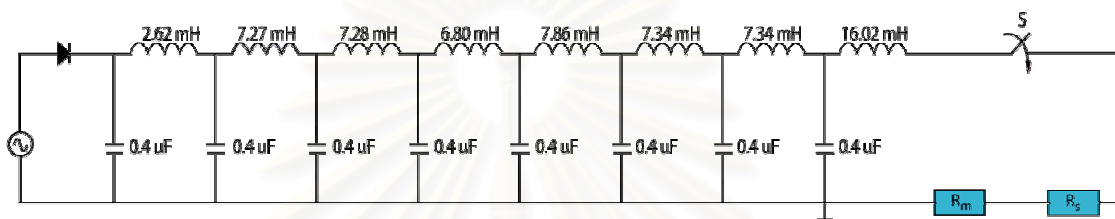
จากข้อมูลที่ได้ในการทดสอบ นำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันอัดประจุ กับขนาดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่สร้างได้ แสดงดังกราฟรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว กับแรงดันอัดประจุ จากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA

6.5) การทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

การทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจรสำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในงานวิจัยนี้ เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุกับค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่เกิดขึ้น สำหรับวงจรการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.26



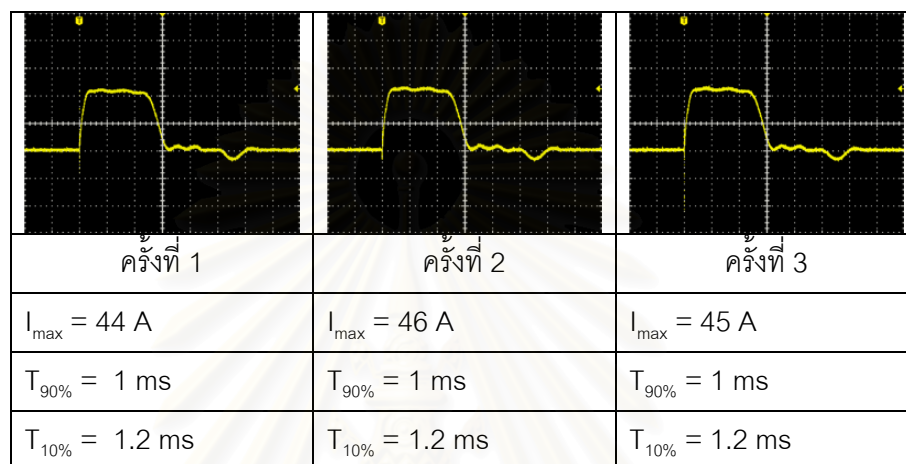
รูปที่ 6.26 วงจรการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร
สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

ในการทดสอบจะควบคุมค่าช่วงเวลา $T_{90\%}$ และค่าช่วงเวลา $T_{10\%}$ ให้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานยอมรับ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6.6

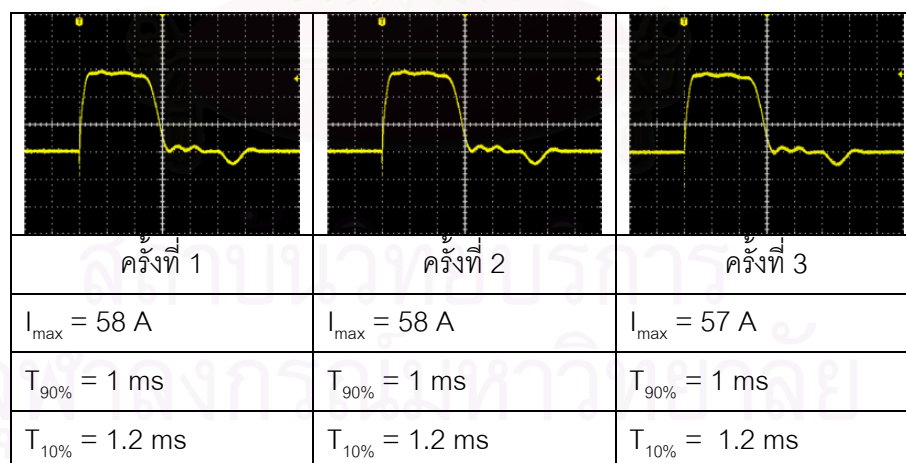
ตารางที่ 6.6 ผลการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

แรงดันอัดประจุ (kV)	ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว (A)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
15	44	46	45	45
20	58	58	57	57.7
25	74	73	72	73
30	92	92	90	91.3
35	100	100	102	100.7

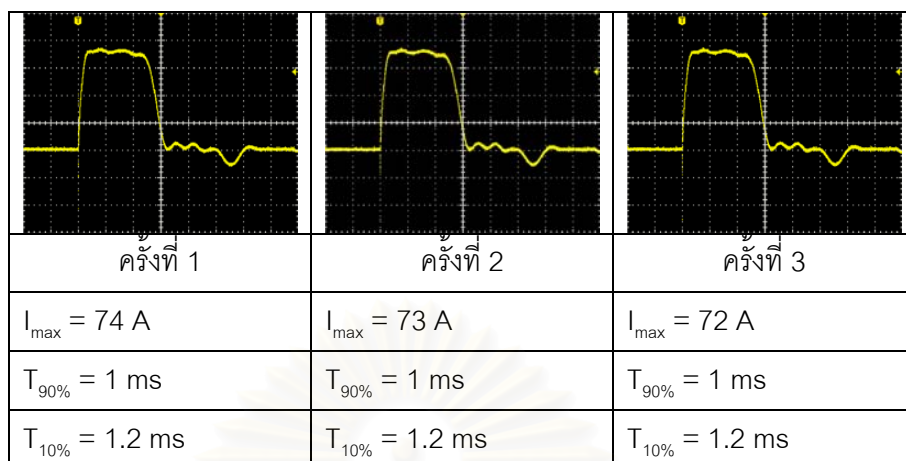
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุ กับค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.6 เป็นผลที่ได้จากการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจร ซึ่งผลที่ได้จะถูกบันทึกลงบนคอมพิวเตอร์ผ่านทาง ออสซิลโลสโคป ข้อมูลรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากตารางที่ 6.6 แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



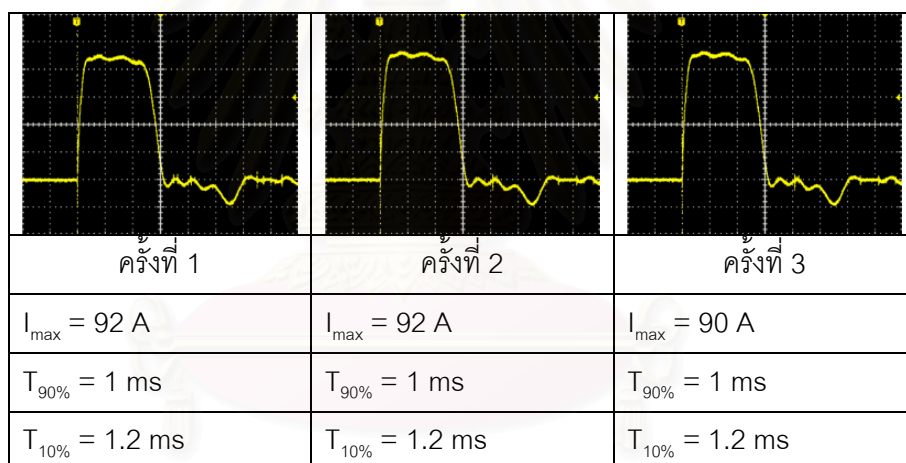
รูปที่ 6.27 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 15 kV



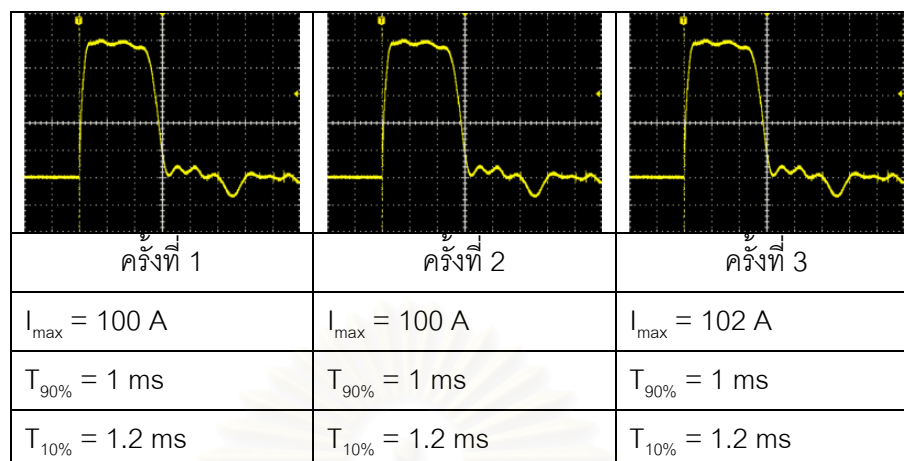
รูปที่ 6.28 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 20 kV



รูปที่ 6.29 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า
พิกัดกระแส 5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 25 kV



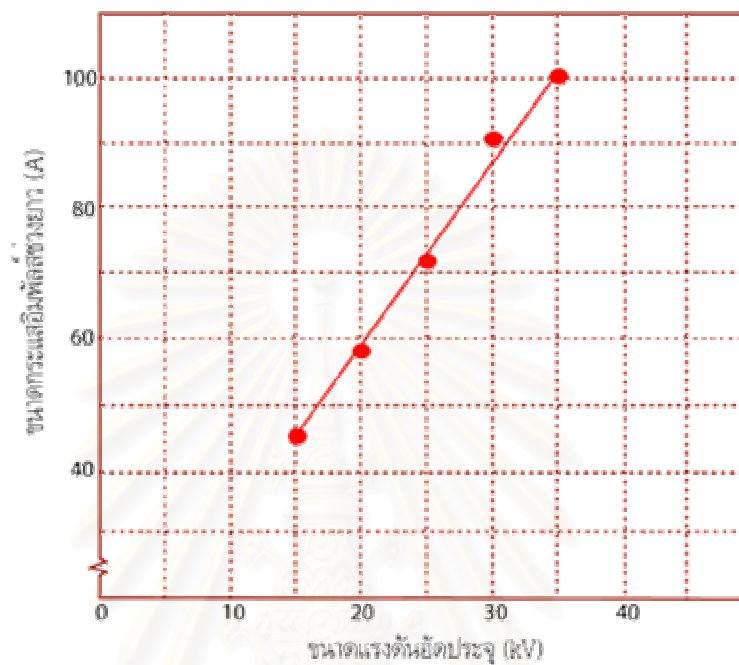
รูปที่ 6.30 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า
พิกัดกระแส 5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 30 kV



รูปที่ 6.31 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่า
พิกัดกระแส 5 kA ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 35 kV

จากการทดสอบพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าแรงดันอัดประจุให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้ขนาดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้ยังคงมีค่าเท่าเดิม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับระดับแรงดันอัดประจุ ไม่ได้ทำให้ค่าช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสเปลี่ยนแปลง และเมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม PSPICE พบว่ามีผลสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามผลของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสอิมพัลส์ที่ได้จากการจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากวงจรที่ใช้ในการจำลองไม่ได้พิจารณาถึงผลของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง

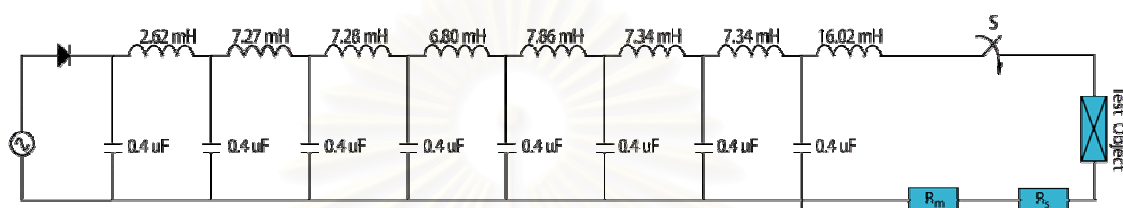
จากข้อมูลที่ได้ในการทดสอบ นำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันอัดประจุ กับขนาดกระแสลัดวงจรที่ยาวที่สร้างได้ แสดงดังกราฟรูปที่ 6.32



รูปที่ 6.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสลัดวงจร กับแรงดันอัดประจุ จากการทดสอบลัดวงจร สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

6.6) การทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจริงสำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

การทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจริง สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในงานวิจัยนี้ เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุ กับค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่เกิดขึ้น สำหรับวงจรการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.33



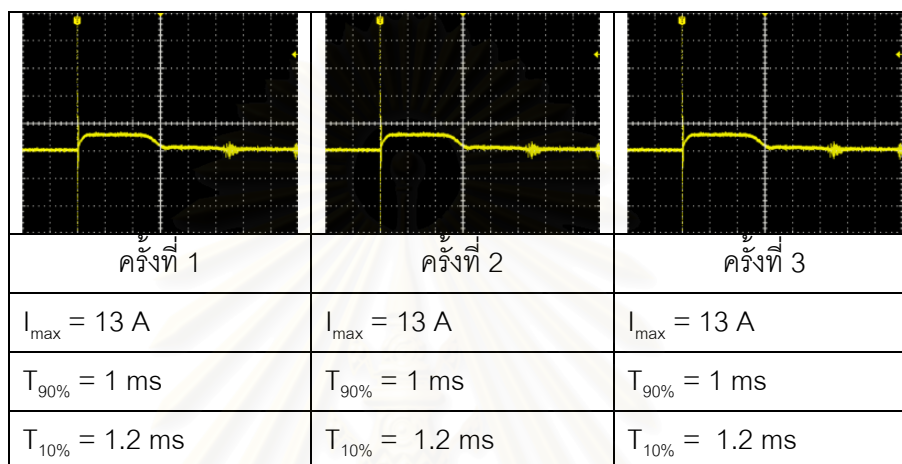
รูปที่ 6.33 วงจรการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจริง
สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

ในการทดสอบจะควบคุมค่าช่วงเวลา $T_{90\%}$ และค่าช่วงเวลา $T_{10\%}$ ให้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานยอมรับ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6.7

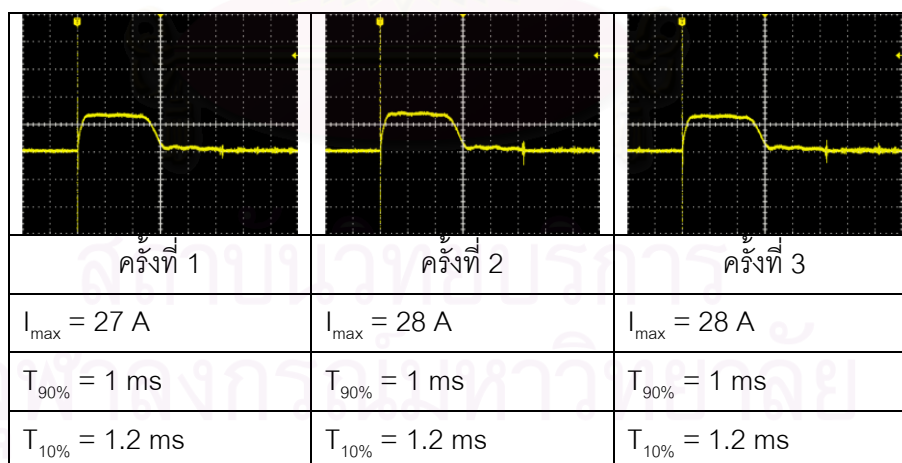
ตารางที่ 6.7 ผลการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจริง สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

แรงดันอัดประจุ (kV)	ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว (A)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
20	13	13	13	13
25	27	28	28	27.7
30	40	40	41	40.3
35	57	57	57	57
40	68	67	68	67.7
45	81	80	80	80.3

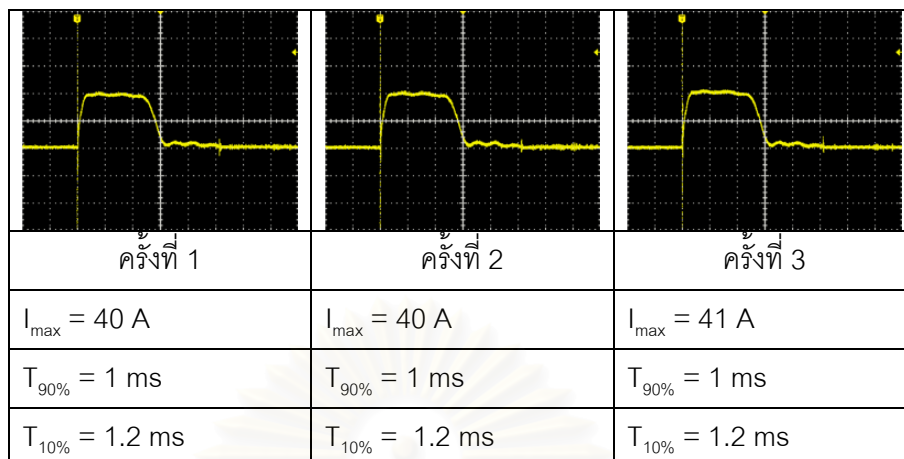
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุ กับค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.7 เป็นผลที่ได้จากการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจริง ซึ่งผลที่ได้จะถูกบันทึกลงบนคอมพิวเตอร์ผ่านทาง ออสซิลโลสโคป ข้อมูลรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากตารางที่ 6.7 แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



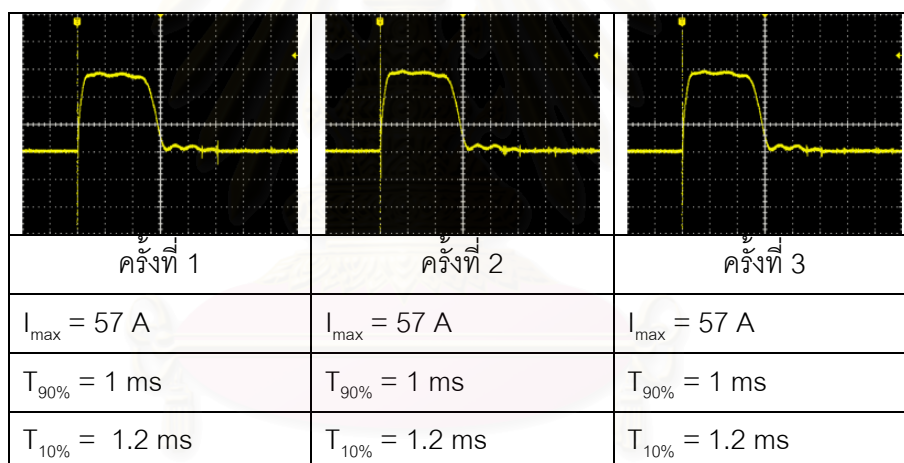
รูปที่ 6.34 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง
ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 20 kV



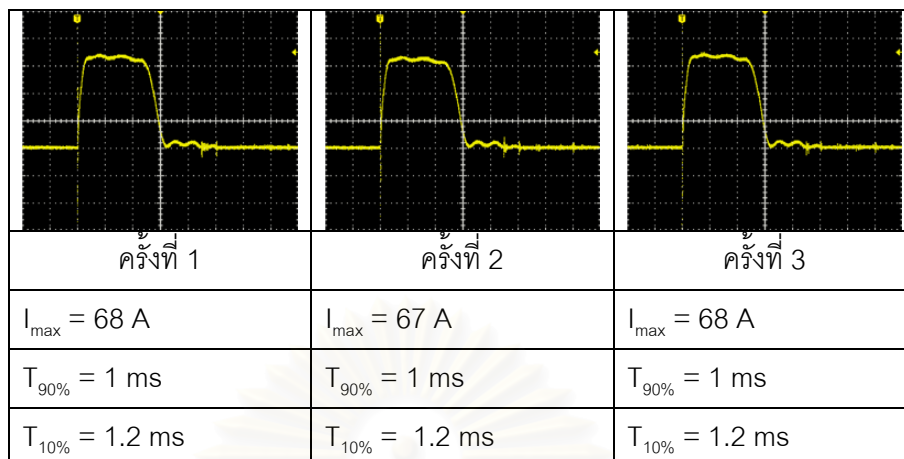
รูปที่ 6.35 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง
ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 25 kV



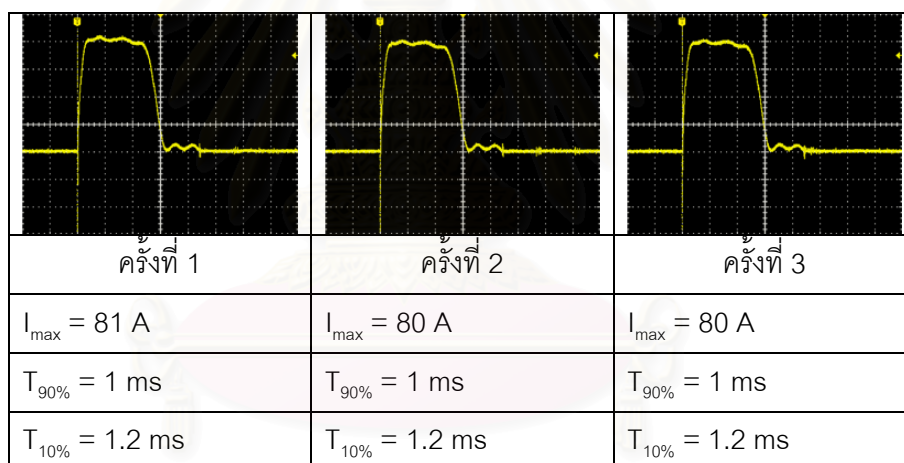
รูปที่ 6.36 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง
ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 30 kV



รูปที่ 6.37 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง
ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 35 kV

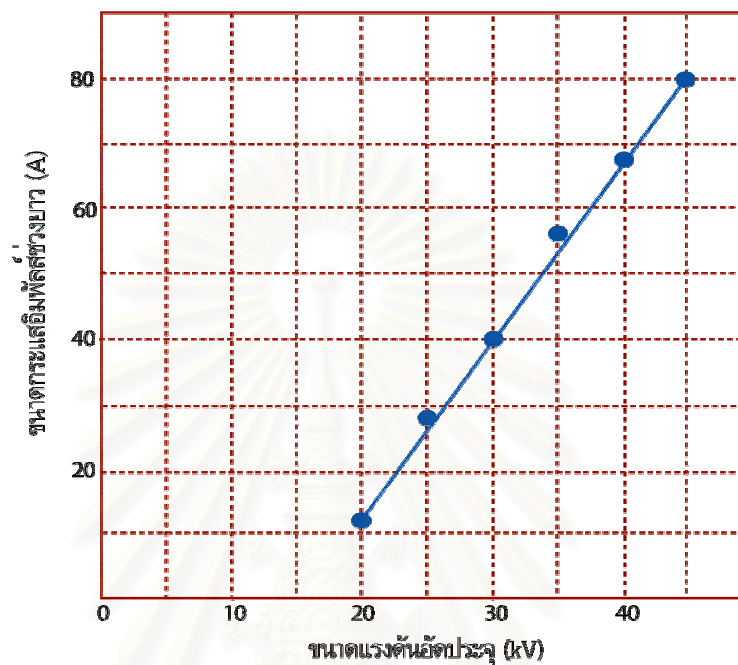


รูปที่ 6.38 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง
ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 40 kV



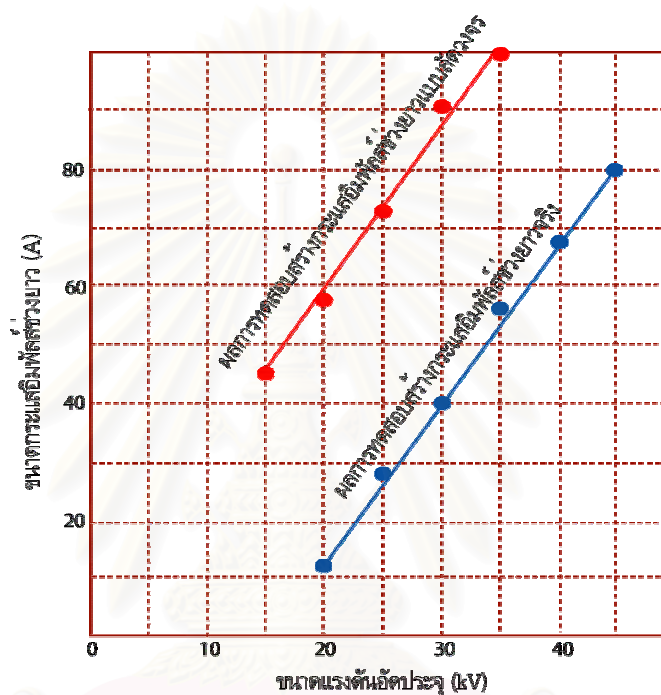
รูปที่ 6.39 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบจริง
ที่ระดับแรงดันอัดประจุ 45 kV

จากผลการทดสอบที่ได้เมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันอัดประจุกับ ขนาดกระแสลัดวงจรที่สร้างได้ แสดงดังกราฟรูปที่ 6.40



รูปที่ 6.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสลัดวงจร กับแรงดันอัดประจุ สำหรับการทดสอบจริง

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจรในหัวข้อที่ 6.4 กับผลการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจริงในหัวข้อนี้พบว่า จะต้องจ่ายแรงดันอัดประจุให้แก่เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์สูงขึ้นเพื่อที่จะให้ได้ขนาดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเท่ากัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 6.41



รูปที่ 6.41 เปรียบเทียบผลการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจรกับการทดสอบจริง

จากผลการทดสอบจริงบนกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA เมื่อทำการจ่ายแรงดันที่ระดับ 42 kV พบว่าลักษณะสมบัติของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้ซึ่งประกอบด้วย ช่วงเวลา 10% ช่วงเวลา 90% และค่ายอดกระแสอิมพัลส์ นั้นมีค่าสอดคล้องตามที่มาตรฐาน IEC 60099-4 กำหนดสำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ดังแสดงในตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 ลักษณะสมบัติของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่สร้างได้

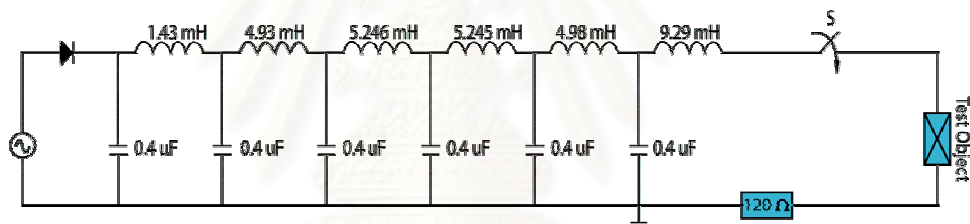
	ลักษณะสมบัติ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์	กับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA	
		ค่ามาตรฐาน	ค่าที่สร้างได้
1	ช่วงเวลา 10% (ms)	$\leq 1.5T_{90\%}$	1.2
2	ช่วงเวลา 90% (ms)	1	1
3	ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ (A)	75	75

บทที่ 7

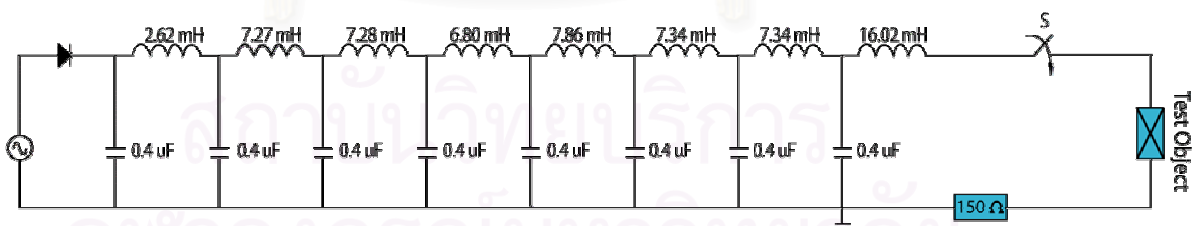
สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดสอบ

การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในงานวิทยานิพนธ์นี้ ใช้สร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวรูปคลื่นทดสอบสำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA และ 2.5 kA ตามที่มาตรฐาน IEC 60099-4 กำหนด โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทานเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว จากผลการทดสอบพบว่า เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่ประกอบสร้าง สามารถสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA และ 2.5 kA ได้จริงตามที่มาตรฐานกำหนด โดยมีวงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 7.1 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวสำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 2.5 kA



รูปที่ 7.1 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวสำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่ได้ประกอบสร้างในงานวิจัยนี้ ได้แนวคิดมาจากรายงานการวิจัยในต่างประเทศ และการพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นมาเองตามลำดับ ซึ่งนับเป็นพื้นฐานสำคัญ ที่มีประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัย เกี่ยวกับการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวต่อไป และใช้ในการพัฒนากับดักฟ้าผ่าที่ผลิตในประเทศไทย

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบความทนได้กระแสอิมพัลส์ช่วงยาว บนกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA มีข้อเสนอแนะที่สามารถปรับปรุงแก้ไขได้ดังนี้

1) พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้น เนื่องจากค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวลดลง ดังนั้นในการประกอบสร้างตัวเหนี่ยวนำสำหรับเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ จะต้องพิจารณาถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดงที่นำมาใช้

2) ผลของค่าความเหนี่ยวนำรวมที่เกิดขึ้นทำให้ ช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่คำนวณได้ ดังนั้นในการออกแบบสร้างตัวเหนี่ยวนำ จึงควรมีการออกแบบสร้างให้ตัวเหนี่ยวนำสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ เพื่อแก้ไขผลของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความเหนี่ยวนำรวม

3) ในการประกอบสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ ควรใช้ลวดทองแดงเคลือบฉนวนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน เพราะจะทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากันในแต่ละช่อง และสะดวกต่อการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ

รายการอ้างอิง

1. IEC 60099-4. Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, 2001-12.
2. Modrusan, M. Long-duration impulse current generator for arrester tests according to IEC recommendations. Switzerland: Haefely, 1977.
3. Berger. Novel Observations on lightning discharges, 1967.
4. สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2547.
5. องอาจ หาญทวีสมพล และ ปรีชา เตชทิพากร. การออกแบบสร้างตัวต้านทานสำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันสูง 100 กิโลโวลต์: รายงานโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
6. Henry, K. Radio Engineering Handbook. New York: McGraw-Hill, 1963.
7. Zaengl, Messung and Hoher. Schnell veränderlicher Ströme. Einführung der Hochspannungstechnik. ETH Zurich, 1984.
8. Schwab, A.J. High Voltage Measurement Techniques, Cambridge: MIT Press, 1972.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การจัดแบ่งกลุ่มของกับดักฟ้าผ่าและข้อกำหนดการทดสอบ

ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ได้ทำการแบ่งกลุ่มของกับดักฟ้าผ่าตามพิคัดกระแส โดยกับดักฟ้าผ่าในแต่ละกลุ่มมีข้อกำหนดการทดสอบดังแสดงในตารางที่ ก.1

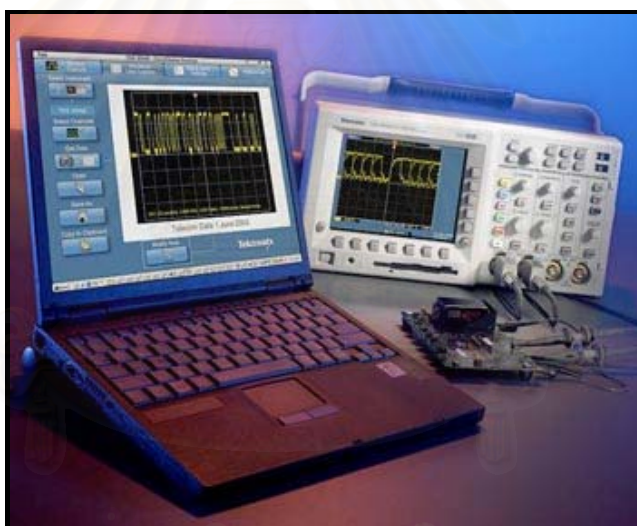
ตาราง ก.1 การจัดแบ่งกลุ่มของกับดักฟ้าผ่าและข้อกำหนดการทดสอบ

	Standard nominal discharge current ²⁾				
	20 000 A	10 000 A	5 000 A	2 500 A	1 500 A
1) Rated voltage U_r (kV _{rms})	$360 < U_r \leq 756$	$3 \leq U_r \leq 360$	$U_r \leq 132$	$U_r \leq 132$	See note 3
2) Insulation withstand tests on the arrester housing	7.2.6, 7.2.7	7.2.6, 7.2.7, 7.2.8	7.2.6, 7.2.8	7.2.6, 7.2.8	7.2.6, 7.2.8
3) Residual Voltage test	Table K.1	Table K.1	Table K.2	Table K.2	Table K.2
a) Steep current impulse residual voltage test	7.3.1	7.3.1	7.3.1	7.3.1	7.3.1
b) Lightning impulse residual voltage test	7.3.2	7.3.2	7.3.2	7.3.2	7.3.2
c) Switching impulse residual voltage test	7.3.3	7.3.3	Not required	Not required	Not required
4) Long duration current impulse withstand test	7.4.2	7.4.2	7.4.3	7.4.3	Not required
5) Operating duty test					
a) High current impulse operating duty test	Not required	7.5.4 Table 6	7.5.4 Table 6	7.5.4 Table 6	7.5.4 Table 6
b) Switching surge operating duty test	7.5.5 Table 4	7.5.5 Table 4	Not required	Not required	Not required
6) Power frequency voltage versus time curve	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10
7) Pressure relief (when fitted with relief device)	5.11	5.11	5.11	Not required	Not required
8) Arrester disconnecter (when fitted)	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12
9) Polluted housing test	Annex F				
10) Internal partial discharge test	7.8	7.8	7.8	7.8	-
11) Mechanical tests	13	13	13	13	13
¹⁾ Numbers in rows 2 to 8, 10 and 11 refer to clauses and sub-clauses in this standard. ²⁾ In some countries it is customary to classify arrester: - station for 10 000 A and 20 000 A arresters: - intermediate or distribution for 5 000 A arresters: - secondary for 1 500 A arresters. ³⁾ This low voltage range is under consideration.					

ภาคผนวก ข

โปรแกรม Tektronix OpenChoice Desktop

โปรแกรม Tektronix Openchoice Desktop เป็นโปรแกรมที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถทำการรับและส่งข้อมูลระหว่างดิจิทัลออสซิลโลสโคปยี่ห้อ Tektronix กับคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ ข.1 ข้อมูลที่คอมพิวเตอร์สามารถรับจากออสซิลโลสโคปได้ ประกอบไปด้วยข้อมูลรูปภาพที่แสดงบนหน้าจอออสซิลโลสโคป ข้อมูลของรูปคลื่นสัญญาณและ ข้อมูลการตั้งค่าออสซิลโลสโคป ในการติดต่อสื่อสารระหว่างออสซิลโลสโคปกับคอมพิวเตอร์ สามารถเชื่อมต่อได้หลายรูปแบบเช่น การติดต่อสื่อสารผ่านระบบ Ethernet, การติดต่อสื่อสารผ่านสาย GPIB เป็นต้น ซึ่งรูปแบบในการเชื่อมต่อเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ ชนิด และรุ่นของออสซิลโลสโคปจะรองรับได้

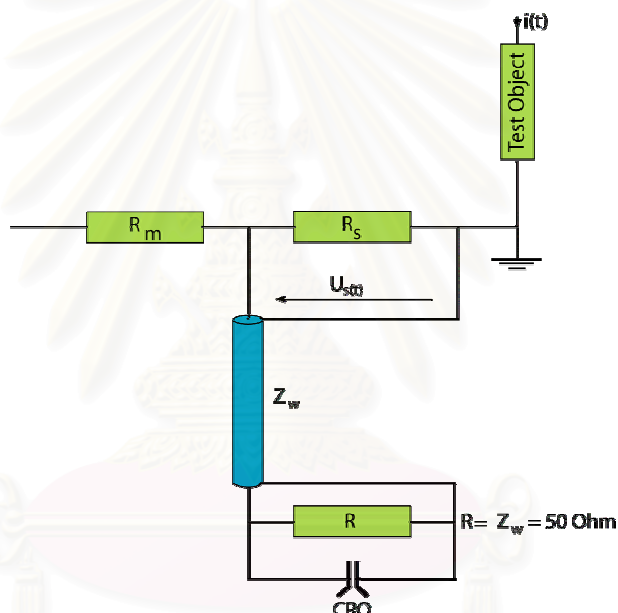


รูปที่ ข.1 การถ่ายโอนข้อมูลระหว่างดิจิทัลออสซิลโลสโคปกับคอมพิวเตอร์

ภาคผนวก ค

การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยชั้นความต้านทานต่ำ

การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยชั้นความต้านทานต่ำ (R_S) ที่ทราบค่าแน่นอน ใช้สำหรับวัดกระแสโดยให้กระแสที่ต้องการวัดนั้นไหลผ่านความต้านทานของชั้นที่ แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชั้นที่นั้นด้วยออสซิลโลสโคป โดยผ่านสายเคเบิลแกนร่วมที่มีความต้านทานสมคู้กัน $R = Z_w = 50 \Omega$ ต่อปลายเคเบิลขนานกับเข้ากับ CRO ดังในรูปที่ ค.1



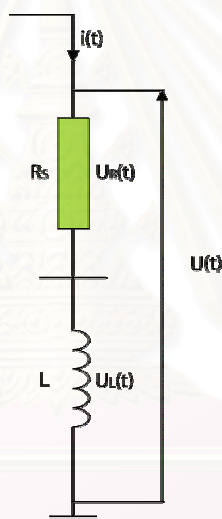
รูปที่ ค.1 วงจรวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยชั้นที่

ถ้าชั้นที่นั้นเป็นความต้านทานล้วนและไม่คิดถึงค่า Z_w เพราะ $R_S \ll Z_w$ และอาศัยกฎของโอห์มก็จะสามารถหากระแสได้ดังสมการ

$$U_S(t) = i(t)R_S$$

ค่าความต้านทานของชั้นที่วัดกระแสฮอลล์จะกำหนดด้วยความร้อนที่กระจายออกไป หรือการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานของชั้นที่นั่นเอง นอกจากนั้นแล้ว ต้องคำนึงถึงค่าแรงดันตกคร่อมชั้นที่ให้อยู่ในค่ากำหนดที่เครื่องวัด วัดได้ โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 100 mΩ ซึ่งวัดกระแสได้ถึง 200 kA

ความต้านทานที่ใช้ในช่วง 0.1 ถึง 10 mΩ และค่ารีแอคแตนซ์จะมีค่าในเกณฑ์เดียวกับ R_s เมื่อความถี่มีค่าถึง 100 MHz หรือมากกว่านั้น ดังนั้นผลกระทบจากคัปเปซิแตนซ์จึงน้อยมากสามารถละทิ้งได้ แต่ค่ารีแอคแตนซ์เหนี่ยวนำจะมีความสำคัญ เพราะเมื่อมีกระแสไหลผ่านความต้านทานชั้นจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าโดยรอบ ฉะนั้นวงจรสมมูลจึงเขียนแทนด้วย R และ L ต่ออันดับกันดังแสดงในรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 วงจรสมมูลของชั้นที่

ดังนั้น แรงดันตกคร่อมความต้านทานและอินดักแตนซ์ สามารถหาได้จากสมการ

$$u(t) = u_R(t) + u_L(t)$$

$$u(t) = R_s * i(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

ด้วยเหตุนี้เองความต้านทานของชั้นที่ จึงต้องเป็นความต้านทานที่ปลดค่าความเหนียวนำ หรือมีแต่น้อยมาก เนื่องจากแรงดันตกคร่อม $L \frac{di(t)}{dt}$ ซึ่งอาจจะมีค่ามากกว่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานล้วน นอกจากนี้การต่อชั้นที่เพื่อวัดแรงดันตกคร่อมจะต้องไม่มีวงรอบ (loop) มิฉะนั้นจะทำให้เกิดแรงดันเหนียวนำในวงรอบนั้น

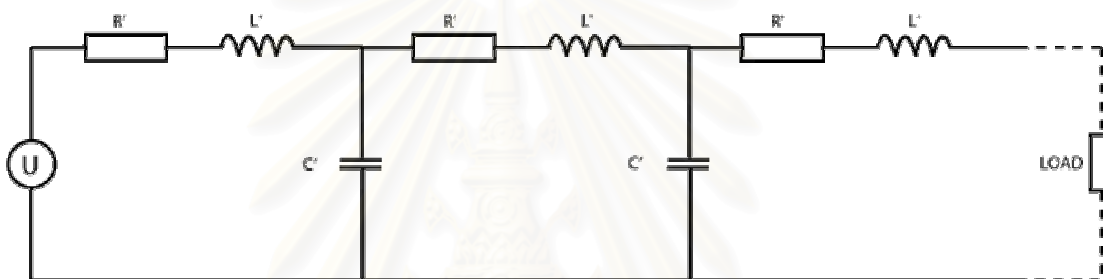


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

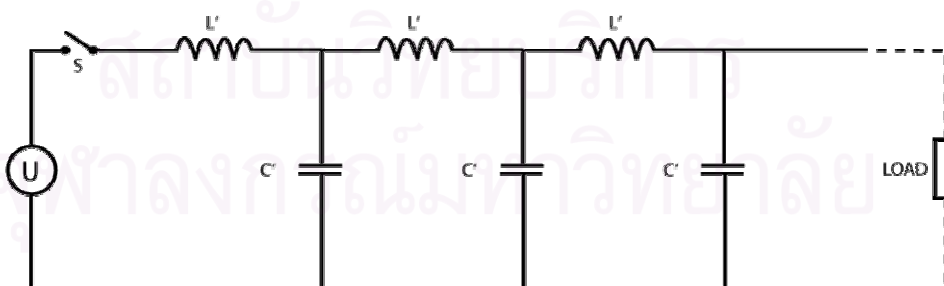
ความเร็วของคลื่นจรและเสิร์จอิมพีแดนซ์

ในระบบสายส่งจ่ายจะมีพารามิเตอร์วงจรไฟฟ้า R , L , C เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ สามารถเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ ง.1 นั้น พารามิเตอร์ R , L , C นี้ยังใช้ได้ถ้าหากค่าทางไฟฟ้าไม่ใช่คลื่นจรในความเป็นจริงแล้ว ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีได้มีลักษณะเป็นก้อน (lump) หากแต่มีลักษณะกระจาย (distributed) ตลอดช่วงความยาวของสายส่ง



รูปที่ ง.1 วงจรสมมูลของสายส่งจ่าย

เมื่อคิดเป็นคลื่นจรโดยทั่วไปจะพิจารณาเป็นสายส่งไร้กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (lossless line) คือมีเพียง L กับ C กระจายตลอดความยาว ให้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าเก็บประจุต่อความยาวสายส่ง 1 เมตร เป็น L' และ C' ตามลำดับ จะได้วงจรดังรูปที่ ง.2

รูปที่ ง.2 ค่า L และ C กระจายตลอดสายส่ง

จากรูปที่ ง.2 ถ้าสวิตช์ S จะมีกระแสอัดประจุไหลให้แก่ตัวเก็บประจุอย่างต่อเนื่อง สมมติว่าที่เวลา Δt หลังสวิตช์ สายส่งจะได้รับกระแสอัดประจุเป็นระยะ Δx ฉะนั้น ประจุที่อัดเข้าสายส่ง

$$Q = C' \Delta x U$$

จะเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำทั้งสองเป็นระยะ Δx เมตร เวลาเดียวกันก็จะเกิดสนามแม่เหล็กรอบสายตัวนำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุ ก็คือ กระแส ($I = dQ/dt$) นั่นคือ

$$I = C' U \frac{\Delta x}{\Delta t} = C' U \frac{dx}{dt}$$

ค่า $\frac{dx}{dt}$ ก็คือ อัตราการเคลื่อนที่ตามสาย ที่อาจเขียนแทนด้วยความเร็ว v เป็น

$$I = C' U v$$

จากค่าความเหนี่ยวนำ L' ต่อหน่วยความยาวเป็นเมตร เมื่อกระแสไหลผ่านไปเป็นระยะ Δx เมตร ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องในช่วงระยะ Δx จะเป็น

$$\phi = L' \Delta x I = L' \Delta x C' U v$$

จะได้แรงดันเหนี่ยวนำ

$$\frac{d\phi}{dt} = L' C' U v \frac{\Delta x}{\Delta t} = L' C' U v^2$$

$$U = L' C' U v^2$$

จะได้ความเร็ว

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$$

จากความสัมพันธ์

$$I = C'Uv = \frac{C'U}{\sqrt{L'C'}} = \frac{U}{\sqrt{L'/C'}}$$

เพราะฉะนั้น

$$\frac{U}{I} = \sqrt{L'/C'} = Z_w$$

อัตราส่วนของแรงดันต่อกระแสก็คือ ค่าอิมพีแดนซ์ และก็คือเสิร์จอิมพีแดนซ์ Z_w นั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ช่องว่างทรงกลม (Sphere gap)

การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลมเป็นวิธีที่ง่ายและมีความแน่นอนเชื่อถือได้ อาศัยการเกิดสปาร์ก หรือ เบรคดาวนระหว่างทรงกลมโลหะที่วางอยู่ในอากาศหรือกาซ ซึ่งเป็นไปตามกฎการเกิดดีสชาร์จของกาซ หรือ สปาร์ก การเบรคดาวนจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง นั่นก็คือ จะเกิดเบรคดาวนขึ้นเมื่อแรงดันสูงถึงค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าแรงดันเบรคดาวนสถิติ (Statistic breakdown voltage) ที่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนแน่นอนทำซ้ำเดิมได้ ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์คหรือเบรคดาวนนั้นขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ หรือกาซ หรือระยะห่างระหว่างทรงกลมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม นั่นคือ

$$U_b = f(d, D, \delta)$$

- เมื่อ U_b = แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์ก
 d = ระยะช่องว่างระหว่างทรงกลม
 D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม
 δ = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศ และ อุณหภูมิ

ตามมาตรฐาน IEC No.52 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรคดาวนของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐานคือ ความดันบรรยากาศ 760 มม.ปรอท และอุณหภูมิ 20 °C ซึ่งถือว่าเป็นค่าแรงดันเบรคดาวนมาตรฐาน

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฉะนั้นค่าแรงดันเบรคดาวนที่วัดได้ที่ความดันใด อุณหภูมิใดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน
จะต้องแปลงค่าที่วัดได้ไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐานคือ

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d}$$

เมื่อ U_{bn} คือค่ามาตรฐาน
 U_b คือค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิและความดันห้อง
 k_d คือตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ δ ที่คำนวณได้จากสมการ

$$\delta = \frac{p}{760} \left[\frac{273 + 20}{273 + t} \right] = 0.386 \left[\frac{p}{273 + t} \right]$$

โดยที่ p คือความดันของอากาศมีหน่วยเป็น มม.ปรอท
 t คืออุณหภูมิของห้องในขณะที่วัดมีหน่วยเป็น °C
 k_d คือตัวประกอบแปลงผันจะเท่ากับ δ เมื่อ δ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อรรถพงษ์ ปาตีบ เกิดวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2544 และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2545 โดยวิจัยทางด้านไฟฟ้าแรงสูง ปัจจุบันทำงานอยู่ที่บริษัทสกลไทย ตำแหน่งผู้จัดการฝ่ายอิเล็กทรอนิกส์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย