

วงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า
ในระบบจำหน่าย

LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE GENERATION CIRCUIT FOR TESTING
LOW VOLTAGE WINDINGS OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-020-131

วงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า
ในระบบจำหน่าย

LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE GENERATION CIRCUIT FOR TESTING
LOW VOLTAGE WINDINGS OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS



T144129

สุรศักดิ์ น้อยหอม
SURASAK NOIMOR

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 144129
วันเดือนปี 01 11 2559

b. 00196030
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-020-131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE GENERATION CIRCUIT FOR TESTING
LOW VOLTAGE WINDINGS OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULEILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMITL-2016-EN-M-020-131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

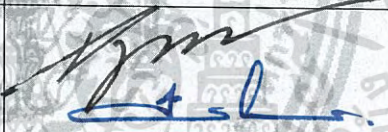




FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

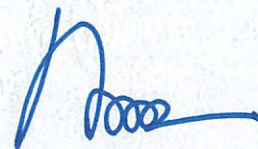
หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า
ในระบบจำหน่าย
Thesis Title Lightning Impulse Voltage Generation Circuit for Testing Low Voltage
Windings of Distribution Transformers
นักศึกษา นายสุรศักดิ์ น้อยหอม
รหัสประจำตัว 57601113
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-020-131

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
ผศ.ดร.ศุภกิตต์	โชติโก	
รศ.ดร.นเรศรชอุ	พัฒนเดช	
ผศ.ดร.พีรวัฒน์	ยุทธโกวิท	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-302

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรถดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย
นักศึกษา	นายสุรศักดิ์ น้อยหอม
รหัสนักศึกษา	57601113
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พีรฤติ ยุทโกวิท

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวงจรถดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย โดยได้มีการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแบบใหม่สำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อทดสอบโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เช่น ขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า ขดลวดเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ เป็นต้น โดยใช้วงจรถดสอบแรงดันอิมพัลส์ที่เรียกว่า วงจรเกลนิงเกอร์ (Glaninger's circuit) ในการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อให้ได้ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันเป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC60060-1(2010) ได้กำหนดไว้ โดยที่มาตรฐานได้กำหนดให้เวลาน้ำคลื่นเท่ากับ $1.2 \mu s \pm 30\%$ และเวลาหลังคลื่นเท่ากับ $50 \mu s \pm 20\%$ และมีค่ายอดกลับหัวแรงดันไม่เกิน 50% ของแรงดันสูงสุด จากการทดสอบวงจรถดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบปกติจะไม่สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันให้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดได้เมื่อทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เนื่องจากเวลาหลังคลื่นจะน้อยกว่า $40 \mu s$ แต่วงจรถดสอบสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันให้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดได้ อย่างไรก็ตามวิธีการเลือกค่าองค์ประกอบของวงจรถดสอบแบบดั้งเดิมที่เคยนำเสนอก่อนหน้านี้พบว่ารูปคลื่นที่สร้างมีความผิดเพี้ยนไปจากมาตรฐานกำหนดอย่างมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการคำนวณค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแบบใหม่ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่เป็นระบบ และสามารถทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำได้ ยกตัวอย่างเช่น ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่ใช้ในระบบของการไฟฟ้านครหลวง เพื่อยืนยันการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าจึงถูกตรวจสอบการทำงานด้วยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทำการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

Thesis	LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE GENERATION CIRCUIT FOR TESTING LOW VOLTAGE WINDINGS OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS
Student	Mr. Surasak Noimor
Student ID	57601113
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Peerawut Yutthagowith

Abstract

This thesis presents lightning impulse voltage generation circuit for testing low voltage windings of distribution transformer by designing the new circuit parameter of the lightning impulse voltage generator for testing low inductance load, such as low voltage winding of transformers and air core reactors using the impulse voltage generation circuit called Glaninger's circuit to generate the lightning impulse voltage in order to obtain lightning impulse voltage waveform according to IEC60060-1 standard requirement. The IEC standard defines the lightning impulse voltage waveform parameters and tolerance as follows; front time is $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$, time to half is $50 \mu\text{s} \pm 20\%$, and under-shoot shall not exceed 50% of the peak voltage. From the experiment, the conventional impulse voltage generation circuit cannot generate the impulse voltage according to the IEC standard requirement when low inductance load was tested because time to half of the generated voltage will be less than $40 \mu\text{s}$, but Glaninger's circuit can generate the impulse voltage of which waveform parameters according to the IEC standard requirement. However, it is found that in the previous literatures the approach to select the circuit parameters for Glaninger's circuit cannot provide the waveforms according to the standard requirement. Therefore, this paper presents the systematic parameters calculation of an impulse voltage generator. To verify the design in this paper, the designed parameters were simulated by computer program and practically tested in a high voltage laboratory.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำ และมอบความรู้ให้กับข้าพเจ้าข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอขอบคุณ รศ.ดร.นรเศรษฐ วัฒนเดช ที่ช่วยอบรมสั่งสอน ให้คำชี้แนะต่างๆกับข้าพเจ้าตลอดมา

ขอขอบคุณ อาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณ คุณบุญยวีร์ ฉายศิริ คุณปิยะพล ถือทอง คุณพัชรี ทองอินตะ และพี่ๆ น้องๆ ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ให้ความรู้และแนะนำการใช้งานอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงช่วยเหลือในการทดสอบและแสดงความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมา ด้วยดีตลอดจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี และขอขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้ช่วยเหลือข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (The Thailand Research Fund) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ คุณศักดิ์ดา มณีโรจน์ ประธานกรรมการ บริษัท ละครวิศวกรรม จำกัด ที่ร่วมให้ทุนสนับสนุนในการวิจัยนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงที่ให้การสนับสนุนด้านการเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมทั้งกำลังใจที่ดีจากเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้สำหรับคุณความดีที่เกิดจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าซึ่งข้าพเจ้ารักและเคารพยิ่ง ตลอดจนถึงครู อาจารย์ที่ข้าพเจ้าเคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และการใช้ชีวิตให้กับข้าพเจ้า

สุรศักดิ์ น้อยหอม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์.....	7
2.2 วงจรพื้นฐานของการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	10
2.3 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	13
2.3.1 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์.....	13
2.3.2 ตัวเก็บประจุโพลด.....	13
2.3.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ.....	14
2.3.4 ความต้านทานปรับรูปคลื่น.....	14
2.3.5 สปาร์กแกปและไกสวิตช์.....	15
2.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์.....	16
2.4.1 การแปรของแรงดันในเทอมของเวลา.....	17
2.4.2 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร.....	20
2.4.3 ประสิทธิภาพของวงจร.....	22
2.4.4 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่น.....	22
2.5 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับโพลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ.....	24
2.6 ความสัมพันธ์ของช่วงเวลาและรูปคลื่นแรงดัน.....	25
2.7 ข้อกำหนดรายละเอียดการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ (การไฟฟ้านครหลวง).....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า.....	31
3.1 คุณสมบัติของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเมื่อทดสอบ กับโพลต์ค่าความเหนี่ยวนำต่ำ.....	31
3.2 วงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบดั้งเดิม เมื่อทดสอบกับโพลต์ค่าความเหนี่ยวนำ.....	31
3.3 วงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยการนำเสนอของเกลนิงเกอร์.....	37
3.4 วิธีการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรเกลนิงเกอร์.....	40
3.5 การออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรเกลนิงเกอร์.....	50
3.5.1 ค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่เคยนำเสนอ.....	50
3.5.2 ค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่อยู่ในช่วง $0.4 \text{ mH} \leq L \leq 4 \text{ mH}$	51
3.5.3 ค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่ต่ำกว่า 0.4 mH	59
3.6 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้เพื่อใช้ในวงจรเกลนิงเกอร์.....	62
บทที่ 4 การทดสอบและการประเมินผล.....	65
4.1 บทนำ.....	65
4.2 การทดสอบวงจรเกลนิงเกอร์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า ที่ทำการออกแบบกับอุปกรณ์ทดสอบจำลอง.....	65
4.3 การทดสอบวงจรเกลนิงเกอร์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า ที่ทำการออกแบบกับอุปกรณ์ทดสอบจริง.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหา.....	75
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก มาตรฐาน IEC 60060-1 (2010).....	79
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

			หน้า
ตารางที่	2.1	องค์ประกอบของ B_1, B_0 และ K สำหรับวงจร A และ วงจร B	19
ตารางที่	2.2	ค่าองค์ประกอบเวลา T_1, T_2 และประสิทธิภาพของวงจร A และ วงจร B	23
ตารางที่	2.3	ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มของการไฟฟ้านครหลวง.....	30
ตารางที่	3.1	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติ.....	31
ตารางที่	3.2	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรในรูปที่ 3.3.....	33
ตารางที่	3.3	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจร.....	34
ตารางที่	3.4	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรในรูปที่ 3.6.....	35
ตารางที่	3.5	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรในรูปที่ 3.8.....	43
ตารางที่	3.6-1	ค่าเปอร์เซ็นต์การกลับหัวของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เมื่อทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่มีการปรับค่าคงที่ ของตัวคูณค่าความต้านทานปรับหลังคลื่นที่ต่อแบบขนานและต่อแบบอนุกรม....	46
ตารางที่	3.6-2	ค่าเปอร์เซ็นต์การกลับหัวของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เมื่อทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่มีการปรับค่าคงที่ ของตัวคูณค่าความต้านทานปรับหลังคลื่นที่ต่อแบบขนานและต่อแบบอนุกรม....	47
ตารางที่	3.7	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า สำหรับวงจรเกลนิงเกอร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ที่เคยนำเสนอ.....	50
ตารางที่	3.8	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า สำหรับวงจรเกลนิงเกอร์ที่ได้จากการคำนวณ.....	52
ตารางที่	3.9	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า สำหรับวงจรเกลนิงเกอร์ที่เลือกใช้.....	52
ตารางที่	3.10	องค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการจำลอง วงจรเกลนิงเกอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	59
ตารางที่	3.11	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับวงจร เกลนิงเกอร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โหลดค่าความเหนี่ยวนำ 0.2 mH.....	60
ตารางที่	3.12	รายละเอียดการออกแบบสร้างขดลวดค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่ออกแบบ.....	63
ตารางที่	4.1	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณีที่ 1.....	65
ตารางที่	4.2	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณีที่ 2.....	68
ตารางที่	4.3	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ.....	71
ตารางที่	5.1	ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม (Full wave).....	8
รูปที่ 2.2 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หลังคลื่น.....	9
รูปที่ 2.3 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น.....	9
รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซิ่ง.....	10
รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	11
รูปที่ 2.6 อิเล็กโทรดสปาร์กแกป.....	16
รูปที่ 2.7 สปาร์กแกปมีไกสวิตซ์.....	16
รูปที่ 2.8 ลابلลาชทรานฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน.....	17
รูปที่ 2.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม.....	20
รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	22
รูปที่ 2.11 วงจรพื้นฐานในการสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	24
รูปที่ 2.12 วงจรของเกลนิงเจอร์ (Glaninger's circuit).....	24
รูปที่ 2.13 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ทำการชาร์จตัวเก็บประจุอัดประจุ.....	25
รูปที่ 2.14 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อสปาร์กแกปทำงาน.....	26
รูปที่ 2.15 ค่าแรงดันที่ตกคร่อมโพลต์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลา.....	26
รูปที่ 2.16 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อตัวเก็บประจุโพลต์คายประจุไฟฟ้า.....	27
รูปที่ 2.17 ค่าแรงดันที่ตกคร่อมโพลต์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลาช่วงท้าย เมื่อตัวเก็บประจุโพลต์คายประจุไฟฟ้า.....	27
รูปที่ 2.18 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อสปาร์กแกปทำงาน.....	28
รูปที่ 2.19 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ.....	28
รูปที่ 2.20 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อเพิ่มตัวเหนี่ยวนำ ขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น.....	29
รูปที่ 2.21 การต่อตัวต้านทานขนานโพลต์ทดสอบเพื่อเปลี่ยนแปลงค่ายอดของแรงดัน.....	29
รูปที่ 3.1 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบปกติ.....	31
รูปที่ 3.2 ผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติ.....	32
รูปที่ 3.3 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโพลต์ค่าความเหนี่ยวนำ.....	32
รูปที่ 3.4 ผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติ ที่ต่อโพลต์ค่าความเหนี่ยวนำต่ำ.....	33
รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติ ที่ต่อโพลต์ค่าความเหนี่ยวนำต่ำ.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่	3.6	วงจรถูกกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่ปลดตัวต้านทานปล่อยประจุปรับหลังคลื่นออก.....	35
รูปที่	3.7	ผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่ปลดตัวต้านทานปล่อยประจุปรับหลังคลื่นออก.....	35
รูปที่	3.8	วงจรถูกกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำ.....	36
รูปที่	3.9	ผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่มีการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุอัดประจุ.....	37
รูปที่	3.10	วงจรของเกลนิงเกอร์ (Glaninger's circuit).....	38
รูปที่	3.11	รูปคลื่นแรงดันจากการคำนวณค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่เคยนำเสนอโดย Feser.....	39
รูปที่	3.12	รูปคลื่นแรงดันจากการปรับค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรเกลนิงเกอร์ตามบทความที่ Feser เคยนำเสนอ.....	40
รูปที่	3.13	วงจรเกลนิงเกอร์ที่แบ่งอิมพีแดนซ์เป็นสองกลุ่ม.....	42
รูปที่	3.14	ผลตอบสนองทางความถี่ของอิมพีแดนซ์ที่มีผลต่อหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	43
รูปที่	3.15	วงจรการวิเคราะห์การแกว่งแรงดันยอดกลับหัว.....	44
รูปที่	3.16	วงจรการวิเคราะห์การแกว่งแรงดันยอดกลับหัว.....	44
รูปที่	3.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลาเมื่อ R_d เป็นค่าคงที่.....	48
รูปที่	3.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลาเมื่อ R_e เป็นค่าคงที่.....	48
รูปที่	3.19	เส้นเปอร์เซ็นต์ค่ายอดกลับหัวของวงจรเกลนิงเกอร์.....	49
รูปที่	3.20	รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ออกแบบใหม่ของวงจรเกลนิงเกอร์.....	51
รูปที่	3.21	วงจรเกลนิงเกอร์ที่ใช้ในการจำลองรูปคลื่น.....	53
รูปที่	3.22	รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรเกลนิงเกอร์ในกรณีที่ 1.....	54
รูปที่	3.23	รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรเกลนิงเกอร์ในกรณีที่ 2.....	55
รูปที่	3.24	รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรเกลนิงเกอร์ในกรณีที่ 3.....	56
รูปที่	3.25	รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรเกลนิงเกอร์ในกรณีที่ 4.....	57
รูปที่	3.26	รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรเกลนิงเกอร์ในกรณีที่ 5.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.27 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า ของวงจรแกลงนิงเกอร์ในกรณีที่ค่าความเหนี่ยวนำไหลดมีค่า 0.2 mH.....	61
รูปที่ 3.28 ขดลวดความเหนี่ยวนำที่ออกแบบสร้าง.....	63
รูปที่ 3.29 ขดลวดเหนี่ยวนำที่วัดค่าโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม.....	64
รูปที่ 3.30 ผลการวิเคราะห์ค่าตอบสนองทางความถี่ของตัวเหนี่ยวนำที่สร้าง.....	64
รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบในห้องปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลงนิงเกอร์.....	66
รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในกรณีที่ 1.....	67
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบเปรียบเทียบกับกรจำลอง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	68
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในกรณีที่ 2.....	69
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบเปรียบเทียบกับกรจำลอง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในกรณีที่ 2.....	70
รูปที่ 4.6 วงจรการทดสอบในห้องปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เมื่อทดสอบ หม้อแปลงแรงดันต่ำ.....	71
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า กับไหลดหม้อแปลง.....	72
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบหม้อแปลงเปรียบเทียบกับกรจำลอง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายและจำหน่ายไฟฟ้าที่ติดตั้งใช้งานกลางแจ้งในระบบไฟฟ้ามีหลายชนิด ยกตัวอย่างอุปกรณ์ที่มีค่าความเหนี่ยวนำ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นต้น ซึ่งการติดตั้งใช้งานกลางแจ้งอุปกรณ์อาจได้รับความเสียหายจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบ โดยเฉพาะแรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่า มาตรฐานจึงได้กำหนดให้มีการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ (Lightning Impulse Voltage) [1],[2] ก่อนทำการติดตั้งใช้งานจริง เพื่อเป็นการยืนยันว่าอุปกรณ์สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ตามระดับการประสานสัมพันธ์ฉนวน (Insulation Coordination) ที่ออกแบบสร้างมาให้สอดคล้องกับระดับแรงดันใช้งานของอุปกรณ์นั้น

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบจากแรงดันเกินที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ซึ่งวงจรในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอาศัยหลักการความสัมพันธ์ระหว่างตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ โดยจะแบ่งออกเป็นตัวเก็บประจุอิมพัลส์ ตัวเก็บประจุโหลด ตัวต้านทานหน้าคลื่น และตัวต้านทานหลังคลื่น ประกอบเป็นวงจรเพื่อสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC60060-1(2010) โดยรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานกำหนดให้มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ $1.2 \mu s \pm 30\%$ และเวลาหลังคลื่น $50 \mu s \pm 20\%$ ซึ่งโดยปกติบริษัทผู้ผลิตจะออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยพิจารณาจากค่าตัวเก็บประจุโหลดเป็นหลัก ทำให้ในการต่อใช้งานจริงไม่สามารถปรับค่าตัวเก็บประจุโหลดนอกเหนือขอบเขตตามที่บริษัทผู้ผลิตออกแบบไว้ เพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนดเมื่อเปลี่ยนวัตถุทดสอบ จึงใช้วิธีการปรับค่าความต้านทานหน้าคลื่น และค่าความต้านทานหลังคลื่นแทน ซึ่งรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเมื่อวัตถุทดสอบเป็นโหลดชนิดตัวเก็บประจุ จะสามารถใช้วิธีการปรับค่าความต้านทานหน้าคลื่น และค่าความต้านทานหลังคลื่นได้ แต่เมื่อเปลี่ยนวัตถุทดสอบเป็นโหลดชนิดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เมื่อใช้วิธีการปรับค่าความต้านทานหน้าคลื่นและค่าความต้านทานหลังคลื่นในบางกรณีรูปคลื่นยังผิดเพี้ยนไปจากที่มาตรฐานกำหนด

แกลนิงเกอร์และนักวิจัยได้นำเสนอวงจรและวิธีการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำได้ โดยแกลนิงเกอร์ได้แนะนำให้เพิ่มค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า คือ เพิ่มตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) และเพิ่มตัวต้านทานขนานวัตถุทดสอบ (R_p) ซึ่งเป็นวงจรที่ถูกพัฒนาเพื่อให้สร้างแรงดันอิมพัลส์ที่สามารถทดสอบกับโหลด

ชนิดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ อย่างไรก็ตามพบว่า วงจรที่ออกแบบนั้นยังให้รูปคลื่นที่สร้างมีความผิดเพี้ยนไปจากมาตรฐานกำหนดอย่างมาก

จากปัญหาดังกล่าวผู้ทำวิจัยจึงได้ออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่สามารถใช้กับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ($0.4 \text{ mH} \leq L \leq 4 \text{ mH}$) เพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนด โดยใช้วงจรของแกลนิงเกอร์มาประยุกต์ใช้โดยการปรับค่าความต้านทานหน้าคลื่น ค่าความต้านทานหลังคลื่น เพิ่มตัวเหนี่ยวนำขนานกับตัวต้านทานหน้าคลื่น และเพิ่มตัวต้านทานขนานกับโหลด ด้วยการคำนวณที่เป็นระบบ และมีขั้นตอนที่แน่ชัด และสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับการทดสอบโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำได้ตามที่มาตรฐานสากลกำหนด และสามารถทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ ที่อยู่ในความดูแลของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.)

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มุ่งหวังเพื่อออกแบบหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ที่สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์เพื่อทดสอบโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำได้ โดยที่เวลาหน้าคลื่นเท่ากับ $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ และเวลาหลังคลื่น $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEC60060-1(2010) [1] และสามารถนำไปทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำในอุตสาหกรรมได้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ออกแบบ สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ และเวลาหลังคลื่น $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ มีค่าย้อนกลับชั่วคราวไม่เกิน 50% และประสิทธิภาพของวงจรมากกว่า 80% เมื่อทดสอบกับโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่มีค่าอยู่ในช่วง $0.4 \text{ mH} \leq L \leq 4 \text{ mH}$ และเมื่อค่าความเหนี่ยวนำต่ำกว่า $400 \mu\text{H}$ ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จะอยู่ในขอบเขตตามที่มาตรฐานกำหนด

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ใช้ความสัมพันธ์และหลักการของวงจรสถานะชั่วครู่ RC โดยการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการแล้วปล่อยให้คายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้มีรูปคลื่นตามต้องการ และใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบที่เหมาะสมโดยใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าในการแก้ปัญหา และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากค่าองค์ประกอบที่คำนวณได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้นำเสนอการออกแบบองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่สามารถทดสอบโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ยกตัวอย่างเช่น ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ขดลวดเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ ขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ที่สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามที่มาตรฐานสากลได้กำหนด ซึ่งมีเวลาหน้าคลื่น $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ และเวลาหลังคลื่น $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ โดยทำการศึกษาหาค่าองค์ประกอบที่เหมาะสม จากนั้นทำการตรวจสอบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ และทำการทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำการออกแบบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทำการสรุปผลการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ได้ออกแบบ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถแบ่งเป็นหัวข้อตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ค้นหางานวิจัยที่น่าสนใจ
- 2) ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
- 3) ศึกษาการทำงานและคำนวณวงจร
- 4) ออกแบบการคำนวณวงจรแบบใหม่
- 5) ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองรูปคลื่นแรงดันที่ได้
- 6) ทำการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบที่ทำการออกแบบ
- 7) นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 8) สรุปผลการทดสอบ
- 9) จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐานแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์ วงจรการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ องค์ประกอบการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์ วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ และความสัมพันธ์ของช่วงเวลาและรูปคลื่นแรงดัน

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่สามารถทดสอบกับโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ โดยแสดงวิธีการหาค่าองค์ประกอบที่เป็นขั้นตอนชัดเจน และมีการตรวจสอบการออกแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ให้เป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC60060-1 กำหนดซึ่งประกอบด้วย เวลาหน้าคลื่น $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ และเวลาหลังคลื่น $50 \mu\text{s} \pm 20\%$

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำการออกแบบกับโหลดจำลองโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดใกล้เคียงกับตัวเก็บประจุ เก็บผลการทดสอบและเปรียบเทียบรูปคลื่นที่ได้ให้ตรงตามที่มาตรฐาน IEC60060-1 ได้กำหนด และทำการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบที่ออกแบบกับอุปกรณ์หรือโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เก็บผลการทดสอบและเปรียบเทียบรูปคลื่นกับการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยที่ได้ทดสอบมาทั้งหมด และสรุปเกี่ยวกับการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าเพื่อทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ.2518 (ค.ศ.1975) มีการนำเสนอเรื่อง “Impulse Testing of Low Inductance Electrical Equipment” [3] โดย P. Glaninger ได้นำเสนอวงจรการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่สามารถทดสอบกับโหลดตัวเหนี่ยวนำ โดยทำการปรับปรุงวงจรอิมพัลส์แบบดั้งเดิม โดยเพิ่มตัวเหนี่ยวนำขนาดตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นและตัวต้านทานขนาดวัตต์ทดสอบ

ในปี พ.ศ.2520 (ค.ศ.1977) มีการนำเสนอเรื่อง “Circuit Design of Impulse Generators for the Lightning Impulse Voltage Testing of Transformers” [4] โดย K. Feser ได้นำเสนอการหาค่าองค์ประกอบของวงจรการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่สามารถทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อให้ได้รูปคลื่นที่มีเวลาหลังคลื่น มากกว่า $40 \mu\text{s}$ โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ดั้งเดิมเมื่อทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ และเมื่อมีการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบดั้งเดิมกับหม้อแปลงที่มีค่าความเหนี่ยวนำที่ต่ำมาก การปรับรูปคลื่นแบบวิธีปกติจะไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากเวลาหลังคลื่นจะสั้นกว่า $40 \mu\text{s}$ ดังนั้น Feser จึงได้นำเสนอการใช้วงจรการทดสอบเพื่อให้สามารถทดสอบได้ และมีเวลาหลังคลื่นที่มากกว่า $40 \mu\text{s}$ แต่อย่างไรก็ตามการหาค่าองค์ประกอบของ Feser เมื่อนำมาจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าค่าที่ Feser ออกแบบนั้นยังให้ค่าที่ผิดเพี้ยนไปจากมาตรฐานมาก

ในปี พ.ศ.2543 (ค.ศ.2000) มีการนำเสนอเรื่อง “Impulse Voltage Test of Power Transformers” [5] เขียนโดย W. Schrader และ W. Schufft ได้นำเสนอ การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ที่มีค่าเวลาหลังคลื่นมากกว่า $40 \mu\text{s}$ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEC60076-3 และ IEC60060-1 ที่ได้กำหนดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าไว้ ซึ่งในบทความได้ใช้วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบเดิมโดยมีการแก้ไขคือการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ การเพิ่มตัวต้านทานต่อขนาน และนำเสนอให้ใช้วงจรที่มีชื่อว่า “Glaninger-circuit” ในการแก้ปัญหาเวลาหลังคลื่นที่น้อยกว่า $40 \mu\text{s}$ แต่อย่างไรก็ตามไม่ได้มีการนำเสนอวิธีการหาค่าองค์ประกอบของวงจร

ในปี พ.ศ. 2544 (ค.ศ.2001) Dieter Kind และ Kurt Feser ได้เขียนหนังสือที่ชื่อว่า “High-voltage Test Techniques” [6] ในหนังสือได้เขียนส่วนหนึ่งเกี่ยวกับ “Generation of Impulse Voltages” ที่มีการแนะนำการออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และรวมถึงการทดสอบ กรณีที่โหลดทดสอบเป็นแบบชนิดตัวเก็บประจุและโหลดแบบตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งวงจรที่แนะนำสำหรับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำจะมี 2 วงจร แบ่งเป็น โหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 4 mH ถึง 40 mH และอีกวงจรสำหรับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำน้อยกว่า 4 mH ในหนังสือยังให้ข้อเสนอแนะต่างๆในการปรับค่าการทดสอบ แต่ยังไม่มีการแนะนำการหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจร

ในปี พ.ศ.2552 (ค.ศ.2009) M S Naidu และ V Kamaraju ได้เขียนหนังสือ High voltage engineering [7] โดยในเนื้อความบางส่วนได้นำเสนอเกี่ยวกับวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับทดสอบโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นกับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ ยกตัวอย่างเช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และขดลวดเหนี่ยวนำ โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าของโหลดที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลต่อค่าเวลาน้ำคลื่น ค่าความเหนี่ยวนำต่ำจะส่งผลต่อค่าเวลาหลังคลื่นและเกิดการแกว่งของรูปคลื่น ซึ่งผู้เขียนหนังสือแนะนำให้ใช้วงจรของแกลนิงเกอร์ในการทดสอบเช่นกัน อีกทางเลือกหนึ่งคือการเพิ่มความจุไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และใช้ค่าองค์ประกอบที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นมีเวลาหลังคลื่นที่อยู่ในช่วง $40 \mu\text{s}$ ถึง $60 \mu\text{s}$ ซึ่งจากการแนะนำให้ใช้วงจรของแกลนิงเกอร์ ผู้เขียนหนังสือไม่แนะนำในการเลือกใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า

ในปี พ.ศ. 2557(ค.ศ.2014) Anitya Kumar Shukla และ Dr.Ranjana Singh ได้เขียนวารสารในหัวข้อ “Analysis of Inductance Front Controlled Impulse Voltage Generator Circuit By MATLAB Simulink” [8] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการจำลองการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ เพื่อให้ได้รูปคลื่นตามที่มาตรฐานกำหนด และช่วงเวลาหลังคลื่นอยู่ระหว่าง $40 \mu\text{s}$ ถึง $60 \mu\text{s}$ เมื่อทดสอบกับอุปกรณ์ทดสอบชนิดค่าความเหนี่ยวนำ โดยที่เมื่อทดสอบกับอุปกรณ์ที่มีค่าความเหนี่ยวนำที่สูงกับวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติจะสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ตามมาตรฐานกำหนด แต่เมื่อค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่าปานกลาง (4 mH ถึง 15 mH) หรือมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ (0.4 mH ถึง 4 mH) จะ

ส่งผลต่อค่าเวลาหลังคลื่นของรูปคลื่นแรงดันดิมพัลส์ ด้วยเหตุนี้จึงใช้ตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น และค่าพารามิเตอร์ของวงจรจะถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อช่วยในการหาค่าความเหนี่ยวนำที่นำมาต่อขนานกับตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น เพื่อให้ได้ช่วงเวลาหลังคลื่นอยู่ในมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตาม วารสารที่เขียนขึ้นยังไม่มีขั้นตอนการหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ชัดเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินทรานเซียนต์ ซึ่งเกิดจากเหตุภายนอก ที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง อันเนื่องมาจากการทำงานของสวิตช์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซึ่ง สำหรับการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นในห้องทดสอบนั้น มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาวิจัย หรือทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ก่อนที่จะถูกนำไปติดตั้ง เพื่อยืนยันความสามารถของความคงทนต่อแรงดันเกินเหล่านี้ที่เกิดขึ้น ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์ ไม่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันสูงเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับการแปรของแรงดันไปตามเวลาอีกด้วย ฉะนั้นเพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จึงกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานขึ้น โดยยึดถือเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์

2.1 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์ [9]

แรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานจะกำหนดลักษณะของรูปคลื่น คือ

1. ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน
2. ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวก หรือลบก็ได้ เมื่อเทียบกับดิน
3. เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 คือ ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึงค่ายอด
4. เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 คือ ช่วงเวลาตั้งแต่แรงดันต้นเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด
5. แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะเรียกว่า รูปคลื่น 1.2/50 μs
6. แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตช์ซึ่งจะเรียกว่า รูปคลื่น 250/2500 μs

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งเป็น

- รูปคลื่นเต็ม (Full wave) หมายถึง รูปคลื่นที่ขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด แล้วค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.1

- รูปคลื่นตัด (Chopped wave) เกิดจากเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มให้กับวัสดุทดสอบ หากฉนวนของวัสดุทดสอบทนไม่ได้ จะเกิดการสปาร์กผ่าน เกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรกดาวนจ์จะทะเล ทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น การเกิดคลื่นตัดนี้ อาจะเกิดขึ้นที่ส่วนหลังคลื่นดังรูปที่ 2.2 หรือส่วนหน้าคลื่นดังรูปที่ 2.3 ก็ได้

- รูปคลื่นตัดมีส่วนกำหนดสำคัญ คือ เวลาช่วงคลื่นตัด (Chopped time) T_c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เวลาหลังคลื่น T_2 และค่ายอด U_m ไว้คือ

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30 \%$

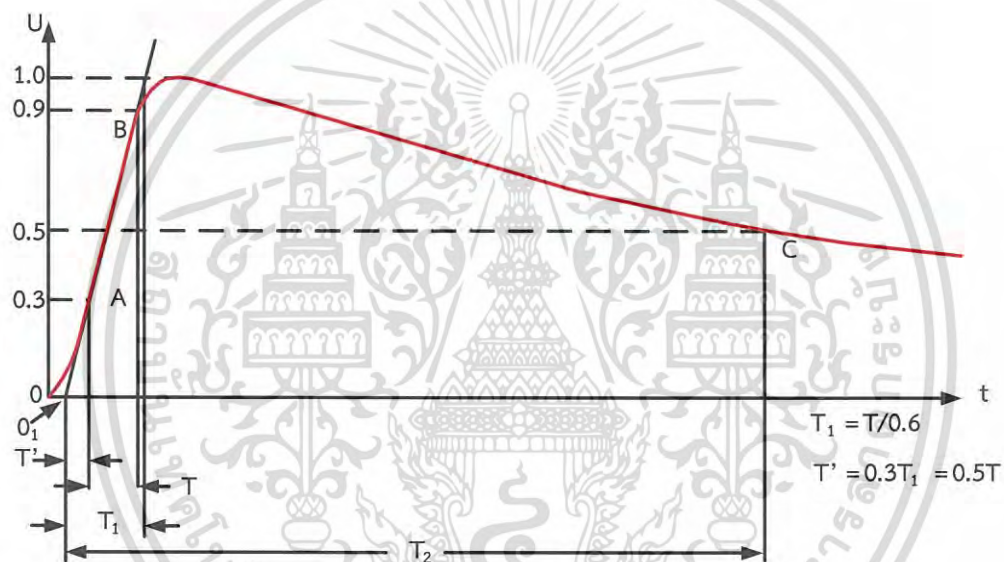
เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20 \%$

ค่ายอดแรงดัน $U_m \pm 3 \%$

ส่วนแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตช์ซึ่ง 250/2500 μs ดังรูปที่ 2.4 กำหนดด้วยเวลา คือ

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_{cr} = 250 \mu\text{s} \pm 20 \%$

เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 2500 \mu\text{s} \pm 60 \%$



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม (Full wave)

เมื่อ T_1 คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น

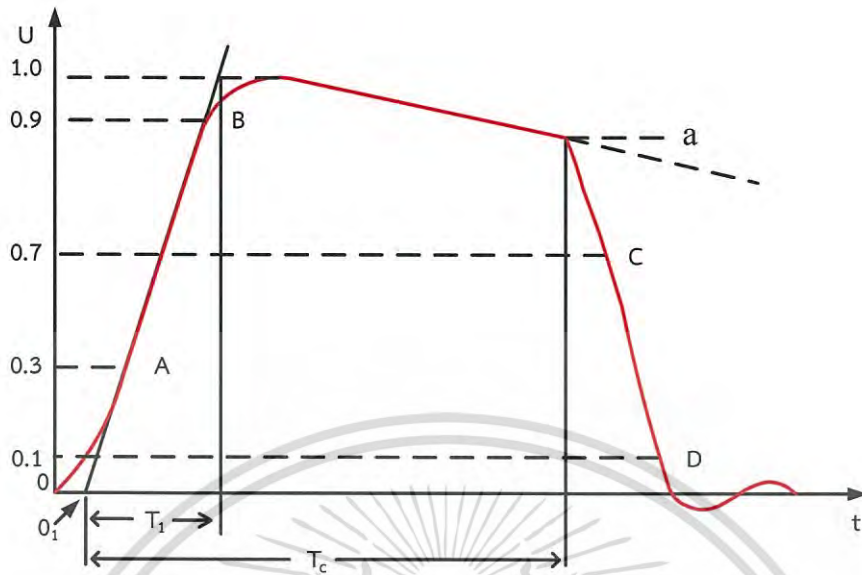
T_2 คือ เวลาช่วงหลังคลื่น

T' คือ ช่วงเวลาตั้งแต่จุดกำเนิดเสมือนจนกระทั่งถึงเวลาที่ค่าแรงดันเพิ่มขึ้นได้ 30% ของค่ายอด

T คือ ผลต่างของเวลาที่ค่าแรงดัน 90% ของค่ายอด กับเวลาที่ค่าแรงดัน 30% ของค่ายอด

O_1 คือ จุดกำเนิดเสมือนเกิดจากการลากเส้นตรงผ่านจุด A และ B โดยจุด O_1 คือจุดที่เส้นตรงตัด

แกน t

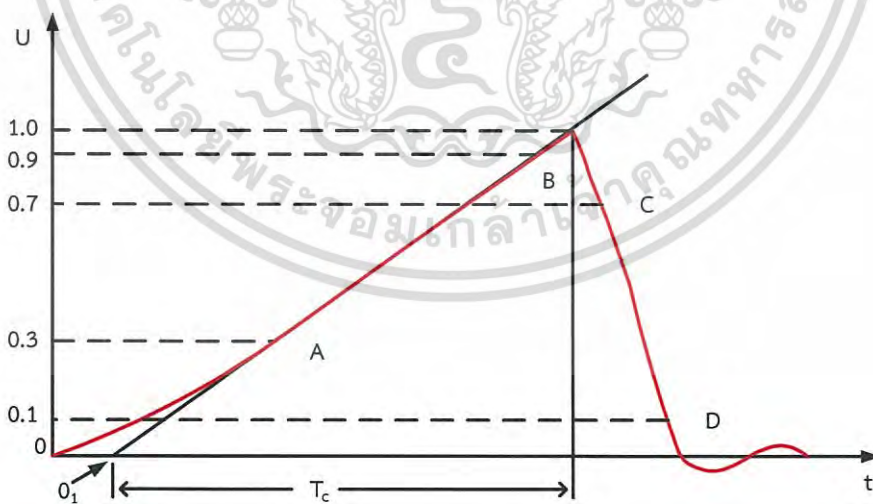


รูปที่ 2.2 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หลังคลื่น

เมื่อ T_1 คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น

T_c คือ ช่วงเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นเสมือนจนกระทั่งถึงเวลาของแรงดันที่ทำให้เกิด Chopping ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาหลังคลื่น

O_1 คือ จุดกำเนิดเสมือน

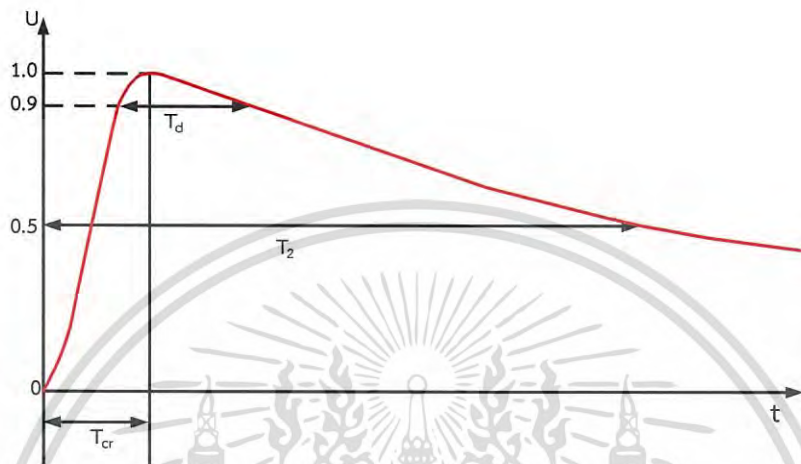


รูปที่ 2.3 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ T_C คือ ช่วงเวลาดังแต่จุดเริ่มต้นเสมือนจนกระทั่งถึงเวลาของแรงดันที่ทำให้เกิด Chopping ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาน้ำคลื่น

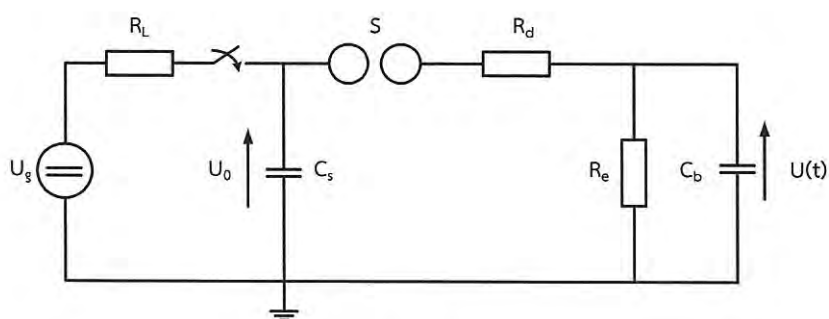
O_1 คือ จุดกำเนิดเสมือน



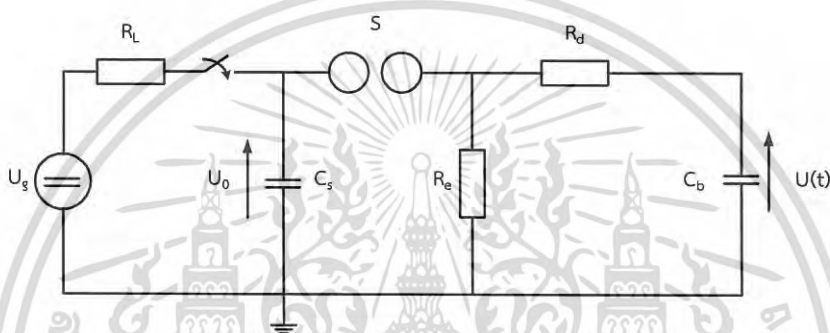
รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิทซ์ซิง

2.2 วงจรพื้นฐานของการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ [9]

การสร้างแรงดันอิมพัลส์จะอาศัยหลักการของวงจรสภาวะชั่วคราว RC [10] โดยการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการแล้วปล่อยให้คายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้มีรูปคลื่นตามต้องการได้ วงจรพื้นฐานที่นิยมใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วยองค์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 2.5



ก) วงจร A



ข) วงจร B

รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจร A และวงจร B

- U_s คือ แรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่าย
- U_0 คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง
- C_s คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- C_b คือ ตัวเก็บประจุโหลด (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องมือวัดและอื่นๆ)
- R_L คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
- R_d คือ ความต้านทานหน่วง
- R_e คือ ความต้านทานปล่อยประจุ
- $U(t)$ คือ แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
- S คือ สปรັกแกป

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจร คือ แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง U_s เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่เป็นตัวเก็บพลังงาน มีค่าแรงดันที่กำหนด U_0 การอัดประจุนี้จะผ่านความ

ด้านทาน R_L ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมเวลาและกระแสในการอัดประจุ ระยะห่างของสปาร์กแกป S จะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันที่เริ่มทำงานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่ายอดตามต้องการสปาร์กแกปจึงต้องทำงานร่วมกับไกสวิตช์ (Trigger) ที่มีลักษณะเป็นแกปช่วย (Auxiliary gap) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ C_s ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดสปาร์กในช่องสปาร์กแกปจะดำเนินไปด้วยความรวดเร็ว ในขณะที่เกิดสปาร์กที่สปาร์กแกป S แรงดันอัดประจุ U_0 จะตกคร่อม R_d และ C_b ประจุจะถ่ายเทไปยังวัสดุทดสอบ ซึ่งแทนด้วย C_b สำหรับเวลาในการปล่อยประจุจาก C_s ไปยัง C_b จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ R_d และ C_b ซึ่งนับเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายเทประจุให้ C_b จนกระทั่งแรงดันตกคร่อม C_s เท่ากับแรงดันที่ตกคร่อม C_b จะไม่มีการถ่ายเทประจุระหว่าง C_s กับ C_b จากนั้น C_s และ C_b จะทำการปล่อยประจุผ่าน R_e จึงกล่าวได้ว่า R_e ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหลังคลื่น T_2

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกจากปลายแรงสูง U จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ U_0 เพราะมีการถ่ายเทประจุระหว่าง C_s และ C_b ฉะนั้นอัตราส่วนของ U ต่อ U_0 จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ประสิทธิภาพของวงจรสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\eta = \frac{U}{U_0} \geq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (2.1)$$

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูง และให้ได้รับคลื่นตามมาตรฐานกำหนดควรเลือกให้ C_s มีค่าสูงกว่าโหลด C_b มากๆ โดยทั่วไปจะให้ $C_s \geq 10 C_b$

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด U_n (kV)
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด U_0 (kV)
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_s (μ F)
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด W_e (kJ)
- อัตราการดิสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่า หรือแบบสวิตซ์ซิ่ง

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้า C_s และแรงดันอัดประจุ U_0 ซึ่งค่าพลังงานคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \times 10^{-3} \text{ kJ} \quad (2.2)$$

- เมื่อ W คือ พลังงานอัดประจุเป็น kJ
 C_s คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็น μF
 U_0 คือ แรงดันอัดประจุเป็น kV

2.3 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ [9]

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วย องค์ประกอบดังนี้

1. ตัวเก็บประจุมพัลส์ (C_s)
2. ตัวเก็บประจุโหลด (C_b)
3. ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L)
4. ความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d)
5. ความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e)
6. สปาร์กแกปและไกสวิตช์

2.3.1 ตัวเก็บประจุมพัลส์ (C_s) ตัวเก็บประจุมพัลส์ทำหน้าที่เก็บพลังงานไว้ในรูปสนามไฟฟ้า โดยการอัดประจุด้วยแรงดันสูงกระแสตรง แล้วคายพลังงานออกไปอย่างรวดเร็ว ตัวเก็บประจุมพัลส์จึงต้องเป็นประเภทที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันที่สร้างขึ้นไม่เกิดการแกว่ง (Oscillation)

ค่าความจุไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ($1.2/50 \mu\text{s}$) ได้ โดยปกติค่าตัวเก็บประจุ (C_s) จะต้องมีค่ามากกว่าค่าตัวเก็บประจุโหลด (C_b) อย่างน้อย 10 เท่า นั่นคือ

$$C_s \geq 10C_b \quad (2.3)$$

2.3.2 ตัวเก็บประจุโหลด (C_b) ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโหลด (C_b) หมายถึง ผลรวมของความจุไฟฟ้าของวัสดุ และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ปลอกฉนวนนำสายหม้อแปลง วัตต์แรงดันและกระแส โวลเตจดีไวเดอร์ รวมกับตัวเก็บประจุที่ต่อเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อปรับรูปคลื่นให้ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งตัวเก็บประจุโหลด (C_b) มีส่วนสำคัญในการปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

กับช่วงเวลาหน้าคลื่น แต่จะมีผลน้อยต่อช่วงเวลาหลังคลื่น คุณสมบัติของตัวเก็บประจุไหลจะต้องมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่าค่าแรงดันทดสอบของวัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบ และควรมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s)

2.3.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะมีการกำหนดความถี่ของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไว้ เช่น 3 ครั้งต่อนาทีเพราะการใช้เครื่องกำเนิดให้ทำการคายประจุ และอัดประจุด้วยอัตราเร็วมากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสียต่อองค์ประกอบต่างๆ เช่น วงจรเรียงกระแส (ไดโอดแรงสูง และตัวเก็บประจุรอกกระแส) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ และความต้านทานปรับรูปคลื่น เป็นต้น เพราะว่าการคายประจุจะเป็นแบบสภาวะทรานเซียนต์ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสอย่างรวดเร็ว นั่นก็คือการเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของสนามไฟฟ้า ซึ่งมีผลกระทบต่อการฉนวนของอุปกรณ์ในวงจรของเครื่องกำเนิดในด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า หรือความเครียดสนามไฟฟ้าอันจะทำให้อายุการใช้งานขององค์ประกอบสั้นลงหากใช้งานอย่างต่อเนื่อง ฉะนั้นจึงต้องไม่ให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ทำการอัดประจุหรือคายประจุมากเกินไป ซึ่งการจำกัดอัตราการอัดประจุอาจทำได้โดยใช้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ซึ่งจะต่ออนุกรมคั่นอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) เพื่อให้กระแสอัดประจุมีค่าไม่เกินค่าพิกัดกระแสของแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง (i) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มแรงดันอัดประจุ du/dt จะต้องไม่ควรเร็วเกินไป ดังนั้นค่ากระแสอัดประจุจึงเขียนได้ตามสมการที่ 2.4

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (2.4)$$

นอกจากนี้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ต้องมีความคงทนต่อแรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ได้ เพราะความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) จะต้องรับแรงดันเท่ากับพิกัดของแรงดันอัดประจุเมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุเต็ม นอกจากการพิจารณาเลือกค่าความต้านทานและความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์แล้วยังต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ ที่มีค่าสูงพอ เมื่อต้องรับกระแสอัดประจุตลอดเวลาที่อัดประจุได้

2.3.4 ความต้านทานปรับรูปคลื่น ความต้านทานปรับรูปคลื่นในที่นี้หมายถึงความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) และความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e) ที่แสดงดังไว้ในรูปที่ 2.5 ซึ่งความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) จะมีผลต่อเวลาหน้าคลื่น T_1 กล่าวคือ T_1 จะแปรตามค่าความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) และเช่นเดียวกันความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e) มีผลต่อเวลาหลังคลื่น T_2 กล่าวคือ T_2 จะแปรตามค่าความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e)

คุณสมบัติของความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) และความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e) จะต้องสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานจากการดิสชาร์จในสภาวะทรานเซียนต์ได้ โดยไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนเกินไปตลอดช่วงเวลาทำงาน โดยทั่วไปมักจะใช้ความต้านทานที่ทำด้วยเส้นลวดความต้านทาน โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอาจคำนวณได้จากสมการของพลังงานที่ผ่านความต้านทาน ดังสมการที่ 2.5

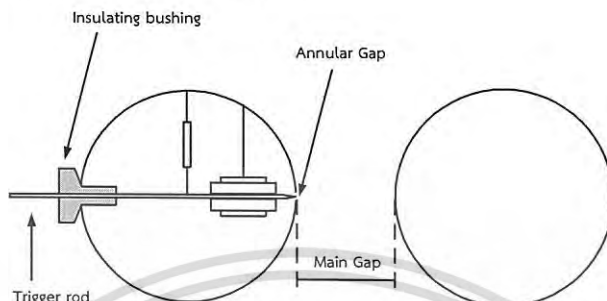
$$W = mc \Delta T \quad (2.5)$$

เมื่อ	W	คือ พลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทาน (kJ)
	m	คือ มวลของเส้นลวดที่ประกอบเป็นความต้านทาน (kg)
	c	คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg.K)
	ΔT	คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}\text{C}$)

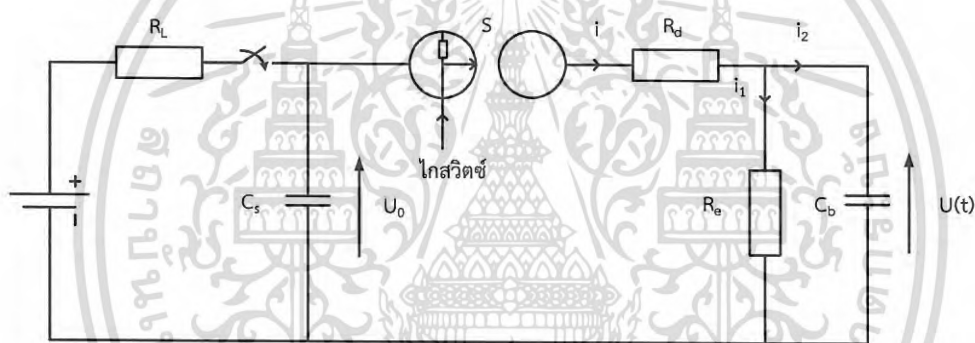
สิ่งสำคัญประการหนึ่งของการสร้างความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) และความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e) ก็คือจะต้องเป็นความต้านทานปลอดภัยหรือมีแต่น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

2.3.5 สปาร์กแกปและไกสวิตช์ แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบหรือการศึกษาวิจัยจะต้องสามารถสร้างให้มีขนาดเท่าเดิมก็ครั้งก็ได้ ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [1] ได้กำหนดให้มีค่าคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน $\pm 3\%$ การควบคุมให้ขนาดแรงดันเท่าเดิมดังกล่าวนี้ทำได้โดยการใช้พัลส์ไกสวิตช์บังคับให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เริ่มต้นปล่อยประจุที่แรงดันอัดประจุที่กำหนด พัลส์ไกสวิตช์จะเป็นตัวทำให้เกิดการสปาร์กที่แกปช่วย (auxiliary gap) ซึ่งเป็นแกปแคบๆ ขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร อยู่ที่ด้านหนึ่งของสปาร์กแกปคู่แรกของเครื่องกำเนิดดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 แกปช่วยนี้จะ เป็นสัญญาณพัลส์ทำให้เกิดสปาร์กขึ้นในแกปช่วยก่อน ผลของการเกิดสปาร์กในแกปช่วยนี้ทำให้เกิดการไอออไนเซชันของอากาศและเกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นระหว่างสปาร์กแกปคู่แรก และเกิดการปล่อยประจุที่สปาร์กแกปคู่นั้น เป็นผลให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวแรกต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวที่สอง และเกิดสปาร์กที่แกปถัดไปเป็นลำดับจนถึงแกปคู่สุดท้ายหรือคู่บนสุดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และเป็นการเริ่มต้นคายพลังงานให้กับตัวเก็บประจุโหลด ซึ่งจะได้แรงดันอิมพัลส์ตามที่ต้องการ ฉะนั้นการใช้ไกสวิตช์ช่วยเริ่มต้นจุดสปาร์กจึงทำให้สามารถกำหนดแรงดันคายประจุได้อย่างแม่นยำ

สัญญาณพัลส์ที่ใช้สำหรับทำให้เกิดสปาร์กในแก๊ปช่วยนั้น โดยทั่วไปจะใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ความเร็วสูงร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์สร้างพัลส์ โดยแรงดันของพัลส์นี้มีค่าประมาณ 5 - 10 kV และจะต้องทำให้เกิดสปาร์กแก๊ปภายในเวลา 10 - 100 ns



รูปที่ 2.6 อิเล็กโทรดสปาร์กแก๊ป

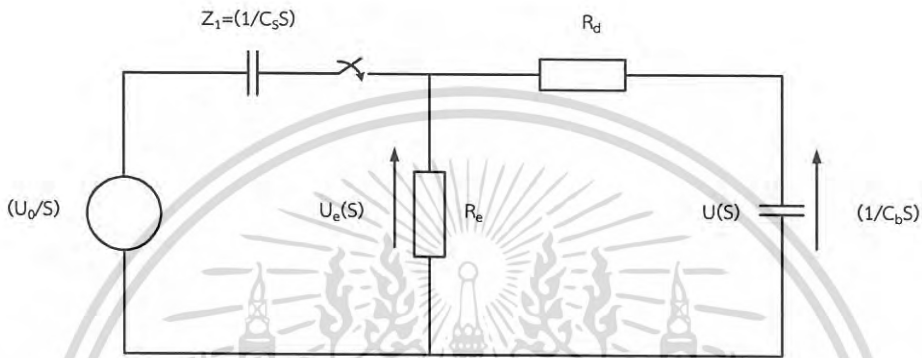


รูปที่ 2.7 สปาร์กแก๊ปมีไทรสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์ [9]

2.4.1 การแปรของแรงดันในเทอมของเวลา อาศัยการวิเคราะห์จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์ เช่น วงจรพื้นฐาน B ในรูปที่ 2.5 ข) เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ด้วยแรงดันอัดประจุ (U_0) และเกิดสปาร์กที่สปาร์กแก๊ป S จะทำให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ต่อกับวงจรปรับรูปคลื่นการวิเคราะห์ที่ใช้ Laplace transform เขียนวงจรสร้างแรงดันได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สلابลาซทรานฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน

จากวงจรในรูปที่ 2.8 ค่าแรงดันตกคร่อม R_e จะเขียนได้ดังสมการที่ 2.6

$$U_e(s) = \frac{U_0}{S} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{2.6}$$

เมื่อ

$$Z_1 = \frac{1}{C_s S} \tag{2.7}$$

$$Z_2 = \frac{R_e \left(R_d + \frac{1}{C_b S} \right)}{R_e + R_d + \frac{1}{C_b S}} \tag{2.8}$$

นำสมการ (2.7) และ (2.8) แทนลงใน (2.6)

ฉะนั้น

$$U_e(s) = \frac{U_0(R_d R_e C_s C_b S + R_e C_s)}{R_d C_b S + R_e C_b S + R_e C_s S + R_d R_e C_s C_b S^2} \quad (2.9)$$

แรงดันที่จ่ายออกจากโหนดคิดจาก $U_e(s)$ ตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์จะได้

$$U(s) = \frac{U_e(s) \frac{1}{C_b S}}{R_d + \frac{1}{C_b S}} = \frac{U_e(s)}{R_d C_b S + 1}$$

แทน $U_e(s)$ ด้วยสมการ (2.9)

$$U(s) = \frac{U_0 R_e C_s}{R_d R_e C_s C_b S^2 + (R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s) S + 1}$$

$$U(s) = \frac{U_0}{R_d C_b S^2 + \frac{(R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s) S}{R_d R_e C_s C_b} + \frac{1}{R_d R_e C_s C_b}}$$

ซึ่งอาจเขียนได้ในภาพแบบง่าย ๆ คือ

$$U(s) = \frac{U_0}{K} \frac{1}{S^2 + B_1 S + B_0} \quad (2.10)$$

$$= \frac{U_0}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[\frac{1}{(S - \alpha_1)} - \frac{1}{(S - \alpha_2)} \right]$$

เมื่อกำหนดให้

$$B_1 = \frac{R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_s C_b} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B_0 = \frac{1}{R_d R_e C_s C_b} \quad (2.12)$$

$$K = R_d C_b \quad (2.13)$$

α_1, α_2 เป็นค่ารากที่สองของสมการ $S^2 + B_1 S + B_0 = 0$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4B_0}}{2} \quad (2.14)$$

จึงเขียนค่าแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลาได้ดังนี้

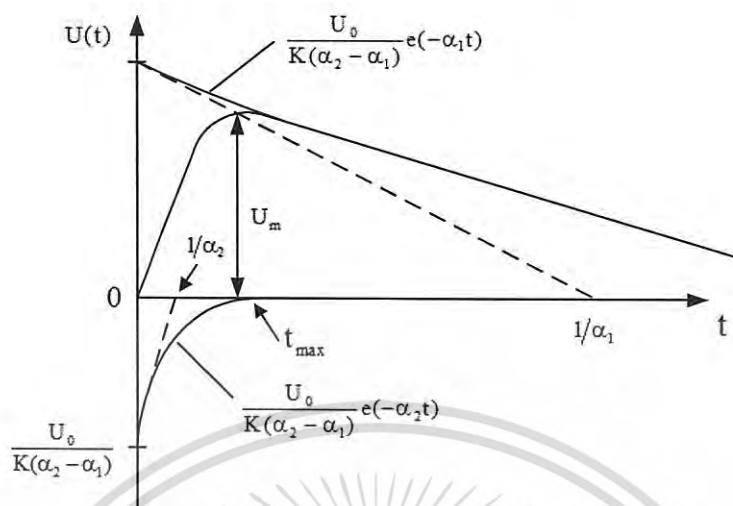
$$U(t) = \frac{U_0}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left\{ e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t} \right\} \quad (2.15)$$

ค่าองค์ประกอบของ B_1 , B_0 และ K สำหรับวงจร A และ วงจร B แสดงไว้ในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าองค์ประกอบของ B_1 , B_0 และ K สำหรับวงจร A และ วงจร B

	B_1	B_0	K
วงจร A	$\frac{R_d C_s + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_s C_b}$	$\frac{1}{R_d R_e C_b C_s}$	$R_d C_b$
วงจร B	$\frac{R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s}{R_d R_e C_s C_b}$	$\frac{1}{R_d R_e C_b C_s}$	$R_d C_b$

จากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของเวลา ประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลา (Time constant) เท่ากับ $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม

ตามนิยามของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานที่กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่นและหลังคลื่น T_1 และ T_2 ตามลำดับ มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1 / T_2 อันเป็นตัวแสดงถึงภาพลักษณะของรูปคลื่น ค่า T_1 และ T_2 อาจหาได้ดังนี้

$$T_1 = k_2 / \alpha_2 \quad (2.16)$$

$$T_2 = k_1 / \alpha_1 \quad (2.17)$$

กรณีของรูปคลื่น 1.2/50 μs ค่าคงตัวจะมีค่า

$$k_1 = 0.73, \quad k_2 = 2.96$$

$$1/\alpha_1 = 68.5, \quad 1/\alpha_2 = 0.405$$

2.4.2 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร การสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นใด กำหนดด้วยค่า T_1 และ T_2 ปกติเราจะเริ่มต้นมาจากค่าความจุไฟฟ้าของโหลด (C_b) ก่อนและเลือกตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ให้สอดคล้องกับตัวเก็บประจุโหลด (C_b) กล่าวคือตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) เป็นตัวเก็บพลังงานได้มากพอที่จะจ่ายถ่ายเทให้กับโหลด ดังนั้นเมื่อทราบค่าตัวเก็บประจุโหลด (C_b) และตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) แล้ว องค์ประกอบที่เหลือต้องคำนวณ คือ ความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_b) และความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_s) ซึ่งอาจหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงตัวเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_1, \alpha_2 = \sqrt{\frac{B_1}{2} \pm \left(\frac{B_1}{2}\right)^2 - B_0}$$

จะได้

$$\alpha_1 + \alpha_2 = B_1$$

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 = B_0$$

จากค่า B_1 และ B_0 คำนวณหาค่า R_d และ R_e ได้ตามสมการที่ 2.18 ถึงสมการที่ 2.21

วงจรร A

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_b}} \right\} \quad (2.18)$$

$$R_d = \frac{1}{2C_s} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_b}} \right\} \quad (2.19)$$

วงจรร B

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_s}} \right\} \quad (2.20)$$

$$R_d = \frac{1}{2C_b} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_s}} \right\} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

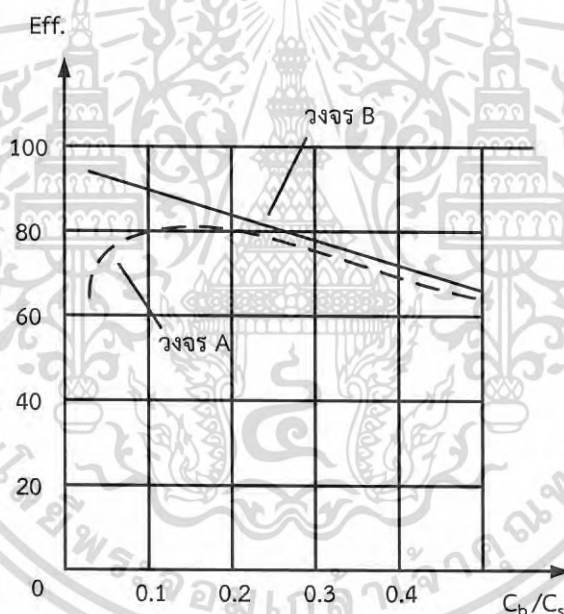
2.4.3 ประสิทธิภาพของวงจร (η) เมื่อก้าวถึงประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ หมายถึง อัตราส่วนค่ายอดของแรงดันที่สร้างขึ้นออกมาได้ ต่อค่าแรงดันอัดประจุปกติจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอทั้งวงจร A หรือวงจร B

$$\eta = U_m / U_0 < 1 \quad (2.22)$$

เมื่อ U_m คือ ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ $u(t)$

U_0 คือ แรงดันอัดประจุให้กับ C_s

ในกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ($1.2/50 \mu s$) ประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนระหว่าง C_b และ C_s มีค่าดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

2.4.4 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาลังคลื่น T_1 และ T_2 ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรอิมพัลส์ ถ้าจำเป็นต้องทราบค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงหลังคลื่น อาจคำนวณค่าโดยประมาณได้จากวิธีการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าองค์ประกอบเวลา T_1 , T_2 และประสิทธิภาพของวงจร A และ วงจร B

	วงจร A	วงจร B
T_1	$k_2 \frac{R_d R_e}{(R_d + R_e)} \cdot \frac{C_b C_s}{(C_b + C_s)}$	$k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s}$
T_2	$k_1 (R_d + R_e) (C_b + C_s)$	$k_1 R_e (C_b + C_s)$
η	$\frac{R_e C_s}{(R_d + R_e) (C_b + C_s)}$	$\frac{C_s}{C_b + C_s}$

การคำนวณที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ถือว่าวงจรที่ใช้คำนวณ ไม่มีค่าความเหนี่ยวนำในทางปฏิบัติ รูปคลื่นที่ได้มักจะแตกต่างไปจากทฤษฎี โดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและค่ายอดของแรงดัน ทั้งนี้ เนื่องจากในวงจรมีความเหนี่ยวนำซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ อาจทำให้เกิดการแกว่งบริเวณยอดคลื่นขึ้นได้ ดังนั้น ความต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d ต้องมีค่ามากกว่าวิกฤตของวงจร ดังสมการที่ 2.23

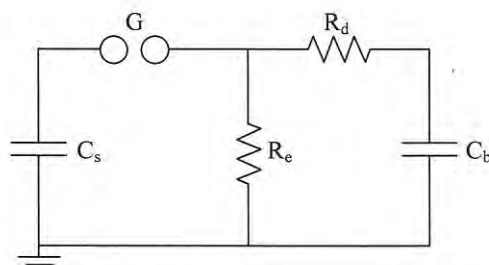
$$R_d \geq k \sqrt{\frac{L(C_s + C_b)}{C_s C_b}} \quad \text{โดย } k = 2 \text{ ถึง } 4 \quad (2.23)$$

ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ส่วนใหญ่จะเลือกใช้คircuit เครื่องกำเนิดแรงดันพื้นฐานแบบ B หรือวงจรแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าถูกสร้างขึ้นโดยวงจรมาร์ก (Marx's circuit) [10] ที่ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน (C_s) ตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ตัวต้านทานปรับหลังคลื่น (R_e) และตัวเก็บประจุโหลด (C_b) ซึ่งค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่นและตัวเก็บประจุโหลดจะควบคุมเวลาหน้าคลื่น (T_1) ส่วนค่าความต้านทานปรับหลังคลื่นและค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์จะควบคุมเวลาหลังคลื่น (T_2) โดยที่เวลาหน้าคลื่น และเวลาหลังคลื่นต้องสอดคล้องตามมาตรฐาน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25 ซึ่งวงจรถูกกล่าวว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ A

$$T_1 = k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (2.24)$$

$$T_2 = k_1 R_e (C_b + C_s) \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

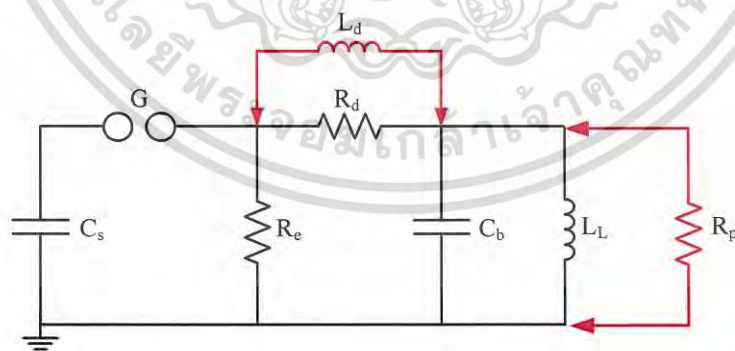


รูปที่ 2.11 วงจรพื้นฐานในการสร้างแรงดันอิมพัลส์

แต่วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พื้นฐานเมื่อทำการทดสอบกับโหลดชนิดตัวเหนี่ยวนำต่ำพบว่า วงจรกำเนิดแรงดันสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด โดยที่เวลาหลังคลื่นจะน้อยกว่า $40 \mu\text{s}$

2.5 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ

การสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำจะสร้างจากการพัฒนา วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พื้นฐานเดิม ซึ่งเกลนิงเกอร์ (Glaninger) [3],[4] ได้แนะนำให้เพิ่มค่า องค์ประกอบทางไฟฟ้า คือ เพิ่มตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) และเพิ่มตัว ต้านทานขนานวัตถุทดสอบ (R_p) ดังที่ได้มีการแสดงไว้ในรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นวงจรที่ถูกพัฒนาเพื่อให้สร้าง แรงดันอิมพัลส์ที่สามารถทดสอบกับโหลดชนิดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ โดยที่วงจรเกลนิงเกอร์ ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน (C_s) ตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ตัวต้านทานปรับหลังคลื่น (R_e) ตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (L_d) และตัวต้านทานขนาดโหลดทดสอบ (R_p)



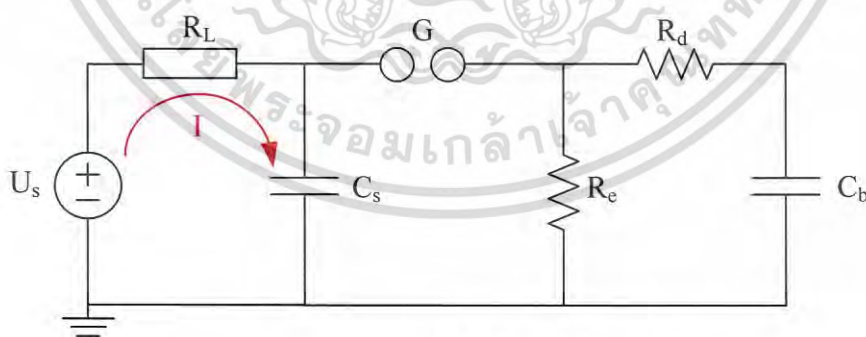
รูปที่ 2.12 วงจรของเกลนิงเกอร์ (Glaninger's circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

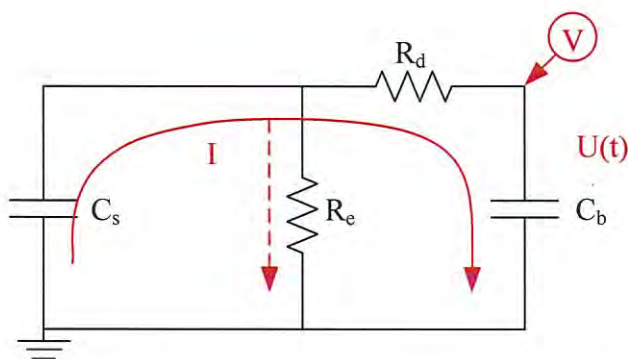
สาเหตุของช่วงเวลาหลังคลื่นที่สั้นกว่าปกติเกิดจากการทดสอบวัตถุทดสอบที่มีค่าความเหนียวนำต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการแกว่งของแรงดันเนื่องจากค่าความเหนียวนำของวัตถุทดสอบ เพื่อให้เวลาหลังคลื่นยาวขึ้นทำการต่อตัวเหนียวนำ (L_d) เข้ากับวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์โดยต่อขนานกับตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ซึ่งอยู่ในส่วนของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์โดยแสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งตัวเหนียวนำที่ต่อเข้ามานั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำในช่วงเวลาหลังคลื่นเนื่องจากอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ ทำหน้าที่ปล่อยประจุให้ไหลผ่านตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นได้ดียิ่งขึ้น ทำให้เวลาหลังคลื่นมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามการแกว่งของแรงดันนี้อาจทำให้เกิดยอดกลับหัว (Under shoot) ซึ่งบางกรณีอาจมีค่าเกิน 50% ของค่ายอดแรงดันอิมพัลส์และไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด จึงต้องปรับค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่นเพื่อทำให้แรงดันคายยอดกลับหัวลดลง และต่อตัวต้านทานขนานกับวัตถุทดสอบ (R_p) เพื่อลดการเกิดส่วนพุ่งเกิน (Over shoot) ให้มีค่าลดลงโดยการเลือกค่าองค์ประกอบที่เหมาะสม

2.6 ความสัมพันธ์ของช่วงเวลาและรูปคลื่นแรงดัน

การสร้างรูปคลื่นแรงดันในตัวเก็บประจุโดยใช้แหล่งจ่ายอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแสจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ จะทำให้เกิดทิศทางการไหลของกระแสดังแสดงในรูปที่ 2.13 เมื่อได้ค่าแรงดันที่ต้องการในตัวเก็บประจุแล้วทำการปลดแหล่งจ่ายแรงดันออกจากวงจร และสั่งให้สปรักแกปทำงาน แรงดันที่ถูกอัดประจุอยู่ในตัวเก็บประจุจะมีการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุอัดแรงดันผ่านตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ไปยังตัวเก็บประจุไหลต (C_b) จนเต็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งส่งผลให้มีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไหลต



รูปที่ 2.13 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ทำการชาร์จตัวเก็บประจุอัดประจุ



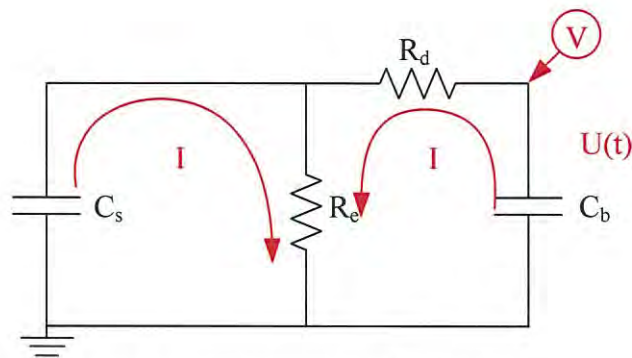
รูปที่ 2.14 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อสปาร์กแกปทำงาน

เมื่อทำการวัดค่าแรงดันที่แปรผันตามเวลาจะได้รูปคลื่นแรงดันดังรูปที่ 2.15 ซึ่งค่าเวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุโพลิตจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานหน้าคลื่นและค่าของตัวเก็บประจุโพลิต และจะใช้เวลานานกว่าประจุไฟฟ้าจะเต็มตัวเก็บประจุโพลิต ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวจะเป็นช่วงเวลาหน้าคลื่น

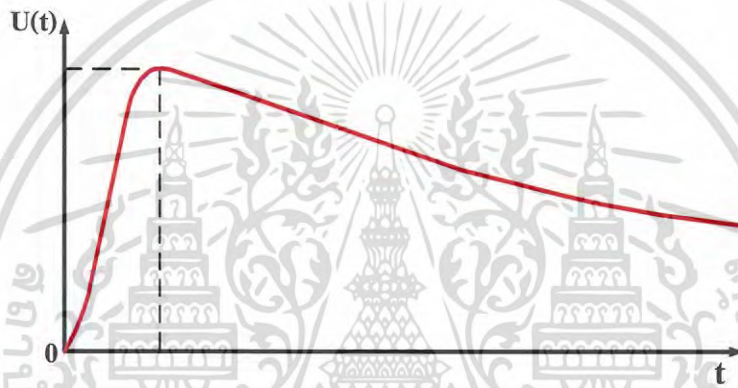


รูปที่ 2.15 ค่าแรงดันที่ตกคร่อมโพลิตที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

เมื่อตัวเก็บประจุโพลิตมีประจุเต็ม ประจุที่เหลือจะไหลผ่านตัวต้านทานหลังคลื่นลงสู่กราวด์ และเมื่อแรงดันที่ตัวเก็บประจุโพลิตต่ำลงประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุโพลิตก็จะไหลกลับผ่านตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นลงกราวด์ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามเวลาและเกิดช่วงเวลาหลังคลื่นของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.17

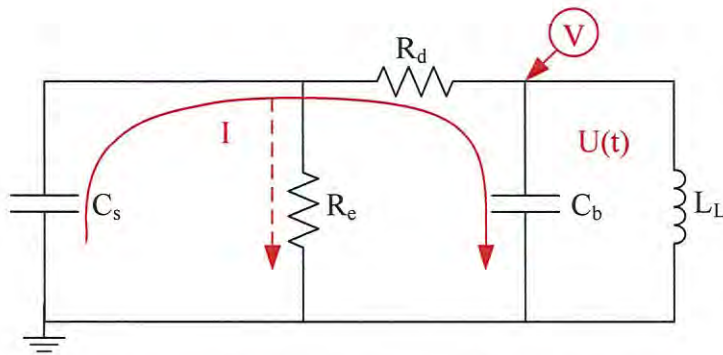


รูปที่ 2.16 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อตัวเก็บประจุโหลดคายประจุไฟฟ้า



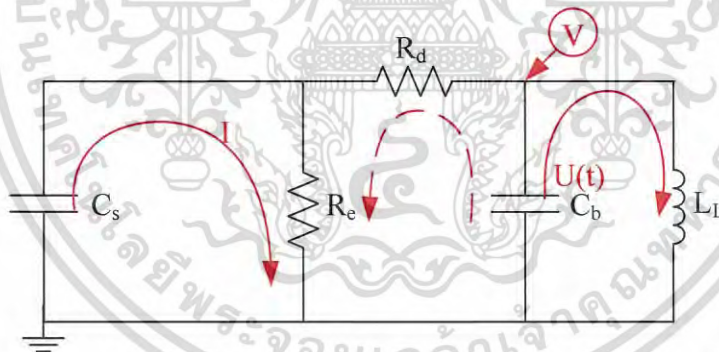
รูปที่ 2.17 ค่าแรงดันที่ตกคร่อมโหลดที่แปรเปลี่ยนตามเวลาช่วงท้าย
เมื่อตัวเก็บประจุโหลดคายประจุไฟฟ้า

ในการทดสอบกับโหลดชนิดค่าความเหนี่ยวนำ ในช่วงแรกค่าแรงดันจะมีการแปรเปลี่ยนตามเวลา เหมือนกับโหลดชนิดตัวเก็บประจุ คือ เมื่อสปรักแกปทำงานแรงดันที่ถูกอัดประจุอยู่ในตัวเก็บประจุจะมีการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุอัดแรงดันผ่านตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ไปยังตัวเก็บประจุโหลด (C_b) จนเต็ม และตัวเหนี่ยวนำโหลดที่ต่อขนานอยู่เปรียบเหมือนปลดวงจรอยู่เนื่องจากช่วงเวลาหน้าคลื่นจะมีความถี่ที่สูง ซึ่งทิศทางการไหลของกระแสแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุโหลด



รูปที่ 2.18 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อสปาร์กแกปทำงาน

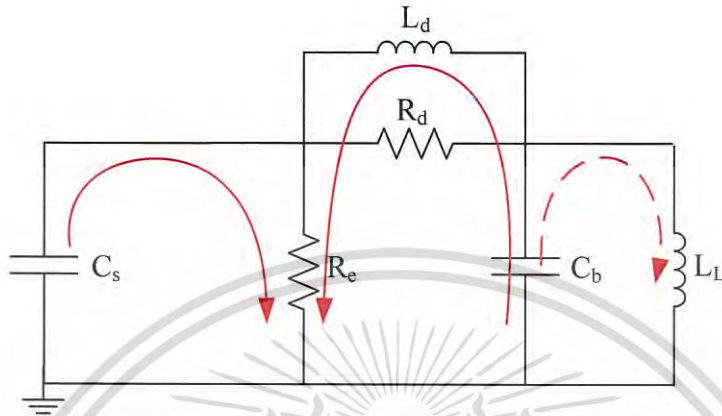
เมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุโหลดเต็มแล้ว ประจุไฟฟ้าที่เหลือจะไหลผ่านตัวต้านทานปรับหลังคลื่น เมื่อแรงดันที่ตัวเก็บประจุโหลดลดต่ำลงประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุโหลดจะคายผ่านตัวเหนี่ยวนำในโหลดแทน เนื่องจากที่ความถี่ต่ำจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลสามารถไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ง่ายกว่าที่จะไหลผ่านตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นไปยังตัวต้านทานปรับหลังคลื่นแล้วลงสู่กราวด์ ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงหลังคลื่นลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงทิศทางการไหลของกระแสในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

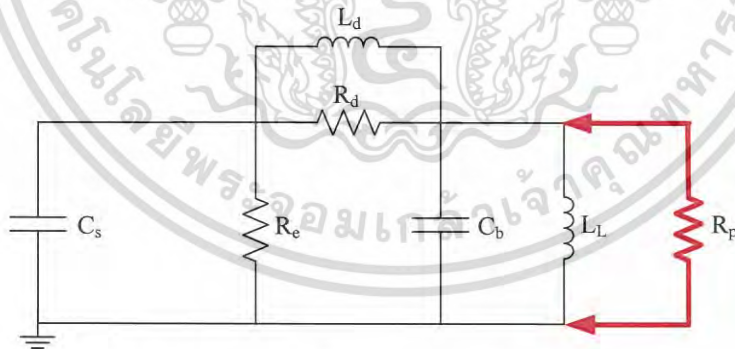
เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโหลดจะส่งผลให้ช่วงเวลาหลังคลื่นมีค่าลดลง เพื่อทำให้มีเวลาหลังคลื่นมากขึ้นจึงจำเป็นต้องให้มีการคายประจุไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานปรับหลังคลื่น โดยการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น ซึ่งการต่อตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นจะส่งผลให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุโหลดไหลผ่านตัวต้านทานปรับหลังคลื่นได้ง่ายขึ้น และสามารถ

ปรับช่วงเวลาล้างคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.20 แต่การต่อตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นจะส่งผลให้ค่ายอดของแรงดันมีการเปลี่ยนแปลง และเกิดค่ายอดแรงดันกลับซ้ำเกิดขึ้น



รูปที่ 2.20 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อเพิ่มตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น

วิธีการแก้ปัญหาค่ายอดของแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงทำได้โดยการเพิ่มตัวต้านทานขนานโหลด เพื่อให้ค่ายอดของแรงดันมีค่าตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 และเพื่อแก้ปัญหาค่ายอดแรงดันกลับซ้ำจึงต้องมีการปรับค่าความต้านทานหลังคลื่นให้เหมาะสมเมื่อทำให้เกิดค่ายอดกลับซ้ำไม่เกิน 50% ของค่าแรงดันยอดสูงสุด ตามที่มีการระบุไว้ในมาตรฐาน [11],[12]



รูปที่ 2.21 การต่อตัวต้านทานขนานโหลดทดสอบเพื่อเปลี่ยนแปลงค่ายอดของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ข้อกำหนดรายละเอียดการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ (การไฟฟ้านครหลวง) [11]

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงที่ต่อเข้ากับระบบ 24 กิโลโวลต์ หรือ 12 กิโลโวลต์, 1 เฟส หรือ 3 เฟส, ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ต้องผ่านการทดสอบเฉพาะแบบ (Type test) โดยระบุงการทดสอบทั้งหมด 2 รายการคือ การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature rise test) และการทดสอบอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse test)

การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าต้องทดสอบทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ และหม้อแปลงต้องสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มของการไฟฟ้านครหลวง

แรงดันที่กำหนด (Voltage)	แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (kV, Peak)	แรงดันทนตามความถี่กำลังไฟฟ้า ในช่วงเวลาสั้นที่กำหนด (kV)
ไม่เกิน 1,100	30	10
3,600	40	10
7,200	60	20
24,000	125	50
12,000/24,000	125*	50

*หม้อแปลงต้องออกแบบให้สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าคลื่นเต็ม ทั้งการต่อขดลวดแบบ 12 และ 24 กิโลโวลต์ แต่การทดสอบที่โรงงานให้ทดสอบขณะต่อขดลวดแบบ 12 กิโลโวลต์ เท่านั้น

บทที่ 3

การหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า

3.1 คุณลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเมื่อทดสอบกับโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ

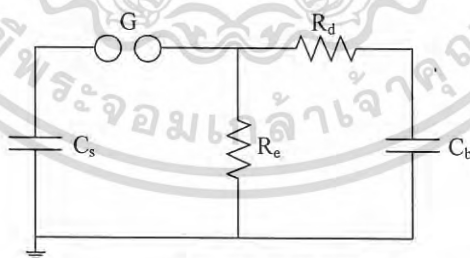
ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำการออกแบบต้องสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐานโดยมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC60060-1 (2010) [1] ร่วมกับ IEC60076-3 (2000) [12], IEC60076-4 (2002) [13]

กำหนดให้มีค่าองค์ประกอบรูปคลื่น ดังต่อไปนี้

เวลาหน้าคลื่น (Front time)	$1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$
เวลาหลังคลื่น (Time to half)	$50 \mu\text{s} \pm 20\%$
ส่วนพุ่งเกิน (Over shoot)	$\leq 5\%$
ยอดกลับซ้ำ (Under shoot)	$\leq 50\%$

3.2 วงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบดั้งเดิมเมื่อทดสอบกับโหลดค่าความเหนี่ยวนำ

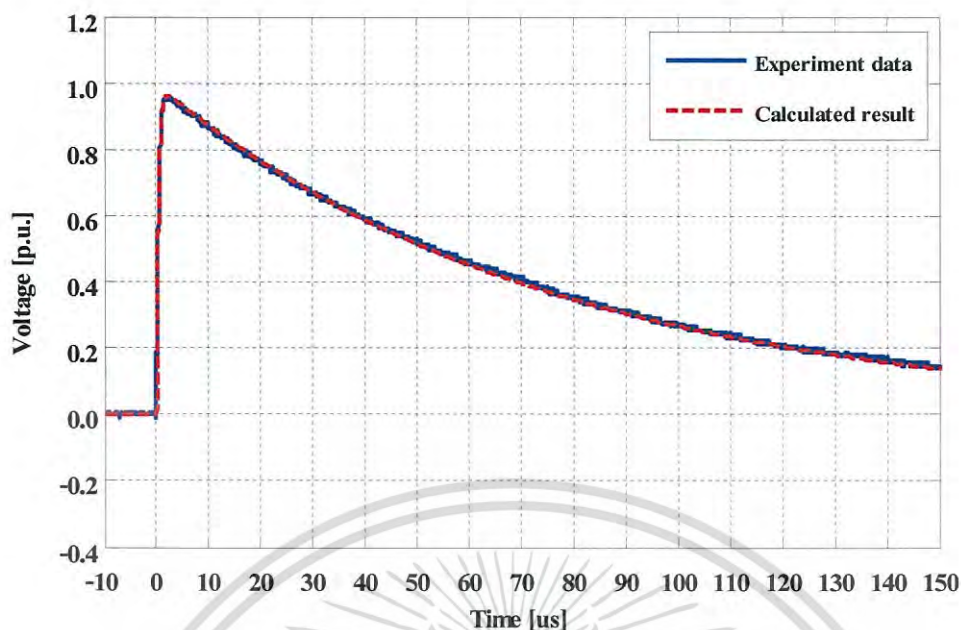
การสร้างแรงดันอิมพัลส์โดยใช้วงจรปกติ (marx's circuit) เพื่อให้ได้แรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานกำหนดโดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้างดตารางที่ 3.1 เมื่อโหลดทดสอบมีเฉพาะค่าความจุไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบปกติ

ตารางที่ 3.1 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติ

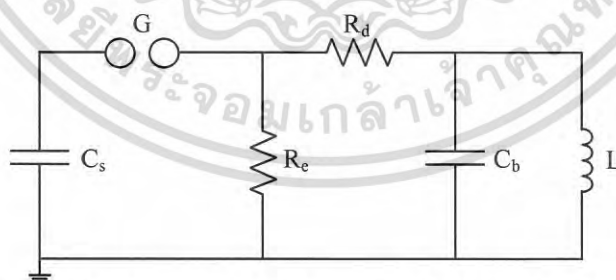
Charging capacitance (C_s) ; μF	Series resistance (R_d) ; Ω	Parallel resistance (R_e) ; Ω	Load capacitance (C_b) ; nF
1.0	57	75	8.4



รูปที่ 3.2 ผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติ

จากผลการทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า และการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้เวลาหน้าคลื่น $1.269 \mu\text{s}$ และเวลาหลังคลื่น $55.48 \mu\text{s}$ ซึ่งอยู่ในขอบเขตตามมาตรฐาน

เมื่อทดสอบวงจรอิมพัลส์เดิมกับโหลดที่มีความเหนี่ยวนำ โดยใช้ค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่มีค่า 3.164 mH มาทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นรูปวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบปกติเมื่อทดสอบกับโหลดที่มีความเหนี่ยวนำ

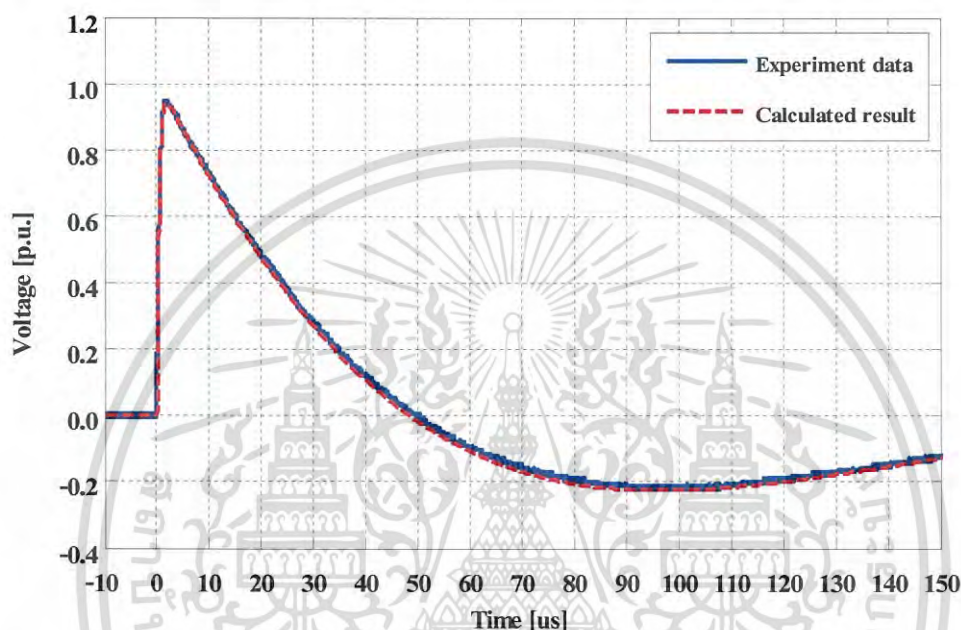


รูปที่ 3.3 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรในรูปที่ 3.3

Charging capacitance (C_s); μF	Series resistance (R_d); Ω	Parallel resistance (R_e); Ω	Load capacitance (C_b); nF	Load inductance (L); mH
1.0	57	75	8.4	3.164



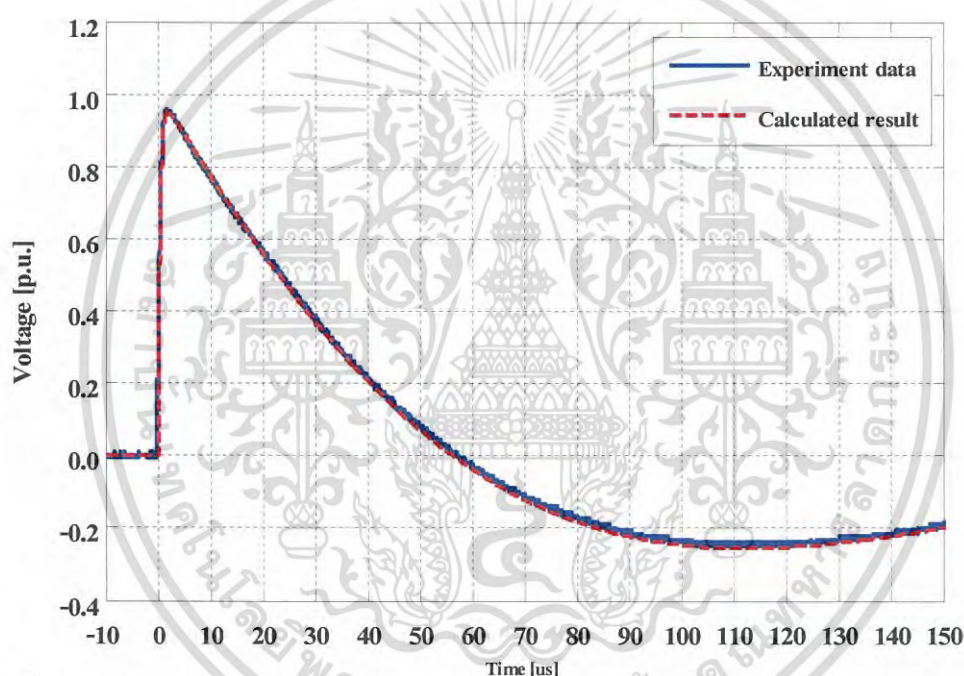
รูปที่ 3.4 ผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ

จากผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ตามค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในตารางที่ 3.2 และการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า วงจรดังกล่าวสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด มีค่าเวลา 1.186 μs แต่เวลาหลังคลื่นมีค่า 20.20 μs ซึ่งน้อยกว่า 40 μs ตามที่มาตรฐานกำหนด จึงทำการปรับรูปคลื่นโดยการเพิ่มค่าความต้านทานปรับหลังคลื่นให้มากขึ้น โดยให้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นในวงจรจะเพิ่มเป็นสองเท่าของค่าความต้านทานเดิม เพื่อให้ได้ค่าเวลาหลังคลื่นตามที่มาตรฐานกำหนด

การสร้างแรงดันอิมพัลส์โดยใช้วงจรปกติ (marx's circuit) โดยต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ และใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าดังตารางที่ 3.3 โดยเพิ่มค่าความต้านทานปล่อยประจุปรับหลังคลื่น เป็น 150 Ω

ตารางที่ 3.3 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจร

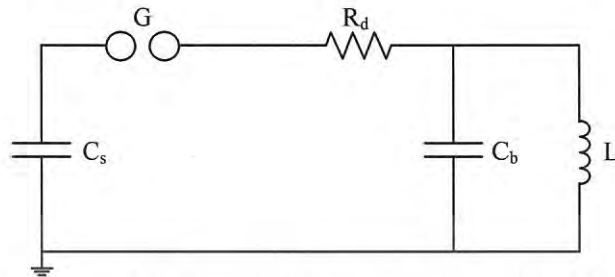
Charging capacitance (C_s); μF	Series resistance (R_d); Ω	Parallel resistance (R_e); Ω	Load capacitance (C_b); nF	Load inductance (L); mH
1.0	57	150	8.4	3.164



รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ

จากผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ตามค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในตารางที่ 3.3 และการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า วงจรดังกล่าวสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด มีค่าเวลา 1.219 μs แต่เวลาหลังคลื่นมีค่า 24.35 μs ซึ่งน้อยกว่า 40 μs ตามที่มาตรฐานกำหนดจึงทำการปรับรูปคลื่นโดยการเพิ่มค่าความต้านทานปรับหลังคลื่นให้มากที่สุด หรือปลดค่าความต้านทานหลังคลื่นออก เพื่อให้ค่าเวลาหลังคลื่นมีค่ามากที่สุด

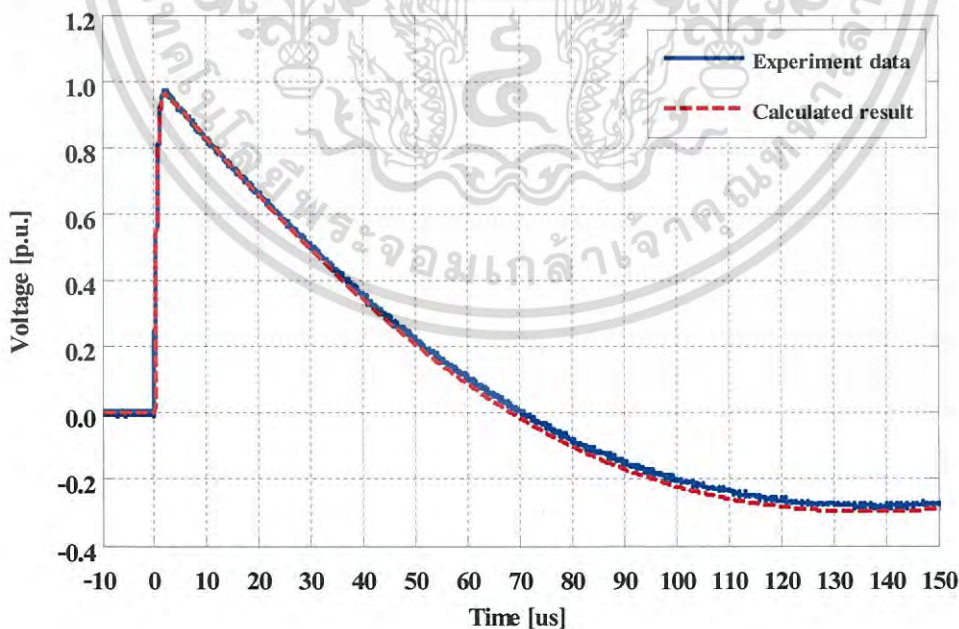
การสร้างแรงดันอิมพัลส์โดยใช้วงจรปกติ (marx's circuit) โดยต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ และใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าดังตารางที่ 3.4 โดยปลดความต้านทานปล่อยประจุปรับหลังคลื่น ออกดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ที่ปลดตัวต้านทาน ปล่อยประจุปรับหลังคลื่นออก

ตารางที่ 3.4 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรในรูปที่ 3.6

Charging capacitance (C_s); μF	Series resistance (R_d); Ω	Parallel resistance (R_e); Ω	Load capacitance (C_b); nF	Load inductance (L); mH
1.0	57	-	8.4	3.164

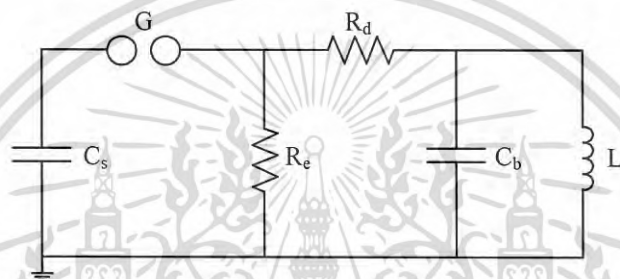


รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ที่ปลดตัวต้านทานปล่อยประจุปรับหลังคลื่นออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ตามค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในตารางที่ 3.4 และการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า วงจรดังกล่าวสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด มีค่าเวลา 1.253 μs แต่เวลาหลังคลื่นมีค่า 30.86 μs ซึ่งน้อยกว่า 40 μs ตามที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นจึง เปลี่ยนวิธีการปรับค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า โดยการปรับค่าความจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์

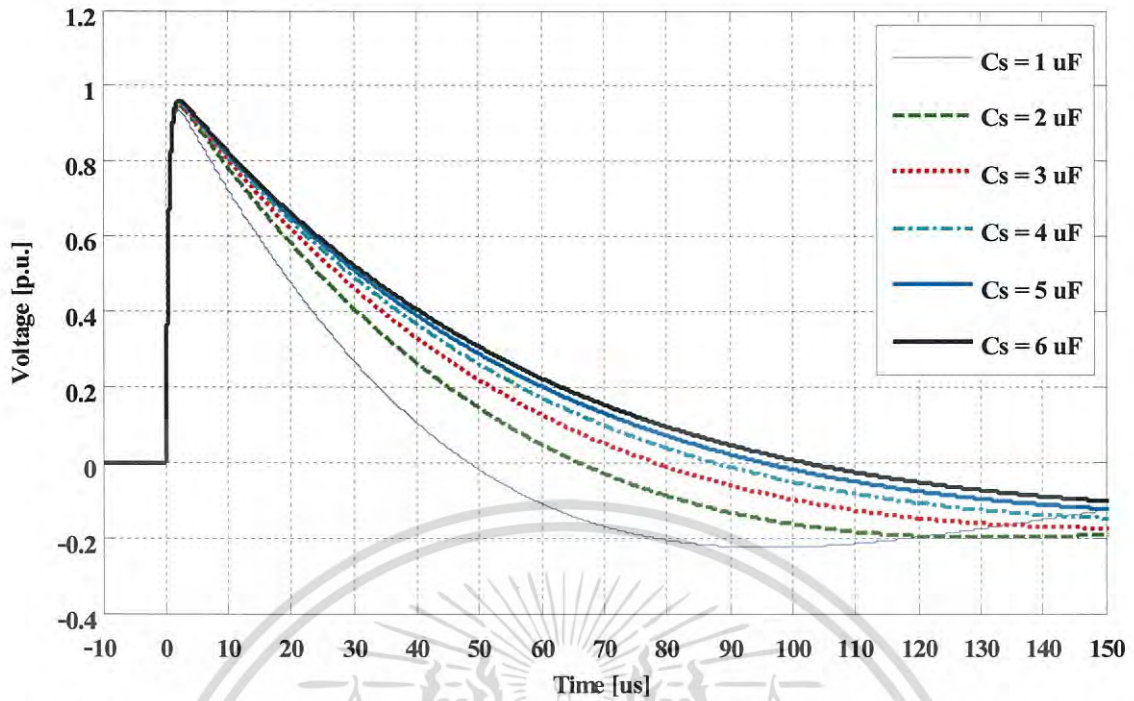
เมื่อทดสอบวงจรอิมพัลส์เดิมกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ โดยใช้ค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่มีค่า 3.164 mH มาทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นรูปวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบปกติเมื่อทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ และมีการปรับรูปคลื่นโดยการเพิ่มค่าความจุของตัวเก็บประจุอัดแรงดันให้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 6 กรณีในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.8 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 3.5 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรในรูปที่ 3.8

Case	Charging capacitance (C_s); μF	Series resistance (R_d); Ω	Parallel resistance (R_e); Ω	Load capacitance (C_b); nF	Load inductance (L); mH
1	1.0	57	75	8.4	3.164
2	2.0				
3	3.0				
4	4.0				
5	5.0				
6	6.0				



รูปที่ 3.9 ผลการทดสอบวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบปกติที่ต่อโหลดค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่มีการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุอัดประจุ

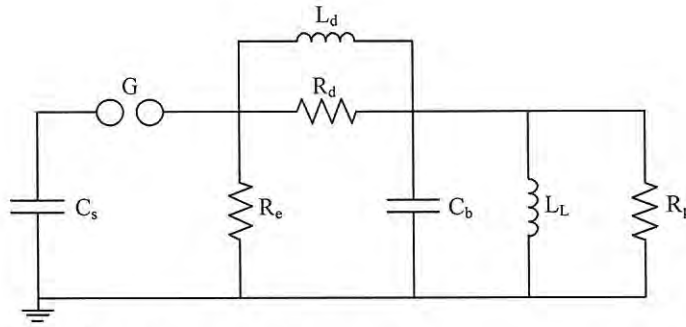
จากผลการทดลองโดยการเพิ่มค่าความจุตัวเก็บประจุอัดประจุจะสรุปได้ว่าในบางกรณีที่โหลดความเหนี่ยวนำมีค่าต่ำมากๆ การเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอัดประจุก็ไม่สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ตรงตามมาตรฐานกำหนดได้ ในการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุให้มากขึ้นนั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มค่าเวลาหลังคลื่นได้แต่ยังไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุด เพราะการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์นั้นจะทำให้เครื่องกำเนิดแรงดันที่สร้างนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น

ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถใช้วงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์แบบดั้งเดิมทดสอบโหลดค่าความเหนี่ยวนำที่ต่ำมากๆได้เนื่องจากไม่สามารถปรับรูปคลื่นจากวงจรทดสอบได้ จึงต้องมีการปรับวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์เพื่อให้สามารถทดสอบกับอุปกรณ์หรือโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำได้

3.3 วงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยการนำเสนอของเกลนิงเกอร์

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า เมื่อมีวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน เกลนิงเกอร์ (Glaninger) [3], [4] ได้แนะนำให้เพิ่มค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า คือ เพิ่มตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) และเพิ่มตัวต้านทานขนานวัดทดสอบ (R_p) ดังที่ได้มีการแสดงไว้ในรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นวงจรที่ถูกพัฒนาเพื่อให้สร้างแรงดันอิมพัลส์ที่สามารถทดสอบกับโหลดชนิดค่าความเหนี่ยวนำต่ำ โดยที่วงจรเกลนิงเกอร์ ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน (C_s) ตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ตัวต้านทานปรับหลังคลื่น (R_e) ตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (L_d) และตัวต้านทานขนาดโหลดทดสอบ (R_p)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วงจรของกลานิงเกอร์ (Glaninger's circuit)

สาเหตุของช่วงเวลาหลังคลื่นที่สั้นกว่าปกติเกิดจากการทดสอบวัตถุทดสอบที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการแกว่งของแรงดันเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของวัตถุทดสอบ เพื่อให้เวลาหลังคลื่นยาวขึ้นทำการต่อตัวเหนี่ยวนำ (L_d) เข้ากับวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์โดยต่อขนานกับตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ซึ่งอยู่ในส่วนของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์โดยแสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งตัวเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ามานั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำในช่วงเวลาหลังคลื่นเนื่องจากอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ ทำหน้าที่ปล่อยประจุให้ไหลผ่านตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นได้ดียิ่งขึ้น ทำให้เวลาหลังคลื่นมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามการแกว่งของแรงดันนี้อาจทำให้เกิดยอดกลับหัว (Under shoot) ซึ่งบางกรณีอาจมีค่าเกิน 50% ของค่ายอดแรงดันอิมพัลส์และไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด [12],[13] จึงต้องปรับค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่นเพื่อให้แรงดันค่ายอดกลับหัวลดลง และต่อตัวต้านทานขนานกับวัตถุทดสอบ (R_p) เพื่อลดการเกิดส่วนพุ่งเกิน (Over shoot) ให้มีค่าลดลง โดยการเลือกค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าเป็นไปตามสมการที่ 3.1 ถึง 3.4 [4]

$$C_s \approx \frac{T^2}{L_L} \quad (3.1)$$

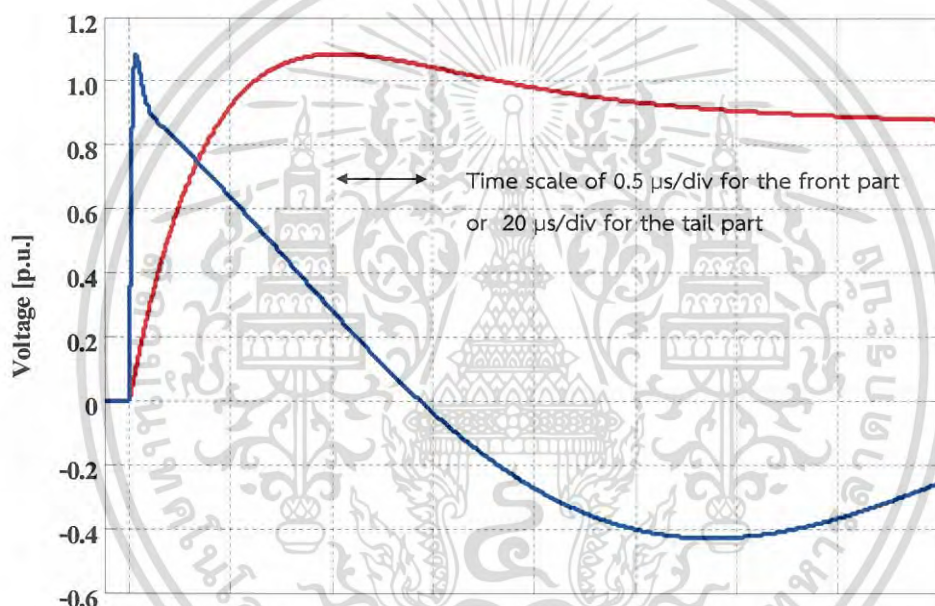
$$R_d = \frac{0.4 \times 10^{-6}}{C_b} \quad (3.2)$$

$$L_d = 1.25R_d \quad (3.3)$$

$$R_p = \frac{R_d L_L}{L_d} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

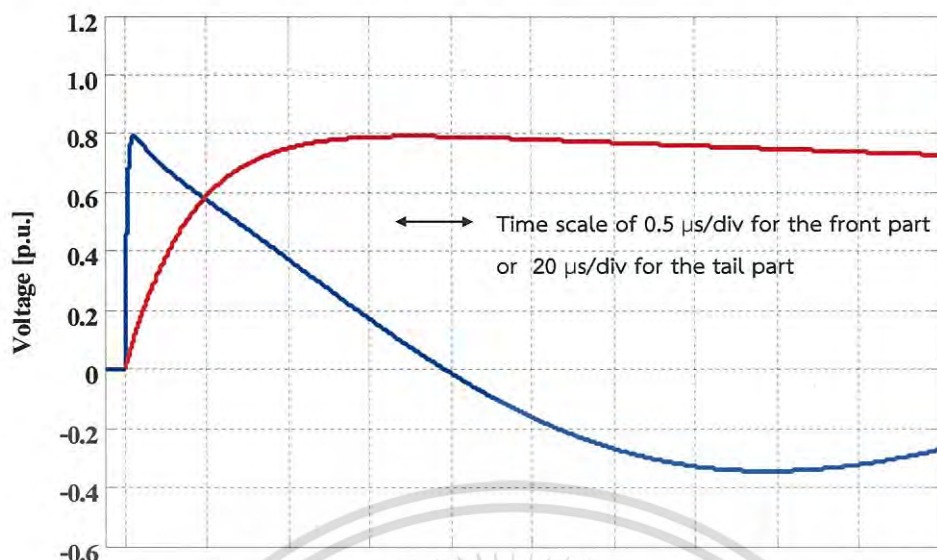
เพื่อยืนยันความผิดเพี้ยนของการออกแบบที่ Feser เคยนำเสนอ ให้พิจารณาโพลต์ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำขนาด 1.2 mH ขนานกับตัวเก็บประจุขนาด 10 nF เมื่อใช้สมการที่ 3.1 ถึง 3.4 ในการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า คือ ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) มีค่า 1.5 μF ค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) มีค่า 40 Ω ค่าความเหนี่ยวนำขานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (L_d) มีค่า 50 μH ค่าความต้านทานขานวัตถุทดสอบ (R_p) มีค่า 1000 Ω และหาค่าความต้านทานปรับหลังคลื่นมีค่า 50 Ω เมื่อนำค่าองค์ประกอบเหล่านี้ไปใช้ในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า พบว่าแรงดันที่สร้างขึ้นผิดเพี้ยนไปจากมาตรฐานกำหนดอย่างมาก คือ เวลาหน้าคลื่นมีค่า 0.68 μs เวลาหลังคลื่นมีค่า 30 μs เกิดส่วนพุ่งเกิน (Over shoot) 20% และแรงดันยอดกลับซ้ำ (Under shoot) 47.64% แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันจากการคำนวณค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่เคยนำเสนอโดย Feser

จากการคำนวณค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในบทความที่ Feser เคยนำเสนอมีการปรับแต่งค่าที่ทำการออกแบบเพื่อปรับปรุงรูปคลื่น โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า คือ ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) มีค่า 2.2 μF ค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) มีค่า 65 Ω ค่าความเหนี่ยวนำขานความต้านทานปรับหน้าคลื่น (L_d) มีค่า 400 μH ค่าความต้านทานขานวัตถุทดสอบ (R_p) มีค่า 200 Ω และค่าความต้านทานปรับหลังคลื่น มีค่า 55 Ω เมื่อนำค่าองค์ประกอบเหล่านี้ไปใช้ในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า พบว่ารูปคลื่นแรงดันที่สร้างขึ้นมีค่าเวลาหน้าคลื่น 1.5 μs เวลาหลังคลื่นมีค่า 38.11 μs แสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งยังมีความผิดเพี้ยนไปจากที่มาตรฐานกำหนด แม้ว่าการปรับแต่งค่าในบทความ [4] เหมือนจะได้รูปคลื่นใกล้เคียงมาตรฐานกำหนด แต่ยังคงขาดที่มาและวิธีการปรับแต่งค่าอย่างเป็นระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 รูปคลื่นแรงดันจากการปรับค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์ ตามบทความที่ Feser เคยนำเสนอ

เพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานกำหนด วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแบบใหม่ของวงจรแกลนิงเกอร์ที่ใช้เป็นวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ยกตัวอย่างเช่น หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ขดลวดเหนี่ยวนำชนิดต่างๆ และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีค่าความเหนี่ยวนำ

3.4 วิธีการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์

กรณีที่ทราบค่าความเหนี่ยวนำโหลดโดยวิธีการวัด จะสามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่น้อยที่สุดที่ทำให้เวลาหลังคลื่นมีค่ามากกว่า $40 \mu\text{s}$ โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.5 และกำหนดให้ $T_2 \approx T/8$ ซึ่งมีค่ามากกว่า $40 \mu\text{s}$ โดยใช้รูปคลื่น Cosine ในการจำลองว่าเป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และสมมติให้เวลาหลังคลื่น (T_2) มีค่าเป็นเศษหนึ่งส่วนแปดของคาบเวลา แสดงในสมการที่ 3.6 และสามารถหาค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ได้จากสมการที่ 3.7

$$T = 2\pi\sqrt{L_L C_S} \quad (3.5)$$

$$\frac{T}{8} \geq 40 \times 10^{-6} \quad (3.6)$$

แทนสมการที่ 3.6 ในสมการที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_s \geq \frac{\left(\frac{320 \times 10^{-6}}{2\pi} \right)^2}{L_L} \quad (3.7)$$

จากค่าตัวเก็บประจุจากขดลวดที่ทราบค่าจากการวัดหรือคำนวณได้นั้น สามารถนำไปหาค่าความต้านทานหน้าคลื่นโดยใช้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 3.8

$$T_1 = k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (3.8)$$

โดยกำหนดให้เวลาหน้าคลื่น T_1 มีค่าเท่ากับ $1.2 \mu\text{s}$ และค่า $k_2 = 2.96$ และ $C_s \gg C_b$ จะได้ค่าความต้านทานหน้าคลื่น (R_d) ตามสมการที่ 3.9

$$R_d = \frac{0.405 \times 10^{-6}}{C_b} \quad (3.9)$$

ซึ่ง R_d ที่ถูกเลือกใช้จะทำหน้าที่ลดการแกว่งของสัญญาณ และส่วนพุ่งเกินของรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน

หลังจากได้ค่าตัวเก็บประจุอิมพีลส์ และค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่นแล้ว ค่าความเหนี่ยวนำที่มากที่สุดสามารถนำมาต่อขานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นที่ใช้ในวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หาได้จากสมการที่ 3.10 ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่นำมาต่อขานนั้นจะต้องไม่ส่งผลต่อค่าเวลาหน้าคลื่นจึงกำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานมากที่สุด 10 เท่า โดยที่ ω คือ ความเร็วเชิงมุมเรโซแนนซ์ระหว่าง L_L และ C_s

$$L_d \leq \frac{R_d}{10} \sqrt{L_L C_s} \quad (3.10)$$

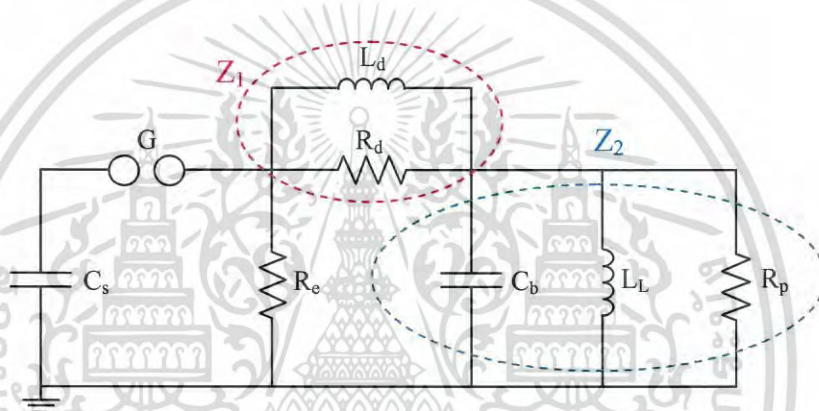
จากนั้นหาค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดโดยใช้ความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่สูงและกำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำจะต้องมากกว่าอิมพีแดนซ์ของความต้านทานอย่างน้อย 1.5 เท่า และกำหนดให้ค่าความถี่ของค่าแรงดันอิมพัลส์มีค่า 250 kHz จะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดได้จากสมการที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_d \geq \frac{1.5R_d}{5 \times 10^6 \pi} \quad (3.11)$$

ในความเป็นจริงจะไม่สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำทุกๆค่าที่คำนวณได้ ในทางปฏิบัติจึงเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำเฉพาะค่า เช่น 100 μH , 150 μH , 200 μH , 250 μH และ 300 μH ในการออกแบบ

หลังจากที่เลือกค่าความเหนี่ยวนำที่ต่อขานความต้านทานปรับหน้าคลื่นแล้วจะสามารถหาค่าความต้านทานขานวัตทดสอบ โดยยอมให้แรงดันที่เกิดพุงเกินได้ไม่เกิน 5% ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.16 โดยคิดจากการแบ่งแรงดันระหว่างอิมพีแดนซ์ตามสมการที่ 3.12 – 3.16



รูปที่ 3.13 วงจรแมตชิ่งเนอร์ที่แบ่งอิมพีแดนซ์เป็นสองกลุ่ม

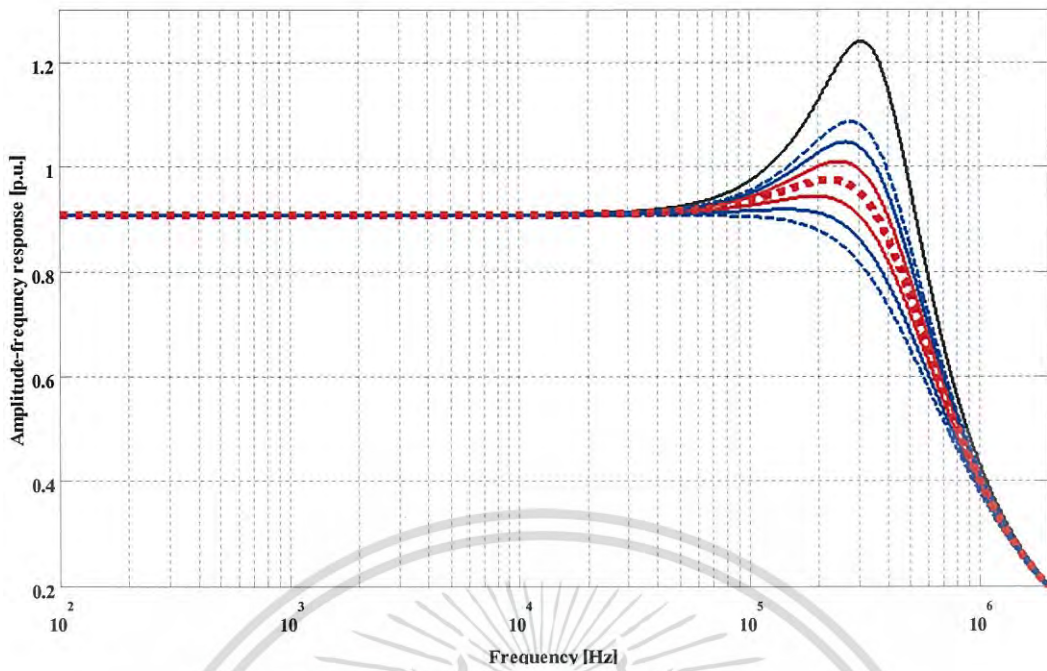
สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ได้ตามสมการที่ 3.12 – 3.13

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_d} + \frac{1}{j\omega L_d} = Y_1 \quad (3.12)$$

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C_b = Y_2 \quad (3.13)$$

การเลือกใช้ค่าที่มีแรงดันพุงเกินที่ 105% หากจากการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรแมตชิ่งเนอร์โดยแบ่งอิมพีแดนซ์ออกเป็นสองกลุ่มตามรูปที่ 3.13 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมโดยการพิจารณาค่าความต้านทานที่จะนำมาต่อขานกับโหลดทดสอบที่มีผลกระทบต่อช่วงเวลาหน้าคลื่นที่น้อยที่สุดจากรูปที่ 3.14 พบว่าค่าที่อยู่ระหว่าง 95%-105% มีความเหมาะสมที่จะถูกเลือกใช้ ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดยอดแรงดันเกินที่สูงเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- วงจรและสมการที่นำเสนอโดยแกลลิงเกอร์
- ⋯ วงจรและสมการที่นำเสนอโดยมีค่าอิมพีแดนซ์ 100%
- วงจรและสมการที่นำเสนอโดยมีค่าอิมพีแดนซ์ 95% และ 105%
- วงจรและสมการที่นำเสนอโดยมีค่าอิมพีแดนซ์ 90% และ 110%
- - - วงจรและสมการที่นำเสนอโดยมีค่าอิมพีแดนซ์ 85% และ 115%

รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองทางความถี่ของอิมพีแดนซ์ที่มีผลต่อหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์

จากกฎของการแบ่งแรงดัน และให้แรงดันตกคร่อม L มีค่าเป็น 105% จะได้สมการที่ 3.14

$$1.05 \frac{L_L}{L_L + L_d} = \frac{|Z_2|}{|Z_1 + Z_2|} = \frac{|Y_1|}{|Y_1 + Y_2|} \quad (3.14)$$

หาขนาดของค่าอิมพีแดนซ์ ได้ตามสมการที่ 3.15

$$\left(1.05 \left(\frac{L_L}{L_L + L_d} \right) \right)^2 = \frac{|Z_2|^2}{|Z_1 + Z_2|^2} = \frac{|Y_1|^2}{|Y_1 + Y_2|^2} \quad (3.15)$$

$$1.1 \left(\frac{L_L}{L_L + L_d} \right)^2 = \frac{|Y_1|^2}{|Y_1 + Y_2|^2} = \frac{\left(\frac{1}{R_d} \right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L_d} \right)^2}{\left(\frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_p} \right)^2 + \left(\omega C_b - \frac{1}{\omega L_L} - \frac{1}{\omega L_d} \right)^2} \quad (3.16)$$

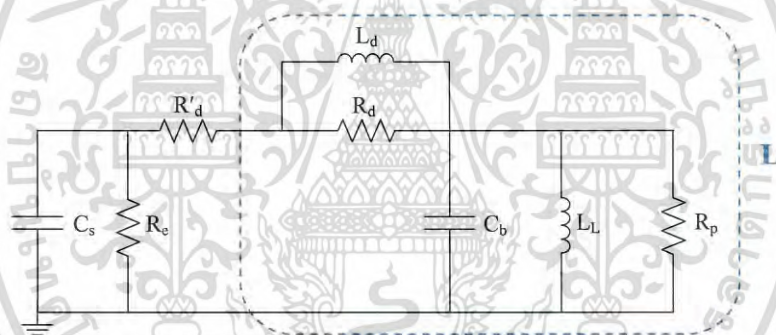
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่าความต้านทานขนานวัตถุทดสอบ (R_p) ได้จากสมการ 3.17

$$1.1 \left(\frac{L_L}{L_L + L_d} \right)^2 = \frac{\left(\frac{1}{R_d} \right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L_d} \right)^2}{\left(\frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_p} \right)^2 + \left(\omega C_b - \frac{1}{\omega L_L} - \frac{1}{\omega L_d} \right)^2} \quad (3.17)$$

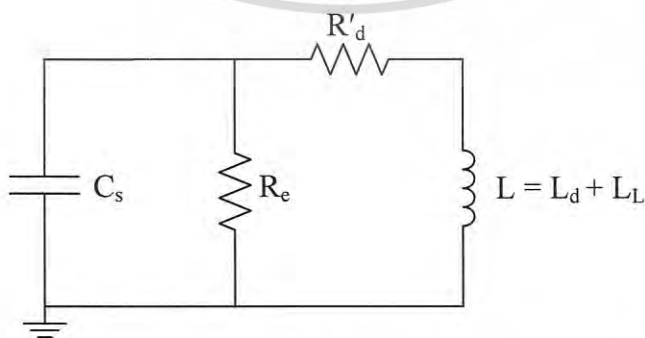
โดยที่ ω คือ ความเร็วเชิงมุมเรโซแนนซ์ระหว่าง L_d และ C_b

จากการพิจารณาวจรสร้างแรงดันอิมพัลส์โดยใช้วงจรของแกลนิงเกอร์โดยสนใจที่เวลาหลังคลื่นและการเกิดยอดกลับหัว โดยพิจารณาค่าความต้านทานหลังคลื่นที่เหมาะสมเพื่อลดการเกิดการแกว่งของรูปคลื่นสัญญาณ โดยกำหนดให้ส่วนที่เป็นวงจรทั้งหมดเป็นโหลด และมีการหน่วงการแกว่งทั้งแบบอนุกรมและขนาน โดยกำหนดให้ R'_d เป็นค่าความต้านทานหน่วงการแกว่งแบบต่ออนุกรม และ R_e เป็นค่าความต้านทานหน่วงการแกว่งแบบขนาน ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรการวิเคราะห์การแกว่งแรงดันยอดกลับหัว

กำหนดให้ โหลดทดสอบเป็นตัวเหนี่ยวนำดังรูปที่ 3.16 และสามารถหาได้จากสมการที่ 3.18



รูปที่ 3.16 วงจรการวิเคราะห์การแกว่งแรงดันยอดกลับหัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = L_d + L_L \quad (3.18)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_s}} \quad (3.19)$$

$$R_e = aZ \quad (3.20)$$

$$R'_d = bZ \quad (3.21)$$

โดยที่ a คือค่าคงที่ตั้งแต่ 1 ถึง ∞ และ b คือค่าคงที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ยอดกลับซ้ำดังแสดงค่าในตารางที่

3.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

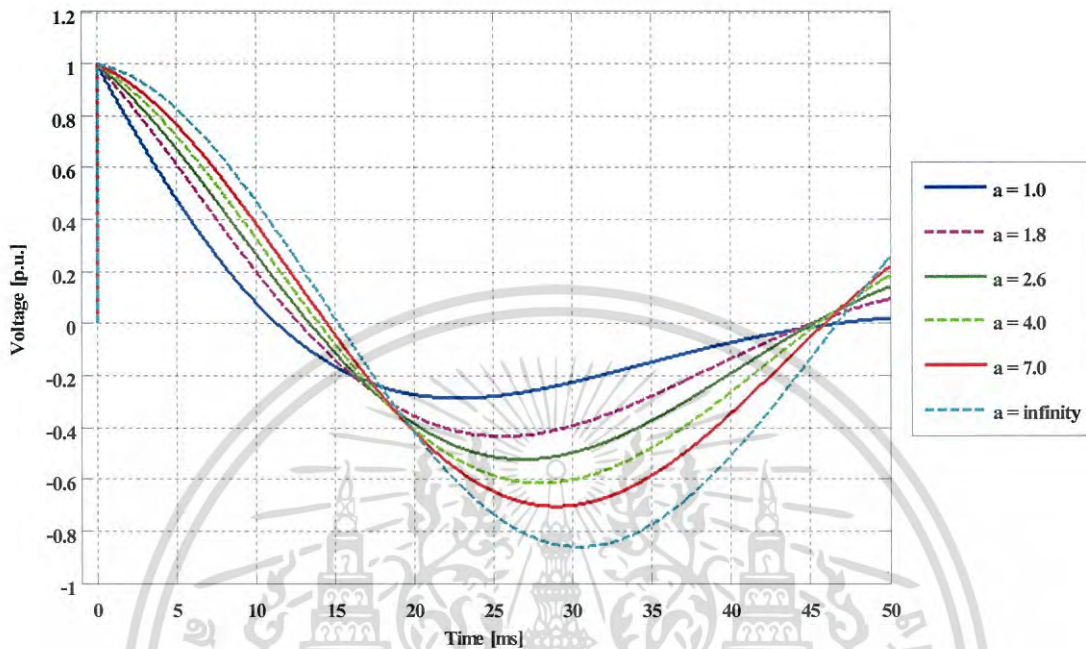
ตารางที่ 3.6-1 ค่าเปอร์เซ็นต์การกลับตัวของวงจรถ่ายทอดสัญญาณพัลส์จากเครื่องคอมพิวเตอร์ เมื่อทดสอบกับโพลิตที่มีค่าความถี่นำต่ำที่มีการปรับค่าคงที่ของตัวคูณค่าความต้านทานปรับลิ่งคลื่นที่ต่อแบบขนานและต่อแบบอนุกรม

Re Rd'	1Z	1.2Z	1.4Z	1.6Z	1.8Z	2Z	2.2Z	2.4Z	2.6Z	2.8Z	3Z	4Z	5Z	6Z	7Z	10Z	15Z	infinity
0Z	29.84	35.14	39.78	43.85	47.44	50.63	53.46	56.00	58.29	60.35	62.23	69.47	74.41	77.98	80.68	85.88	90.25	100.00
0.05Z	29.16	34.02	38.26	41.97	45.23	48.12	50.69	52.99	55.06	56.92	58.61	65.15	69.59	72.80	75.23	79.90	83.82	92.56
0.1Z	28.51	32.98	36.86	40.24	43.22	45.84	48.17	50.26	52.13	53.81	55.34	61.24	65.24	68.13	70.31	74.51	78.04	85.88
0.15Z	27.90	32.01	35.56	38.66	41.37	43.76	45.87	47.76	49.46	50.99	52.37	57.70	61.31	63.91	65.87	69.65	72.82	79.85
0.2Z	27.32	31.10	34.37	37.20	39.67	41.84	43.77	45.48	47.02	48.40	49.66	54.48	57.73	60.08	61.85	65.24	68.09	74.41
0.25Z	26.76	30.26	33.25	35.84	38.10	40.08	41.83	43.39	44.79	46.04	47.18	51.54	54.48	56.59	58.18	61.24	63.80	69.47
0.3Z	26.24	29.46	32.22	34.59	36.65	38.46	40.05	41.47	42.73	43.87	44.90	48.85	51.50	53.41	54.84	57.60	59.90	64.99
0.35Z	25.73	28.71	31.25	33.42	35.31	36.95	38.40	39.69	40.84	41.88	42.81	46.38	48.78	50.49	51.79	54.27	56.34	60.90
0.4Z	25.25	28.01	30.34	32.33	34.05	35.56	36.88	38.05	39.10	40.03	40.88	44.11	46.27	47.82	48.99	51.22	53.08	57.17
0.45Z	24.79	27.34	29.49	31.31	32.89	34.26	35.46	36.53	37.48	38.33	39.10	42.02	43.97	45.37	46.41	48.42	50.09	53.76
0.5Z	24.35	26.71	28.68	30.36	31.80	33.05	34.15	35.12	35.98	36.75	37.44	40.08	41.84	43.10	44.04	45.84	47.34	50.63

ตารางที่ 3.6-2 ค่าเปอร์เซ็นต์การกลับตัวของวงจรถ่ายทอดสัญญาณจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จากการจำลองรูปคลื่นโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อทดสอบกับโพลที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่มีการปรับค่าคงที่ของตัวคูณค่าความต้านทานปรับหลังคลื่นที่ต่อแบบขนานและต่อแบบอนุกรม

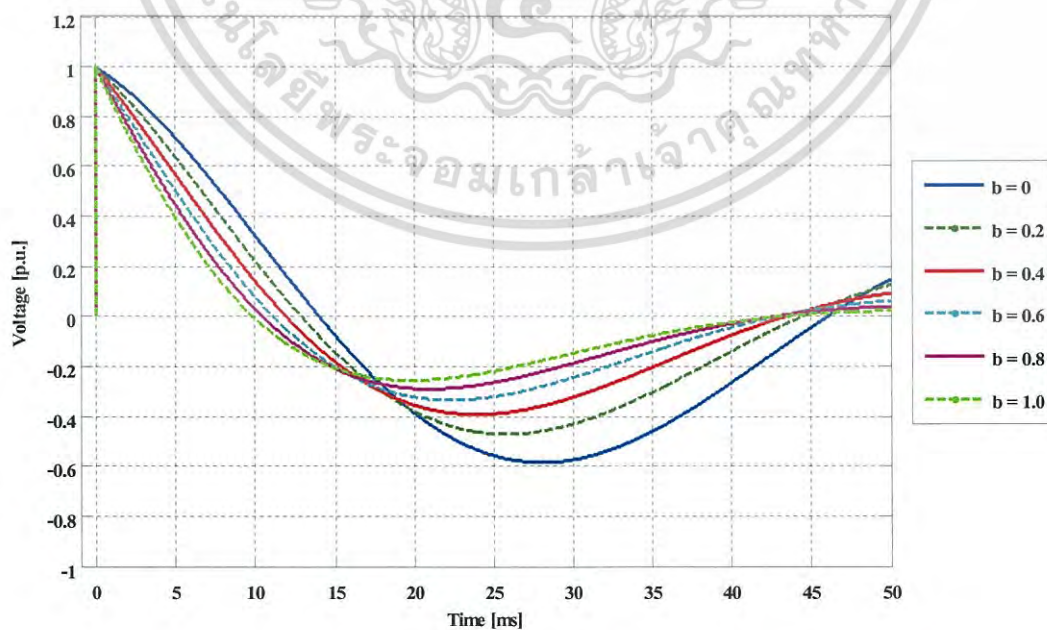
Re Rd'	1Z	1.2Z	1.4Z	1.6Z	1.8Z	2Z	2.2Z	2.4Z	2.6Z	2.8Z	3Z	4Z	5Z	6Z	7Z	10Z	15Z	infinity
0.55Z	23.93	26.11	27.93	29.46	30.78	31.92	32.92	33.80	34.58	35.28	35.91	38.29	39.88	41.01	41.86	43.47	44.81	47.75
0.6Z	23.53	25.54	27.21	28.62	29.82	30.86	31.77	32.57	33.28	33.91	34.48	36.63	38.06	39.07	39.83	41.28	42.48	45.10
0.65Z	23.14	25.00	26.54	27.83	28.92	29.87	30.70	31.42	32.06	32.63	33.15	35.09	36.37	37.28	37.96	39.25	40.32	42.65
0.7Z	22.77	24.49	25.90	27.08	28.08	28.94	29.69	30.34	30.92	31.44	31.90	33.65	34.80	35.61	36.22	37.37	38.32	40.39
0.75Z	22.41	23.99	25.29	26.37	27.28	28.06	28.74	29.33	29.86	30.32	30.74	32.30	33.33	34.06	34.60	35.62	36.47	38.30
0.8Z	22.06	23.52	24.71	25.70	26.53	27.23	27.85	28.38	28.85	29.27	29.65	31.05	31.96	32.61	33.09	34.00	34.74	36.35
0.85Z	21.73	23.07	24.16	25.06	25.81	26.45	27.01	27.49	27.91	28.29	28.62	29.87	30.69	31.26	31.68	32.48	33.14	34.55
0.9Z	21.40	22.64	23.64	24.46	25.14	25.72	26.21	26.65	27.03	27.36	27.66	28.77	29.49	29.99	30.37	31.07	31.64	32.87
0.95Z	21.09	22.23	23.14	23.88	24.50	25.02	25.46	25.85	26.19	26.49	26.75	27.74	28.37	28.81	29.14	29.75	30.25	31.30
1Z	20.79	21.84	22.66	23.33	23.89	24.35	24.75	25.10	25.40	25.66	25.90	26.76	27.32	27.70	27.98	28.51	28.94	29.84

เมื่อนำข้อมูลบางส่วนมาแสดงผลความสัมพันธ์ของค่าแรงดันกับเวลา เมื่อกำหนดให้ค่า R'_d มีค่าคงที่เท่ากับ $0.1Z$ และเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ a เพื่อดูความสัมพันธ์การหน่วงการแกว่งแบบขนาน ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลาเมื่อ R'_d เป็นค่าคงที่

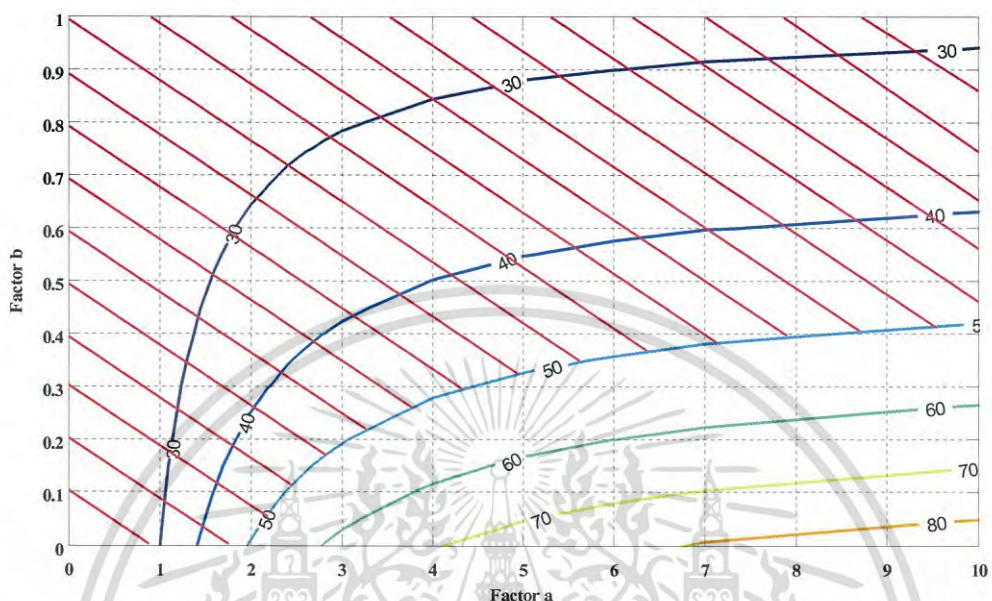
เมื่อกำหนดให้ค่า R_e มีค่าคงที่เท่ากับ $2.6Z$ และเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ b เพื่อดูความสัมพันธ์การหน่วงการแกว่งแบบอนุกรม ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลาเมื่อ R_e เป็นค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลที่ทำให้การจำลองรูปคลื่นแรงดันสามารถนำมาสรุปหากราฟความสัมพันธ์เปอร์เซ็นต์การแกว่งของรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.19 เพื่อหาค่าคงที่ที่เหมาะสมในการเลือกค่าความต้านทานปรับหลังคลื่น



รูปที่ 3.19 เส้นเปอร์เซ็นต์ค่ายอดกลับซ้ำของวงจรแกลนิงเกอร์

การใช้วงจรของแกลนิงเกอร์นั้นจะทำให้เกิดค่าแรงดันยอดกลับซ้ำมีค่าสูง ดังนั้นค่าความต้านทานปรับหลังคลื่น (R_e) ต้องมีค่าที่ต่ำพอซึ่งทำให้เกิดการหน่วงทำให้แรงดันยอดกลับซ้ำมีค่าต่ำกว่า 50% ตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.22

$$R_e \leq 2.5 \sqrt{\frac{(L_d + L_L)}{C_s}} \quad (3.22)$$

หรือต้องการค่าแรงดันยอดกลับซ้ำที่ค่าต่ำกว่า 40% โดยใช้ค่าสมการที่ 3.23

$$R_e \leq 1.6 \sqrt{\frac{(L_d + L_L)}{C_s}} \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์

การออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์เมื่อทราบค่าความเหนี่ยวนำของโหลดทดสอบสามารถออกแบบตามหัวข้อที่ 3.4 ได้ ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการจำลองโหลดทดสอบที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำโดยแบ่งเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกจะทดสอบค่าความเหนี่ยวนำที่อยู่ในบทความตามที่ Feser ได้เคยนำเสนอ ส่วนที่สองจะทดสอบค่าความเหนี่ยวนำที่อยู่ระหว่าง $0.4 \text{ mH} \leq L \leq 4 \text{ mH}$ และส่วนที่สามจะทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่ต่ำกว่า 0.4 mH

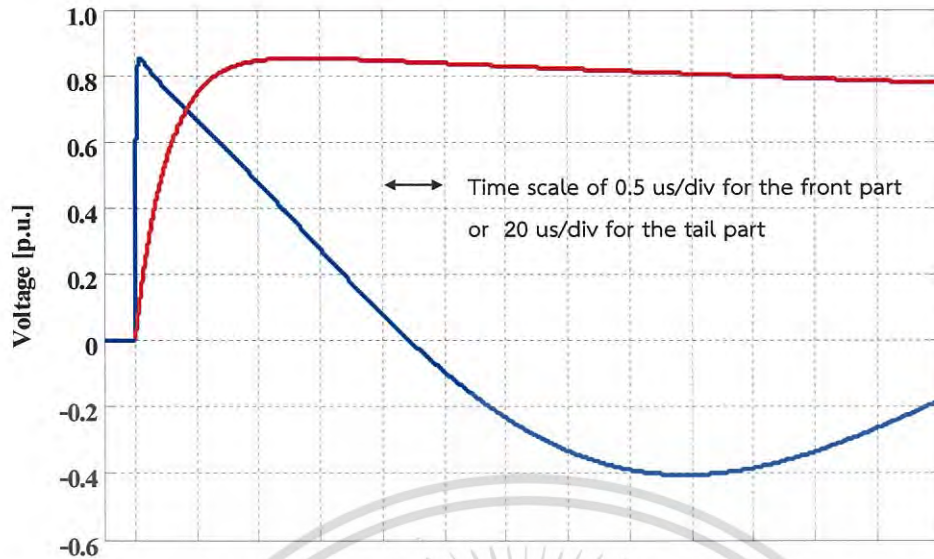
3.5.1 ค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่ Feser เคยนำเสนอ

การออกแบบในหัวข้อนี้จะเลือกใช้โหลดทดสอบตามค่าในบทความที่ Feser เคยนำเสนอ และใช้การออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ออกแบบใหม่ในการคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่เหลืออยู่ โดยได้ค่าองค์ประกอบดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าสำหรับวงจรแกลนิงเกอร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่ Feser เคยนำเสนอ

	องค์ประกอบทางไฟฟ้า	ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า	
		คำนวณ	ค่าที่เลือกใช้
โหลด	L_L (mH)	1.20	
	C_b (nF)	10.00	
การออกแบบ	C_s (μF)	3.37	3.00
	R_d (Ω)	40.50	40.00
	$L_d \text{ max}$ (μH)	240.00	200.00
	$L_d \text{ min}$ (μH)	38.20	
	R_p (Ω)	260.20	200.00
	R_e (Ω)	54.01	50.00

จากค่าองค์ประกอบที่ทำการออกแบบในตารางที่ 3.7 สามารถจำลองรูปคลื่นได้ดังรูปที่ 3.18 โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในค่าต่อหนึ่งหน่วย (Per unit) เทียบกับแรงดันอัดประจุ (หรือแรงดันอัดประจุมีค่าเท่ากับ 1 p.u.)



รูปที่ 3.20 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า
ที่ออกแบบใหม่ของวงจรแกแลนิงเกอร์

จากการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าดังรูปที่ 3.20 จะได้ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ คือ เวลาค้นขึ้นมีค่า $1.04 \mu\text{s}$ เวลาลงมีค่า $45.27 \mu\text{s}$ มีค่าแรงดันยอดกลับหัว 47.26% ของแรงดันยอดสูงสุด และมีประสิทธิภาพของวงจร 85.36%

3.5.2 ค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่อยู่ในช่วง $0.4 \text{ mH} \leq L \leq 4 \text{ mH}$

การออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการจำลองออกเป็น 5 กรณี โดยแต่ละกรณีจะมีวัตถุประสงค์ที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่แตกต่างกันโดยที่ค่าความเหนี่ยวนำอยู่ในขอบเขต $0.4 \text{ mH} \leq L \leq 4 \text{ mH}$ และทำการออกแบบคำนวณตามหัวข้อ 3.4 โดยที่มีการปรับค่าให้เหมาะสมตามสภาพการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. และค่าอุปกรณ์ต่างๆที่มีอยู่จริง ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับวงจร แกลนิงเกอร์ที่ได้จากการคำนวณ

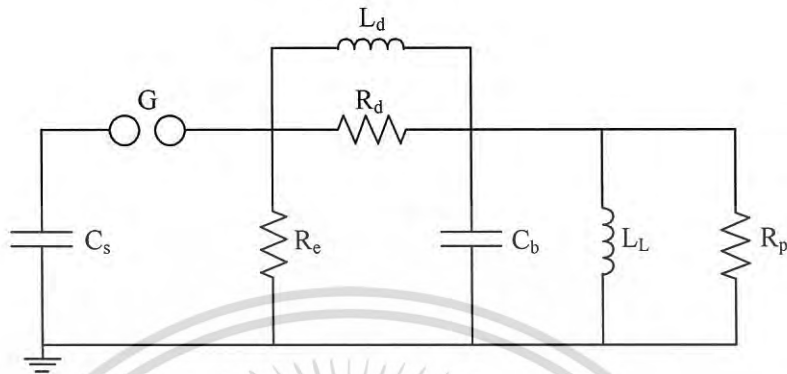
กรณี	ค่าที่ได้จากการคำนวณ					
	C_s Min (μF)	R_d (Ω)	L_d Max (μH)	L_d Min (μH)	R_p Max (Ω)	R_e Max (Ω)
1) $L_L = 4$ mH $C_b = 8.5$ nF	1.01	47.65	316.23	47.75	843.72	163.94
2) $L_L = 3.164$ mH $C_b = 8.5$ nF	1.28	47.65	437.52	52.52	697.19	103.29
3) $L_L = 1.5$ mH $C_b = 4$ nF	2.70	101.25	758.03	107.91	520.71	60.38
4) $L_L = 1$ mH $C_b = 4$ nF	4.05	101.25	890.79	109.82	409.22	35.36
5) $L_L = 0.4$ mH $C_b = 4$ nF	10.13	101.25	796.94	109.82	249.58	16.13

ตารางที่ 3.9 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับวงจร แกลนิงเกอร์ที่เลือกใช้

กรณี	C_s (μF)	R_d (Ω)	L_d (μH)	R_p (Ω)	R_e (Ω)
1) $L_L = 4$ mH $C_b = 8.5$ nF	1	50	300	500	150
2) $L_L = 3.164$ mH $C_b = 8.5$ nF	2	55	250	517	70
3) $L_L = 1.5$ mH $C_b = 4$ nF	3	115	250	400	50
4) $L_L = 1$ mH $C_b = 4$ nF	6	113	150	300	20
5) $L_L = 0.4$ mH $C_b = 4$ nF	12	115	100	200	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

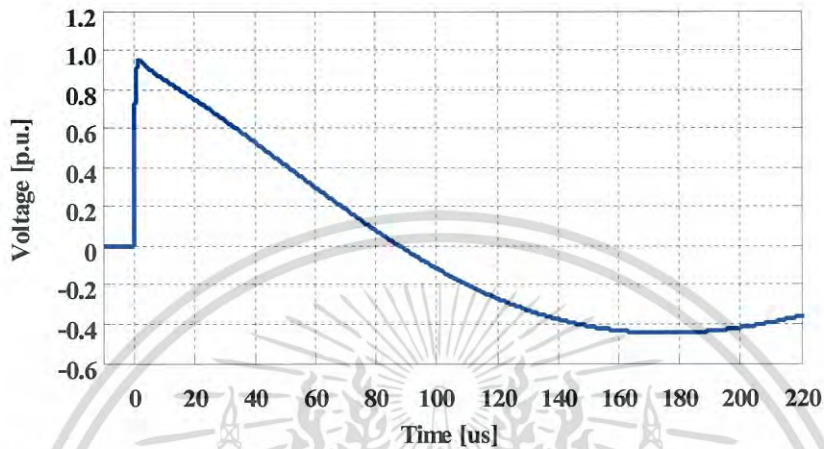
จากค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าตามทีออกแบบทั้ง 5 กรณี ได้จำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ฟาผ่าโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในค่าต่อหนึ่งหน่วย (Per unit) เทียบกับแรงดันอัดประจุ (หรือแรงดันอัดประจุมีค่าเท่ากับ 1 p.u.) แสดงดังรูปที่ 3.22 ถึงรูปที่ 3.26 โดยใช้วงจรสมมูลตามรูปที่ 3.21



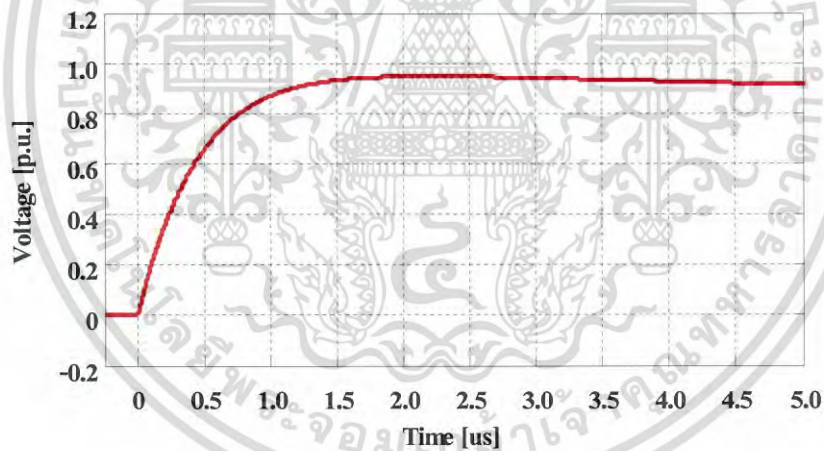
รูปที่ 3.21 วงจรแกแลนิงเกอร์ที่ใช้ในการจำลองรูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 ใช้ค่าความเหนี่ยวนำโหลด 4 mH ค่าตัวเก็บประจุโหลด 8.5 nF ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 1 μ F ค่าความต้านทานหน้าคลื่น 50 Ω ค่าความเหนี่ยวนำต่อขานความต้านทานปรับหน้าคลื่น 300 μ H ค่าความต้านทานขานวัดทดสอบ 500 Ω และค่าความต้านทานปรับหลังคลื่น 150 Ω จำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP Draw ได้ดังต่อไปนี้



ก) รูปคลื่นเต็ม



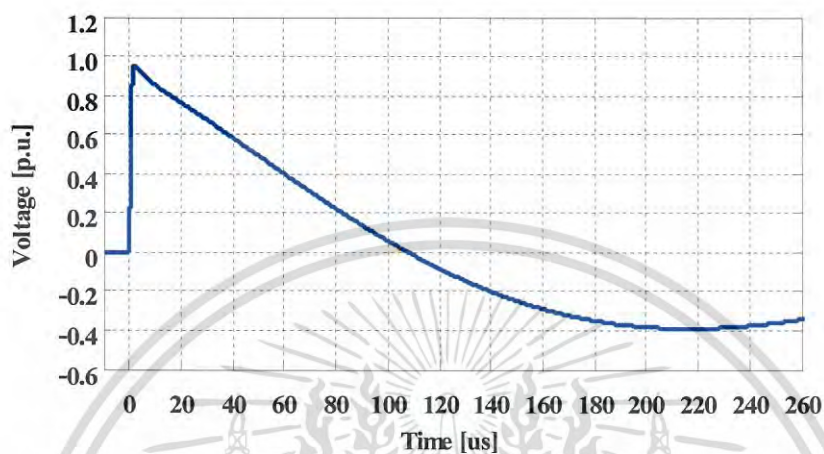
ข) ช่วงเวลาหน้าคลื่น

รูปที่ 3.22 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้
ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์ในกรณีที่ 1

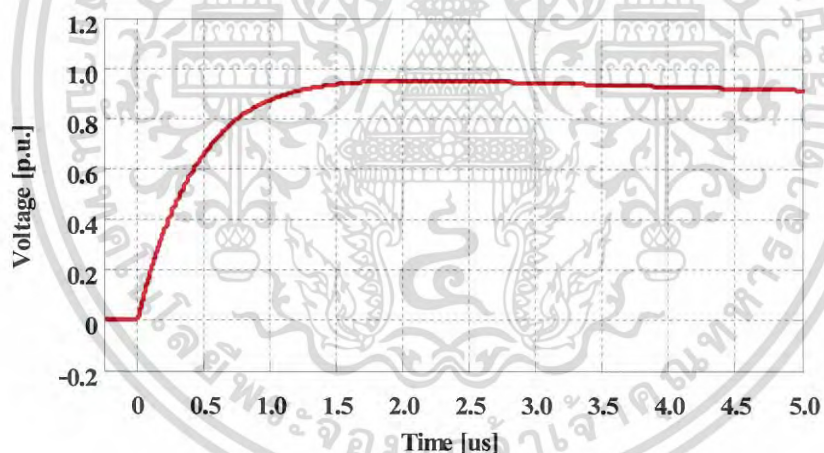
จากการจำลองรูปคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถหาค่าประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ โดยวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบมีประสิทธิภาพ 94.85% มีค่าเวลาหน้าคลื่น 1.31 μ s เวลาหลังคลื่น 45.15 μ s และแรงดันยอดกลับซ้ำ 47.07%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 2 ใช้ค่าความเหนี่ยวนำโหลด 3.164 mH ค่าตัวเก็บประจุโหลด 8.5 nF ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 2 μF ค่าความต้านทานหน้าคลื่น 55 Ω ค่าความเหนี่ยวนำต่อขานความต้านทานปรับหน้าคลื่น 250 μH ค่าความต้านทานขานวัตทุกทดสอบ 517 Ω และค่าความต้านทานปรับหลังคลื่น 70 Ω จำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP Draw ได้ดังต่อไปนี้



ก) รูปคลื่นเต็ม



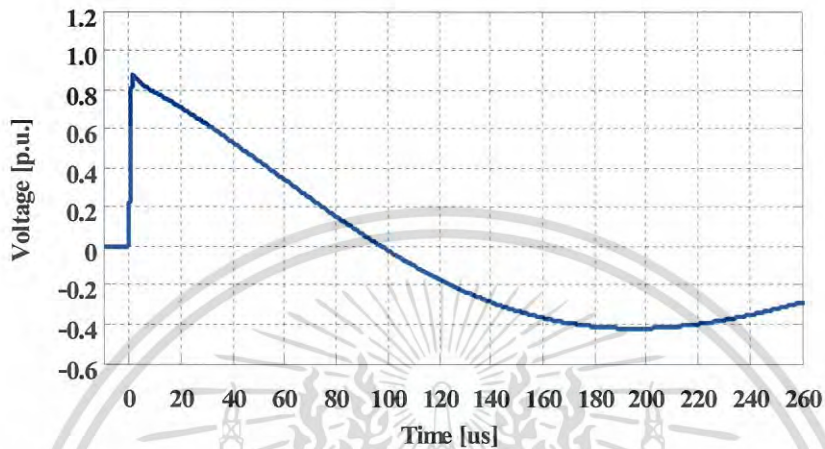
ข) ช่วงเวลาหน้าคลื่น

รูปที่ 3.23 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้
ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์ในกรณีศึกษาที่ 2

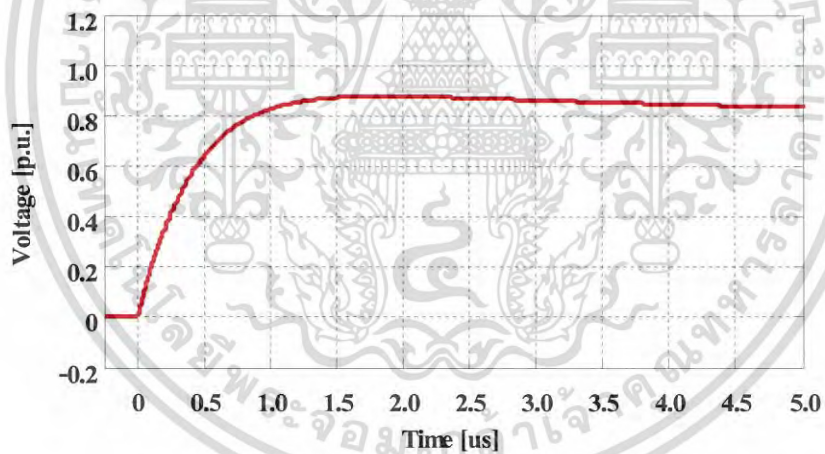
จากการจำลองรูปคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านได้ โดยวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบมีประสิทธิภาพ 95.14% มีค่าเวลาหน้าคลื่น 1.30 μs เวลาหลังคลื่น 52.04 μs และแรงดันยอดกลับซ้ำ 40.88%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 3 ใช้ค่าความเหนี่ยวนำไหลด 1.5 mH ค่าตัวเก็บประจุไหลด 4 nF ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 3 μF ค่าความต้านทานหน้าคลื่น 115 Ω ค่าความเหนี่ยวนำต่อขนานความต้านทานปรับหน้าคลื่น 250 μH ค่าความต้านทานขนานวัตถุทดสอบ 400 Ω และค่าความต้านทานปรับหลังคลื่น 50 Ω จำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP Draw ได้ดังต่อไปนี้



ก) รูปคลื่นเต็ม



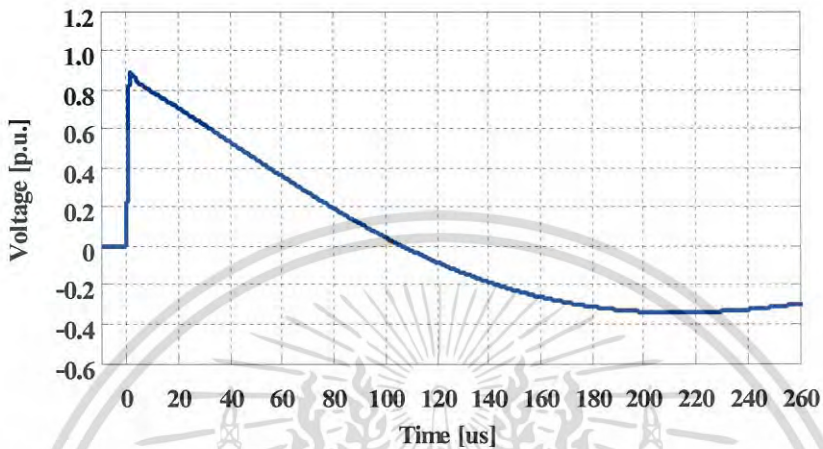
ข) ช่วงเวลาหน้าคลื่น

รูปที่ 3.24 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้
ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกแลนิงเกอร์ในกรณีที่ 3

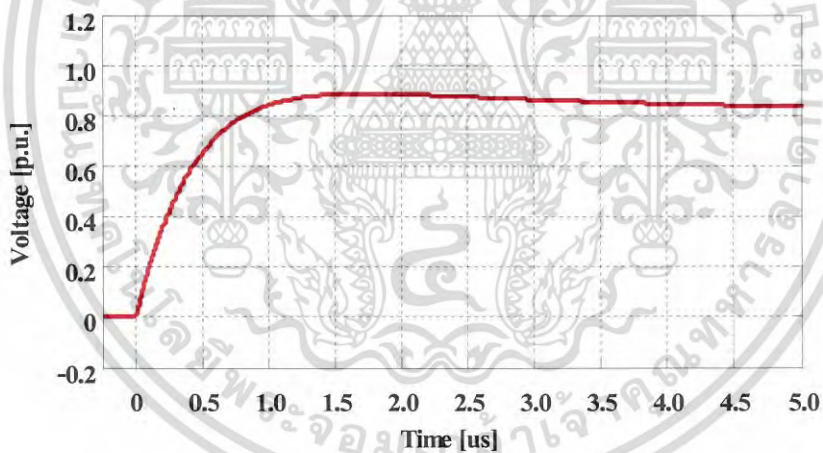
จากการจำลองรูปคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถหาค่าประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ โดยวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบมีประสิทธิภาพ 87.88% มีค่าเวลาหน้าคลื่น 1.07 μs เวลาหลังคลื่น 51.17 μs และแรงดันยอดกลับซ้ำ 48.58%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 4 ใช้ค่าความเหนี่ยวนำโพลด 1 mH ค่าตัวเก็บประจุโพลด 4 nF ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 6 μF ค่าความต้านทานหน้าคลื่น 113 Ω ค่าความเหนี่ยวนำต่อขนานความต้านทานปรับหน้าคลื่น 150 μH ค่าความต้านทานขนานวัตถุทดสอบ 300 Ω และค่าความต้านทานปรับหลังคลื่น 20 Ω จำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP Draw ได้ดังต่อไปนี้



ก) รูปคลื่นเต็ม



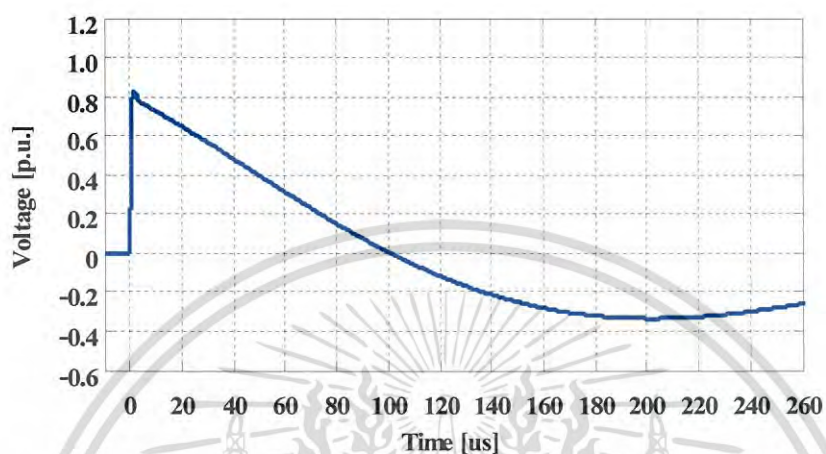
ข) ช่วงเวลาหน้าคลื่น

รูปที่ 3.25 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้
ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์ในกรณีที่ 4

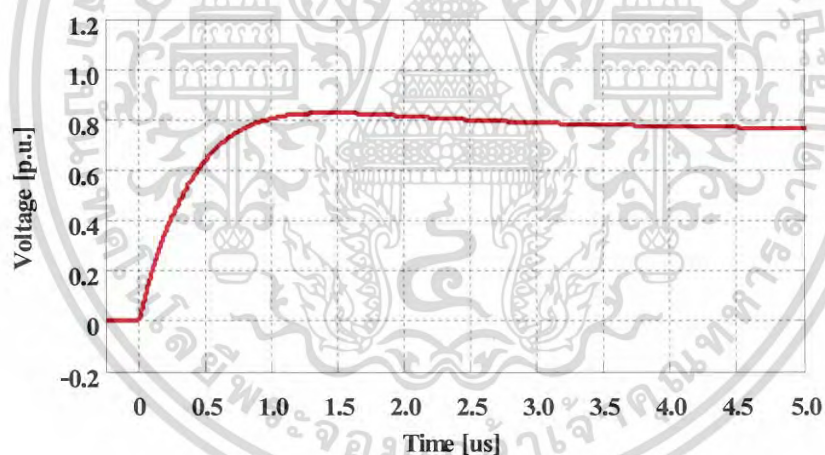
จากการจำลองรูปคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถหาค่าประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบมีประสิทธิภาพ 88.82% มีค่าเวลาหน้าคลื่น 1.13 μs เวลาหลังคลื่น 50.48 μs และแรงดันยอดกลับซ้ำ 38.32%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 5 ใช้ค่าความเหนี่ยวนำโหลด 0.4 mH ค่าตัวเก็บประจุโหลด 4 nF ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 12 μ F ค่าความต้านทานหน้าคลื่น 115 Ω ค่าความเหนี่ยวนำต่อขนานความต้านทานปรับหน้าคลื่น 100 μ H ค่าความต้านทานขนานวัตถุทดสอบ 200 Ω และค่าความต้านทานปรับหลังคลื่น 10 Ω จำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP Draw ได้ดังต่อไปนี้



ก) รูปคลื่นเต็ม



ข) ช่วงเวลาหน้าคลื่น

รูปที่ 3.26 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้
ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลนิงเกอร์ในกรณีศึกษาที่ 5

จากการจำลองรูปคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า โดยวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบมีประสิทธิภาพ 82.84% มีค่าเวลาหน้าคลื่น 0.96 μ s เวลาหลังคลื่น 49.41 μ s และแรงดันยอดกลับซ้ำ 40.36%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ออกแบบ พบว่าประสิทธิภาพของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีค่ามากกว่า 80% ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันอิมพัลส์ที่ได้อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด คือ ค่าเวลาหน้าคลื่นอยู่ในช่วง 0.84 – 1.56 μs ค่าเวลาหลังคลื่นอยู่ในช่วง 40 – 60 μs ส่วนพุ่งเกินไม่เกิน 5% และแรงดันยอดกลับขั้วน้อยกว่า 50% ของแรงดันสูงสุด ดังสรุปในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 องค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการจำลองวงจรแกแลนิงเกอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

กรณี	ประสิทธิภาพ (%)	แรงดันยอดกลับขั้ว (%)	เวลาหน้าคลื่น $T_1(\mu\text{s})$	เวลาหลังคลื่น $T_2(\mu\text{s})$
1) $L_L = 4 \text{ mH}$ $C_b = 8.5 \text{ nF}$	94.85	47.07	1.31	45.15
2) $L_L = 3.164 \text{ mH}$ $C_b = 8.5 \text{ nF}$	95.14	40.88	1.30	52.04
3) $L_L = 1.5 \text{ mH}$ $C_b = 4 \text{ nF}$	87.88	48.58	1.07	51.17
4) $L_L = 1 \text{ mH}$ $C_b = 4 \text{ nF}$	88.82	38.32	1.13	50.48
5) $L_L = 0.4 \text{ mH}$ $C_b = 4 \text{ nF}$	82.84	40.36	0.96	49.41

3.5.3 ค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่ต่ำกว่า 0.4 mH

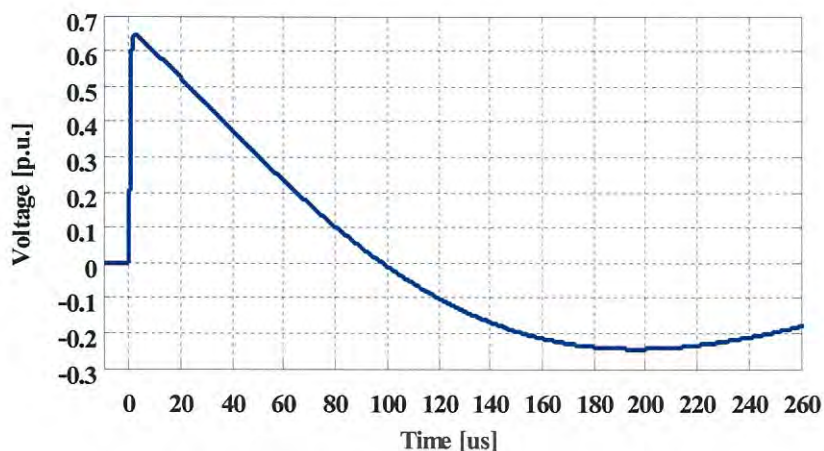
จากค่าความเหนี่ยวนำที่มีการใช้งานในปัจจุบัน ยกตัวอย่างเช่น ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย หรือขดลวดความเหนี่ยวนำ อาจมีค่าความเหนี่ยวนำที่ต่ำกว่า 0.4 mH ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบแรงดันอิมพัลส์เหมือนค่าความเหนี่ยวนำข้างต้น จึงได้ทำการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า โดยการจำลองโหลดค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่า 0.2 mH และมีค่าตัวเก็บประจุโหลด 4 nF ดังแสดงในตารางที่ 3.11 และจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP draw แสดงดังรูปที่ 3.27

ตารางที่ 3.11 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับวงจรแกลนิงเกอร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โพลต์ค่าความเหนี่ยวนำ 0.2 mH

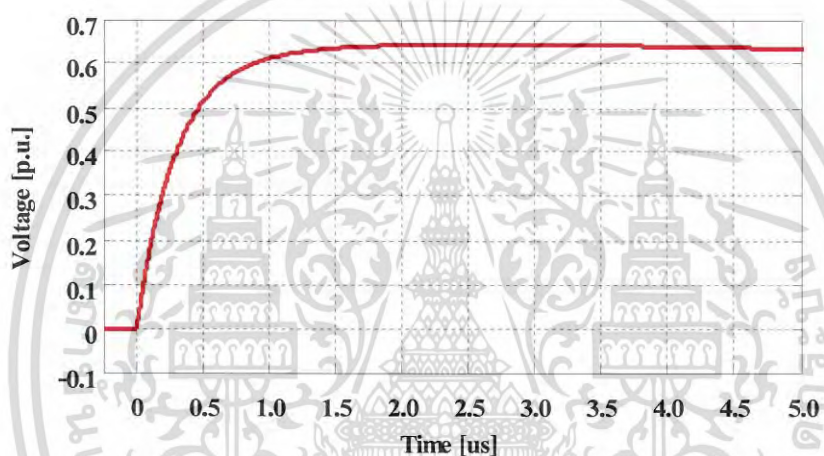
องค์ประกอบทางไฟฟ้า		ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า	
		คำนวณ	ค่าที่เลือกใช้
โพลต์	L_L (mH)	0.20	
	C_b (nF)	4.00	
การออกแบบ	C_s (μ F)	20.27	20.00
	R_d (Ω)	101.25	115.00
	L_d max (μ H)	727.32	100.00*
	L_d min (μ H)	109.82	
	R_p (Ω)	157.83	100.00
	R_e (Ω)	9.68	5.00

*ค่าองค์ประกอบที่มีอยู่จริงและเหมาะสมกับการเลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) รูปคลื่นเต็ม



ข) ช่วงเวลาหน้าคลื่น

รูปที่ 3.27 รูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้

ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกลงนิงเกอร์ในกรณีที่มีความเหนี่ยวนำโหลดมีค่า 0.2 mH

จากการจำลองรูปคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบจะมีประสิทธิภาพ 64.45% ซึ่งมีค่าค่อนข้างน้อย แต่มีค่าเวลาหน้าคลื่น 1.06 μs เวลาหลังคลื่น 47.69 μs ซึ่งเป็นค่าที่ยังอยู่ในมาตรฐานกำหนด และมีแรงดันยอดกลับหัว 37.78%

จากการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าจะพบว่า เมื่อค่าความเหนี่ยวนำมีค่าต่ำมากๆ จะทำให้ประสิทธิภาพของวงจรทดสอบมีค่าลดลง แต่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ยังมีค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นตามที่มาตรฐานกำหนด

3.6 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้เพื่อใช้ในวงจรแกลนิงเจอร์ [14]

การออกแบบขดลวดชนิดความเหนี่ยวนำปรับค่าได้ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก โดยการเลื่อนท่ออลูมิเนียม ทำการประกอบสร้างโดยใช้ลวดทองแดงที่มีขนาด 0.5 mm. พันอยู่บนท่อฉนวน PVC ซึ่งมีความหนา 1.5 mm. ใช้จำนวนรอบทั้งหมด 300 รอบ ค่าความเหนี่ยวนำในการสร้างเป็นไปตามสมการ 3.24 และการหักล้างสนามโดยใช้ท่ออลูมิเนียมเป็นไปตามสมการที่ 3.27

$$L_0 = \frac{N^2 r^2}{9r + 10l} \quad (3.24)$$

$$L = L_0 (1 - k) \quad (3.25)$$

โดยที่ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น μH

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

r คือ รัศมีของขดลวด มีหน่วยเป็น inch

l คือ ความยาวของขดลวด มีหน่วยเป็น inch

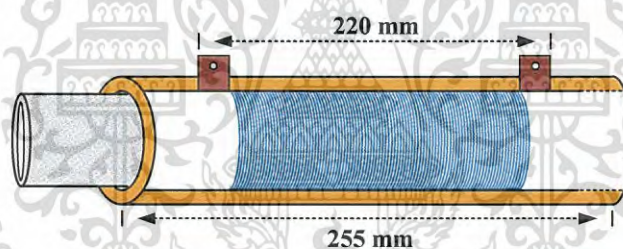
k คือ ค่าคงที่ที่มีค่า 0.1 ถึง 1

โดยขดลวดที่ทำการออกแบบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 39 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 45 mm. มีความหนา 3 mm. และความยาวของขดลวด 255 mm. ใช้ท่ออลูมิเนียมมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 32 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 38 mm. สอดอยู่ภายในท่อ PVC ที่มีลวดตัวเหนี่ยวนำพันอยู่

การปรับค่าความเหนี่ยวนำทำการปรับโดยการเลื่อนท่ออลูมิเนียมที่สอดภายในตัวเหนี่ยวนำ ระยะห่างระหว่างผิวนอกของท่ออลูมิเนียมและผิวด้านในของขดลวด มีค่า 0.5 mm. เมื่อทำการสอดท่ออลูมิเนียมตลอดทั้งความยาวของขดลวดตัวเหนี่ยวนำจะให้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต่ำที่สุด มีค่า 100 μH และเมื่อนำท่ออลูมิเนียมออกจากท่อตัวเหนี่ยวนำจะให้ค่าความเหนี่ยวนำที่มากที่สุด 300 μH ดังแสดงในตารางที่ 3.12 และรูปที่ 3.28

ตารางที่ 3.12 รายละเอียดการออกแบบสร้างขดลวดค่าความเหนี่ยวนำต่ำที่ออกแบบ

เส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองแดง	0.5 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขดลวด ความเหนี่ยวนำ	39 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขดลวด ความเหนี่ยวนำ	45 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ อะลูมิเนียม	32 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ อะลูมิเนียม	38 mm
ความยาวของขดลวด	255 mm
จำนวนรอบ	300 turn
ค่าความเหนี่ยวนำที่ปรับได้	100 - 300 μH



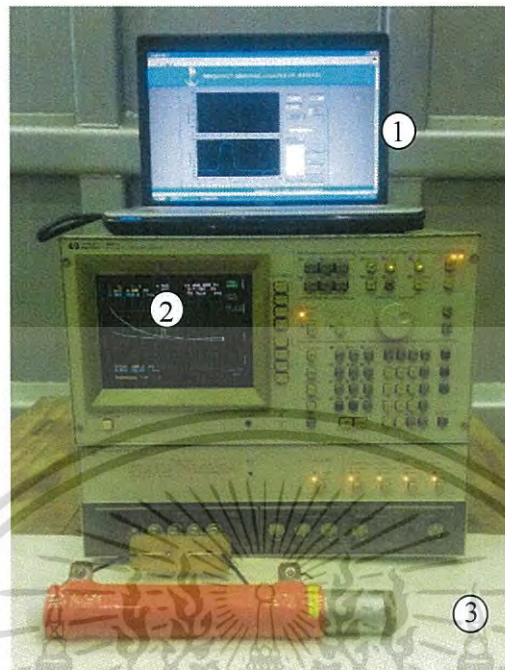
ก) การจำลองขดลวดความเหนี่ยวนำปรับค่าได้



ข) ขดลวดความเหนี่ยวนำที่ออกแบบสร้าง
รูปที่ 3.28 ขดลวดความเหนี่ยวนำที่ออกแบบสร้าง

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำที่ทำการออกแบบทำการทดสอบโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) HP4194A ที่ความถี่ 10 kHz ดังแสดงในรูปที่ 3.29 และแสดงผลการวัดค่าตอบสนองทางความถี่ในรูปที่ 3.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

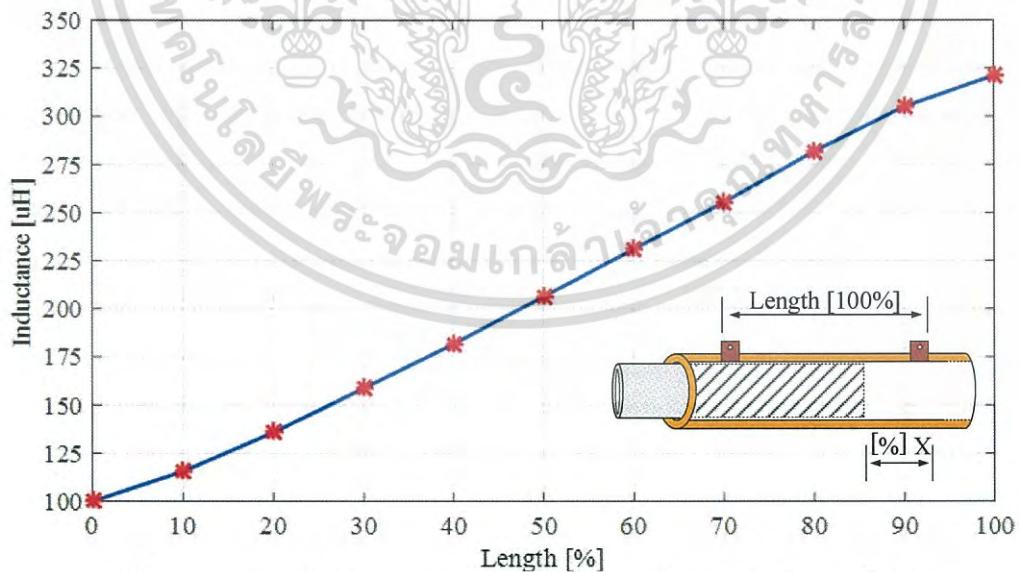


รูปที่ 3.29 ขดลวดเหนี่ยวนำที่วัดค่าโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

(1) ระบบบันทึกข้อมูล

(2) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer)

(3) ตัวเหนี่ยวนำรับค่าได้



รูปที่ 3.30 ผลการวิเคราะห์ค่าตอบสนองทางความถี่ของตัวเหนี่ยวนำที่สร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

4.1 บทนำ

การทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำการออกแบบของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามที่เกล็นิงเกอร์ได้นำเสนอ เพื่อให้ได้รูปคลื่นตามที่มาตรฐาน IEC 60060-1 (2010) [1] ซึ่งกำหนดให้มีเวลาหน้าคลื่น $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ เวลาหลังคลื่น $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ แรงดันพุ่งเกินไม่เกิน 5% และแรงดันยอดกลับซ้ำไม่เกิน 50%

ซึ่งการทดสอบดังที่กล่าวนี้ได้กระทำ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4.2 การทดสอบวงจรเกล็นิงเกอร์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำการออกแบบกับอุปกรณ์ทดสอบจำลอง

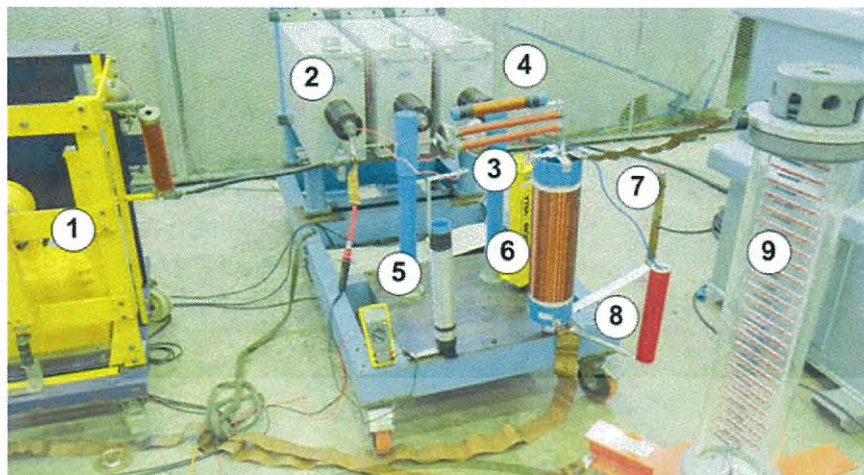
ในการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น ค่าตัวเก็บประจุอัดประจุที่ไม่มีค่าตามที่ออกแบบ หรือ ค่าความเหนี่ยวนำไหลดที่ได้ออกแบบ ดังนั้นการทดสอบในหัวข้อนี้จึงจำเป็นที่จะต้องยกตัวอย่างการทดสอบเป็นบางกรณีเท่านั้น ซึ่งมีทั้งหมด 2 กรณีดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 การทดสอบค่าความเหนี่ยวนำไหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 3.164 mH

ใช้ค่าองค์ประกอบตามการออกแบบในหัวข้อที่ 3.3.1 ในกรณีที่ 2 หรือตามตารางที่ 4.1 ในการทดสอบ และแสดงวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณีที่ 1

องค์ประกอบทางไฟฟ้า	ค่าที่เลือกใช้
L_L (mH)	3.164
C_b (nF)	8.5
C_s (μF)	2
R_d (Ω)	55
L_d (μH)	250
R_p (Ω)	517
R_e (Ω)	70

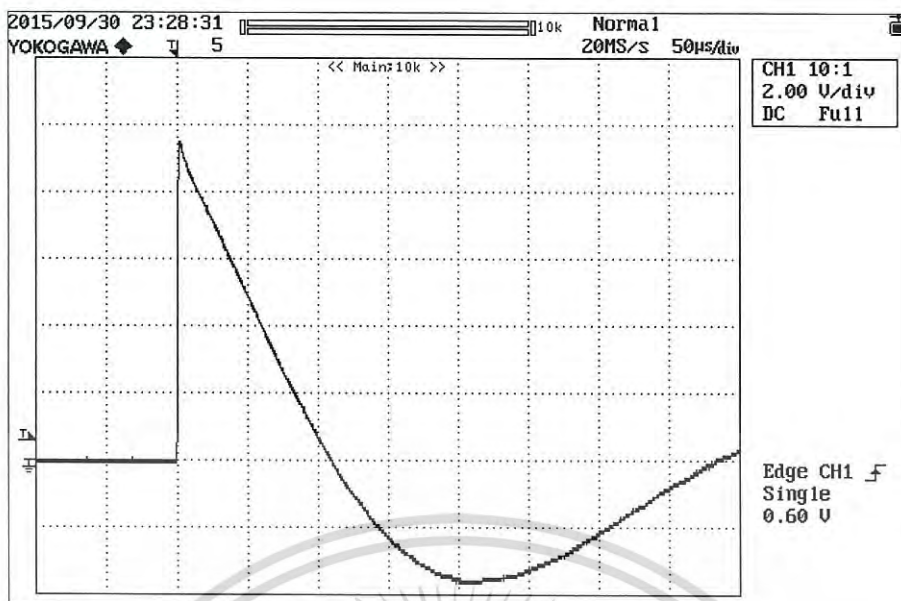


รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบในห้องปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้ค่างค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรแกแลนิงเกอร์

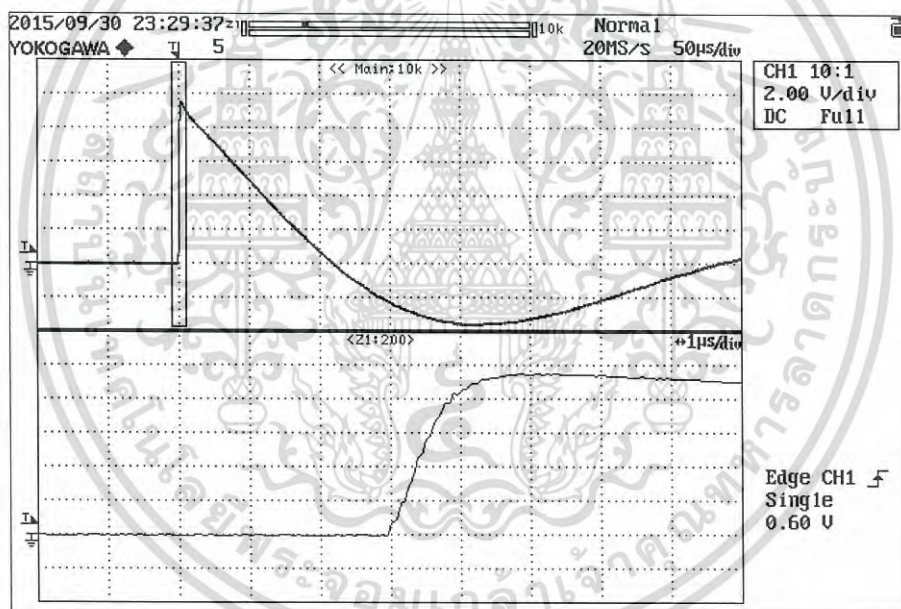
หมายเลขแสดงส่วนประกอบของวงจรการทดสอบ

- 1) หม้อแปลงชาร์จประจุ
- 2) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์
- 3) ตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น
- 4) ตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น
- 5) ตัวต้านทานปรับหลังคลื่น
- 6) ตัวเหนี่ยวนำโหลด
- 7) ตัวเก็บประจุโหลด
- 8) ตัวต้านทานขนานโหลดทดสอบ
- 9) ดีไวเดอร์วัดรูปคลื่นสัญญาณ

จากค่างค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ออกแบบเมื่อทำการทดสอบวัดแรงดันจะได้อุปกรณ์แรงดันอิมพัลส์ดังแสดงในรูปที่ 4.2



ก) รูปคลื่นเต็ม

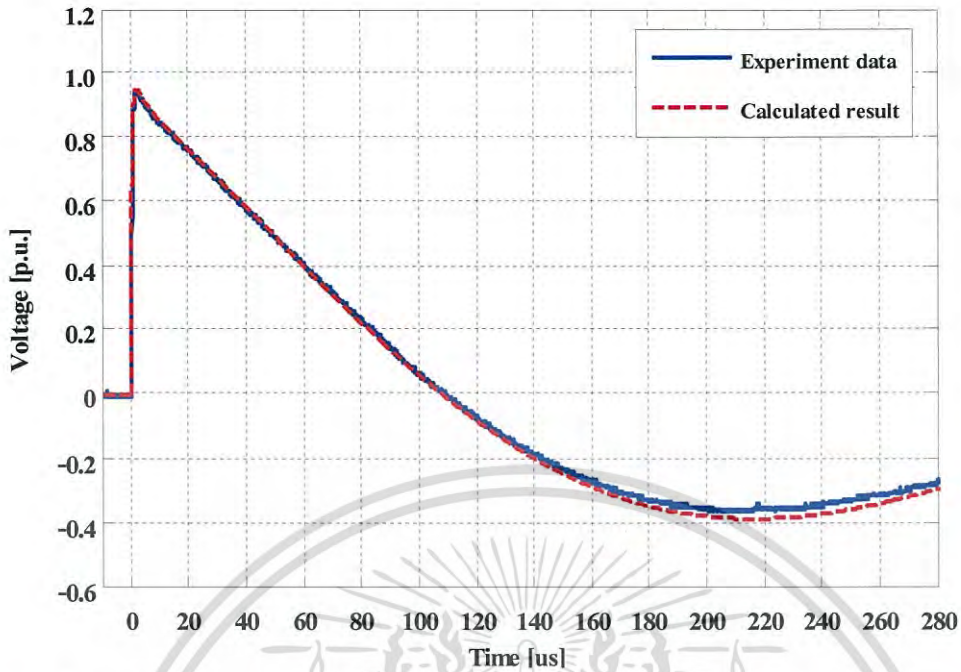


ข) รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นขยายหน้าคลื่น

รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในกรณีที่ 1

จากผลการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า ผลจากการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ค่าองค์ประกอบที่ทำการออกแบบใหม่มีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันมีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

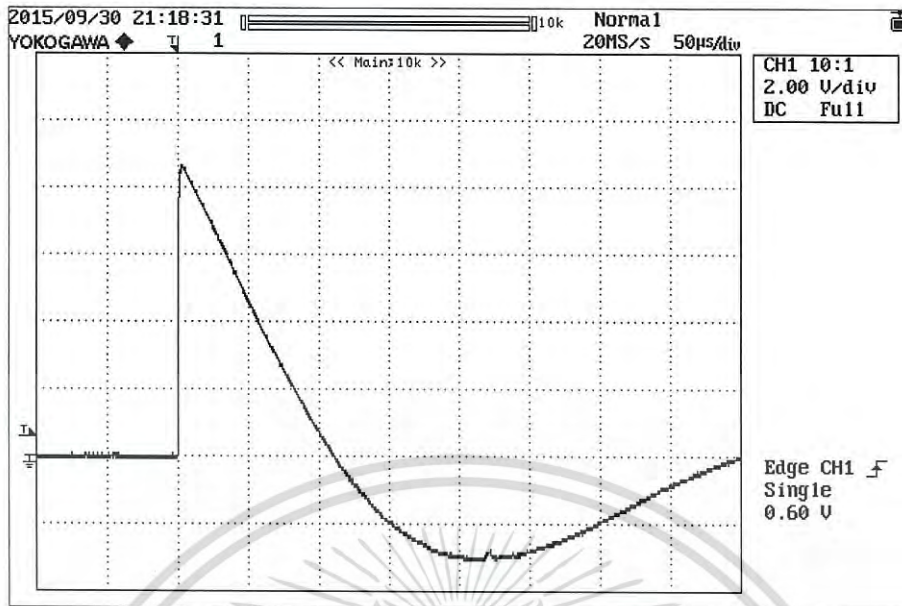
กรณีที่ 2 การทดสอบค่าความเหนี่ยวนำโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 mH ใช้ค่าองค์ประกอบตามการออกแบบในหัวข้อที่ 3.3.1 ในกรณีที่ 4 หรือตามตารางที่ 4.2 ในการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบกรณีที่ 2

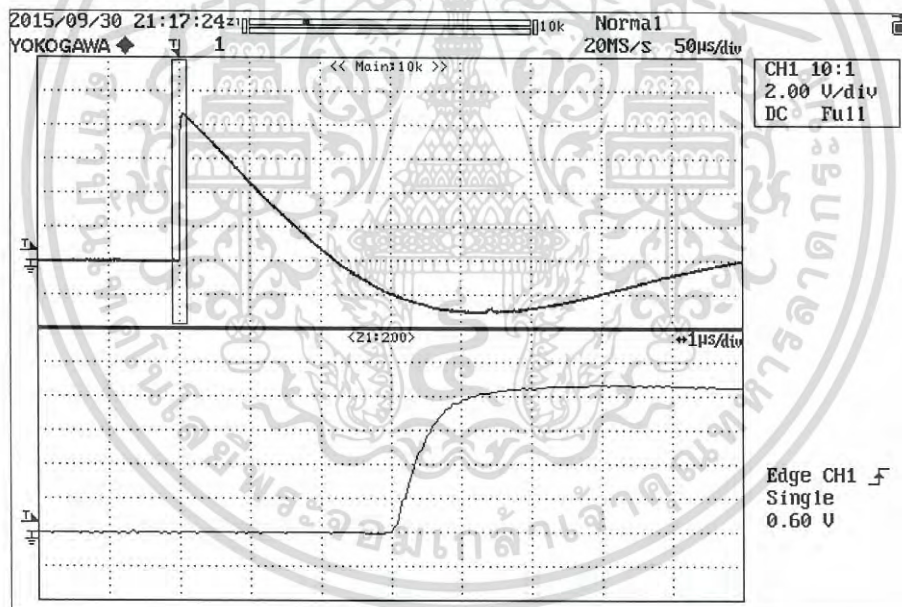
องค์ประกอบทางไฟฟ้า	ค่าที่เลือกใช้
L_L (mH)	1
C_b (nF)	4
C_s (μ F)	6
R_d (Ω)	113
L_d (μ H)	150
R_p (Ω)	300
R_e (Ω)	20

จากค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ออกแบบเมื่อทำการทดสอบวัดแรงดันจะได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ดังแสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) รูปคลื่นเต็ม

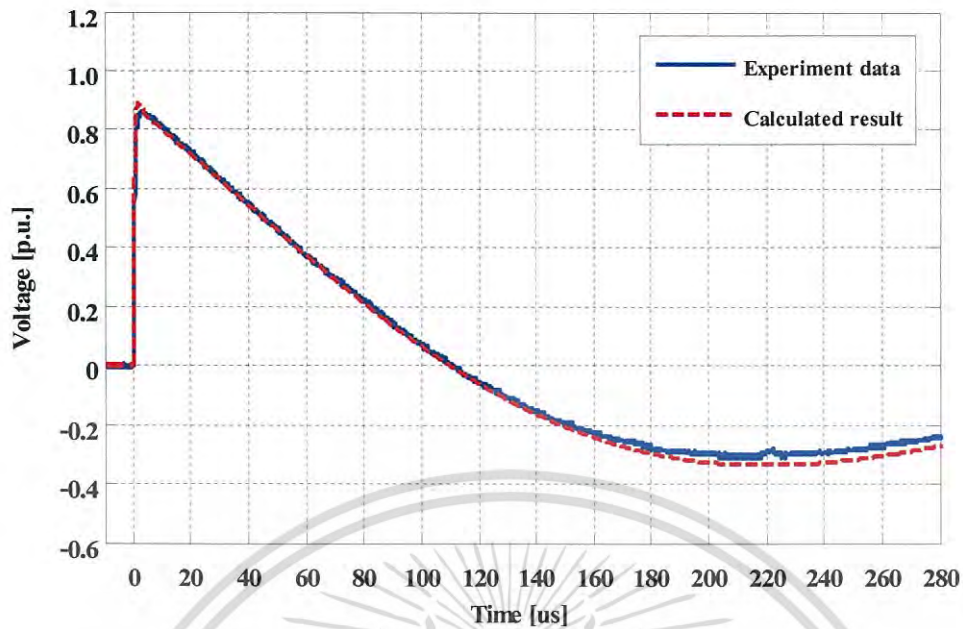


ข) รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นขยายหน้าคลื่น

รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในกรณีที่ 2

จากผลการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า ผลจากการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ค่าองค์ประกอบที่ทำการออกแบบใหม่มีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันมีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในกรณีที่ 2

4.3 การทดสอบวงจรแกแลนิงเกอร์โดยใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำการออกแบบกับอุปกรณ์จริง

ในการทดสอบจะเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความเหนี่ยวนำอยู่ในขอบเขต $0.4 \text{ mH} \leq L \leq 4 \text{ mH}$

ในการทดสอบใช้หม้อแปลงแยกชุด (Isolating transformer) ที่ใช้ในระบบ 220V ที่มีค่าความเหนี่ยวนำโหลด 2.888 mH และค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 30 pF เพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการวิเคราะห์ก่อนหน้าจึงทำการต่อขนานตัวเก็บประจุโหลดที่มีค่า 8.5 nF เพื่อให้สามารถใช้ตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการได้ (55 Ω) และใช้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าต่างๆ ดังตารางที่ 3.2 กรณีที่ 2 หรือตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

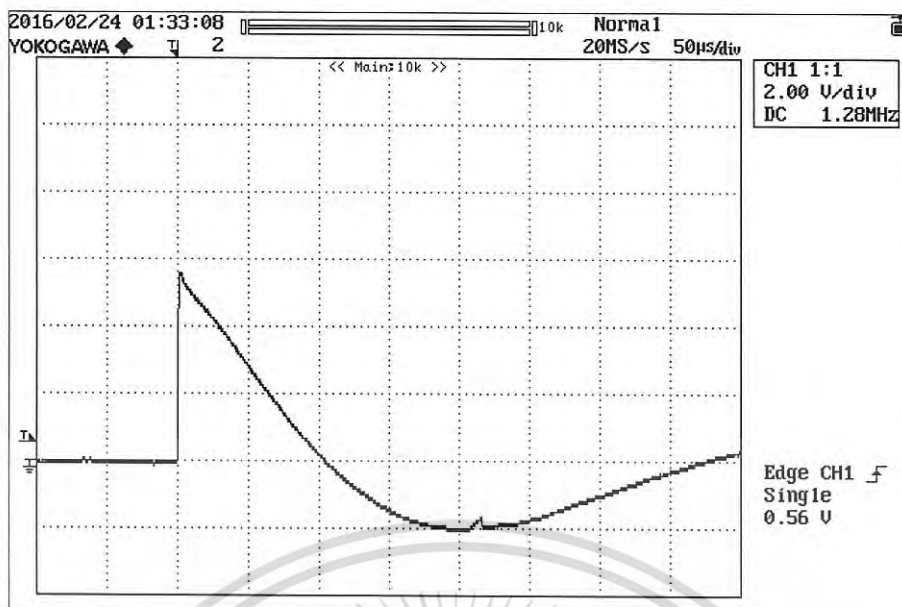
องค์ประกอบทางไฟฟ้า	ค่าที่เลือกใช้
L_L (mH)	2.888
C_b (nF)	8.5
C_s (μ F)	2
R_d (Ω)	55
L_d (μ H)	250
R_p (Ω)	517
R_e (Ω)	70

ซึ่งผลการทดสอบพบว่าค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด โดยที่เวลาหลังคลื่นมีค่า 51.67 μ s และมียอดแรงดันกลับขั้วน้อยกว่า 50% ของแรงดันสูงสุด ซึ่งแสดงรูปวงจรการทดสอบในรูปที่ 4.6 และผลการทดสอบในรูปที่ 4.7

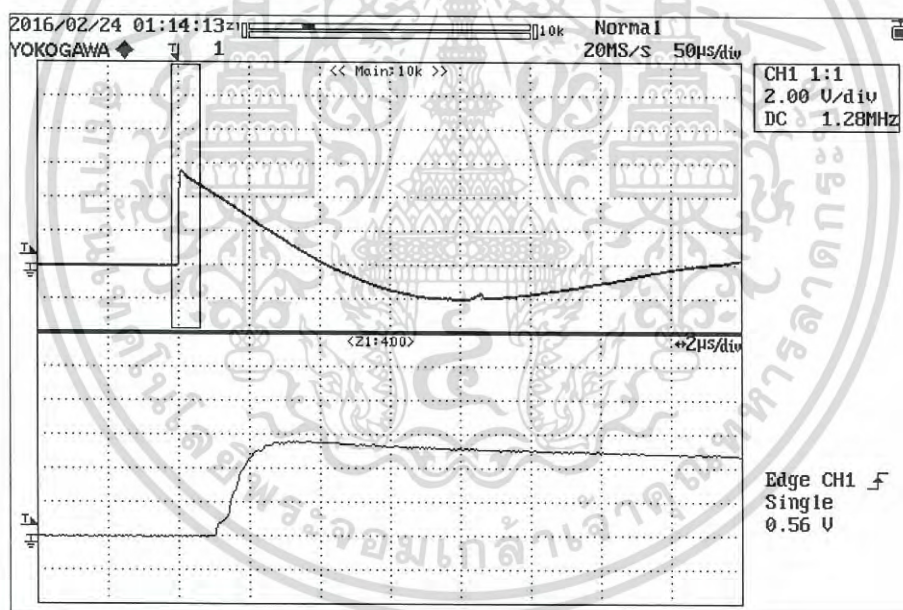


รูปที่ 4.6 วงจรการทดสอบในห้องปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
เมื่อทดสอบหม้อแปลงแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) รูปคลื่นเต็ม

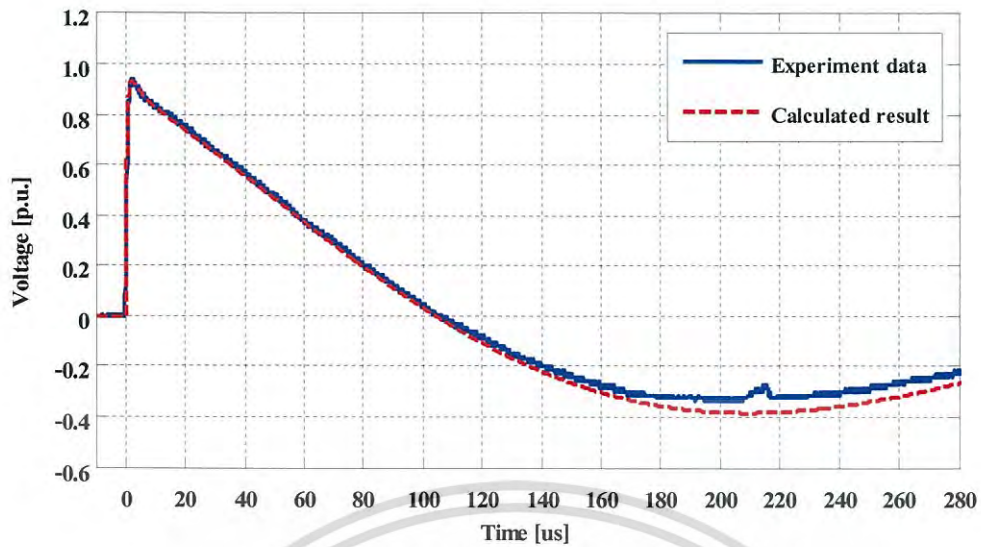


ข) รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นขยายหน้าคลื่น

รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้ากับโหลดหม้อแปลง

จากผลการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า ผลจากการทดสอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ค่าองค์ประกอบที่ทำการออกแบบใหม่มีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันมีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบหม้อแปลงเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ออกแบบ วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ฟาผ่า สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ผลสรุปดังนี้

1) จากการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับค่าองค์ประกอบที่ Feser นำเสนอเมื่อทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากัน พบว่าค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่นำเสนอสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่าตามมาตรฐานกำหนด ตามที่แสดงในรูปที่ 3.2 โดยได้ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ คือ ค่าเวลาน้ำคลื่นมีค่า $1.04 \mu\text{s}$ เวลาหลังคลื่นมีค่า $45.27 \mu\text{s}$ มีค่าแรงดันยอดกลับซ้ำ 47.26% ของแรงดันยอดสูงสุด และมีประสิทธิภาพ 85.36% ซึ่งการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่นำเสนอใหม่มีความแม่นยำกว่าการใช้ องค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ Feser เคยนำเสนอ แสดงค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันดังแสดง ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟาผ่า

ค่าองค์ประกอบ รูปคลื่นแรงดัน	มาตรฐาน	บทความที่ Feser นำเสนอ		ใช้ค่า องค์ประกอบ ที่ออกแบบใหม่
		จากการคำนวณ	ค่าองค์ประกอบ ตามบทความ	
เวลาน้ำคลื่น (Front time)	$0.84 \mu\text{s} - 1.56 \mu\text{s}$	$0.68 \mu\text{s}$	$1.5 \mu\text{s}$	$1.04 \mu\text{s}$
เวลาหลังคลื่น (Time to half)	$40 \mu\text{s} - 60 \mu\text{s}$	$30 \mu\text{s}$	$38.11 \mu\text{s}$	$45.27 \mu\text{s}$
ส่วนพุ่งเกิน (Over shoot)	$\leq 5\%$	20%	2.63%	0.83%
ยอดกลับซ้ำ (Under shoot)	$\leq 50\%$	47.64%	44.65%	47.26%

2) จากการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำที่ อยู่ระหว่าง 0.4 mH ถึง 4 mH พบว่าจะได้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่เหมาะสมตามตารางที่ 3.3 ใน หัวข้อที่ 3.3 และค่าองค์ประกอบของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อยู่ในขอบเขตตามมาตรฐานกำหนด ดังแสดงผลสรุปในตารางที่ 3.4 และจากการทดสอบวงจรในหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งเวลาหน้าคลื่นอยู่ในช่วง $0.84 \mu\text{s} - 1.56 \mu\text{s}$ เวลาหลังคลื่นอยู่ในช่วง $40 \mu\text{s} - 60 \mu\text{s}$ มีแรงดันยอดคลื่นขั้วน้อยกว่า 50% ของแรงดันสูงสุด

3) จากการออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำที่ต่ำกว่า 0.4 mH โดยจำลองโหลดค่าความเหนี่ยวนำมีค่า 0.2 mH และได้ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าตามตารางที่ 3.5 ซึ่งผลการจำลองรูปคลื่นโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีรูปคลื่นอยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด แต่ประสิทธิภาพของวงจรแรงดันอิมพัลส์ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 80% แต่มีค่ามากกว่า 60%

4) จากการทดสอบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ออกแบบใหม่เมื่อทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่า แรงดันอิมพัลส์ที่ได้มีค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด และมีประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันที่สูง

จากวิธีการหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ออกแบบขึ้นสามารถนำไปใช้สร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อทดสอบกับโหลดชนิดค่าความเหนี่ยวนำต่ำได้ ยกตัวอย่างเช่น หม้อแปลงกำลังที่มีขนาดใหญ่ หม้อแปลงในระบบจำหน่าย ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ ขดลวดเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ เป็นต้น ซึ่งแรงดันที่สร้างได้จะถูกต้องและอยู่ในขอบเขตตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ ซึ่งจะทำให้ผู้ที่ใช้อุปกรณ์เหล่านี้มีความเชื่อมั่น และมั่นใจมากยิ่งขึ้นในการใช้งานอุปกรณ์ที่ผ่านการทดสอบแล้ว

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ค่าที่ได้จากการคำนวณในบางครั้งไม่สามารถนำมาสร้างค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าได้ ซึ่งต้องมีการปรับค่าให้เหมาะสม และสามารถหาได้จริงในทางปฏิบัติ
- 2) ค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรจะต้องบริสุทธิ์ ยกตัวอย่างเช่น ตัวต้านทานจะต้องมีเฉพาะค่าความต้านทานไม่มีค่าความเหนี่ยวนำแฝงอยู่ เป็นต้น
- 3) การทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. มีข้อจำกัดในการใช้ตัวเก็บประจุอัดประจุที่มีค่าสูง สำหรับการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่าต่ำมากๆ จึงไม่สามารถทำการทดสอบได้ ซึ่งห้องปฏิบัติการที่มีศักยภาพเพียงพออาจจะทำการทดสอบได้
- 4) ในการทดสอบกับหม้อแปลงบางตัวอาจมีค่าความเหนี่ยวนำที่ต่ำมาก ซึ่งต้องยอมลดประสิทธิภาพของวงจรการทดสอบลง และเพิ่มค่าแรงดันอัดประจุแทน

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Publication 60060-1, High-voltage Test Techniques. Part 1: General Definitions and Test Requirements, 3rd ed., Sep., 2010.
- [2] IEEE Standard 4TM-2013, IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques, 2013.
- [3] P. Glaninger, “Impulse Testing of Low Inductance Electrical Equipment”, 2nd International Symposium on High Voltage Technology, Zurich, pp. 140-144, 1975.
- [4] K. Feser, “Circuit Design of Impulse Generators for the Lightning Impulse Voltage Testing of Transformers”, www.haefely.com., 2015.
- [5] W. Schrader and W. Schufft, “Impulse Voltage Test of Power Transformers”, paper No. 13, Workshop 2000, Alexandria, Virginia, Sep., 2000.
- [6] Dieter Kind and Kurt Feser, High-voltage Test Techniques, Newnes, P.45, 2001.
- [7] M S Naidu and V Kamaraju, High Voltage Engineering, Ed 4th, McGraw Hill Education, New Delhi, P.181, 2009.
- [8] Anitya Kumar Shukla and Ranjana Singh, “Analysis of Inductance Front Controlled Impulse Voltage Generator Circuit By MATLAB Simulink”, International Journal of Engineering Research and Reviews, Vol.2, pp.51-55., 2014., www.researchpublish.com.
- [9] ดร.สำราญ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี 2547.
- [10] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals, 2nd ed., Newnes, August, 2000.
- [11] MEA, ร่างขอบเขตงาน (Terms of Reference : TOR), “ข้อกำหนดรายละเอียดหม้อแปลงจำหน่าย”, การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.), ปี 2557.
- [12] IEC Publication 60076-3, Power Transformers. Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air, 2nd ed., Mar., 2000.
- [13] IEC Publication 60076-4, Power Transformers. Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power Transformers and reactors, 1st ed., Jun., 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Piyapon TUETHONG, Perawut YUTTHAGOWITH, and Sakda MANEEROT, “Design and Construction of a Variable air-core Inductor for Lightning Impulse Voltage Test on Low-Inductance Loads”, The International Conference on Electrical Engineering 2016(IECC2016 Okinawa), Okinawa, Japan, July 3-7, 2016., ID-90267.
- [15] B. Karthikeyan, R. Rajesh, M. Balasubramanian, and S. Saravanan, “Experimental investigations on IEC suggested methods for improving waveshape during impulse voltage testing”, 2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials, Bali, June, 2006.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

มาตรฐาน IEC 60060-1 (2010)

- Test with lightning-impulse voltage



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7 Tests with lightning-impulse voltage

7.1 Definitions for lightning-impulse voltage tests

7.1.1

impulse voltage

intentionally applied aperiodic transient voltage, which usually rises rapidly to a peak value and then falls more slowly to zero

NOTE For special purposes, impulses having approximately linearly rising fronts or transients of oscillating or approximately rectangular form are used.

7.1.2

lightning-impulse voltage

impulse voltage with a front time less than 20 μ s

7.1.3

full lightning-impulse voltage

lightning-impulse voltage, which is not interrupted by a disruptive discharge (see Figure 5)



Figure 5 – Full lightning-impulse voltage

7.1.4

overshoot

increase of amplitude of an impulse voltage due to a damped oscillation at the peak caused by the circuit

NOTE Such oscillations (frequency range usually 0,1 MHz to 2 MHz) are caused by circuit inductance and sometimes cannot be avoided in large circuits or for inductive test objects. Methods for evaluation of overshoot are given in Annex B.

7.1.5

recorded curve

graphical or digital representation of the test data of an impulse voltage

7.1.6

base level

level of a record of an impulse measuring system when there is zero input to the recording instrument

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.7**base curve**

estimate of a full lightning-impulse voltage without a superimposed oscillation (see Annex B)

7.1.8**residual curve**

$R(t)$

difference between the recorded curve and the base curve (see Annex B)

7.1.9**extreme value**

U_e

maximum value of the recorded curve measured from the base level in the same sense as the applied impulse

7.1.10**base curve maximum**

U_b

maximum value of the base curve

7.1.11**test voltage function**

amplitude-frequency function which is defined to represent the response of insulation to impulses with overshoot. It is given by:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2f^2}$$

where f is the frequency in MHz (see Figure 6).

NOTE 1 Different test voltage curves for different types of insulation may be specified by the relevant Technical Committee when more test data becomes available.

NOTE 2 Applying this function as a filter to the residual voltage curve allows the calculation of the value of the test voltage of the equivalent full lightning-impulse voltage (see Annex B, Annex C and Annex D).

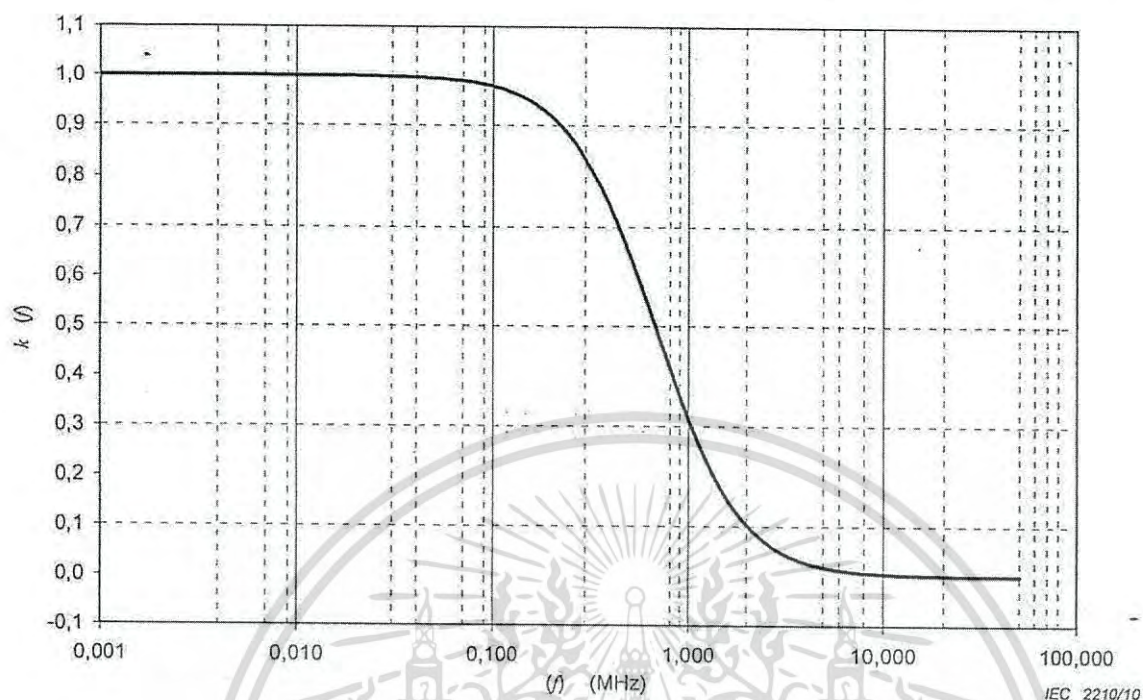


Figure 6 – Test voltage function

7.1.12

filtered residual curve

$R_f(t)$

residual curve filtered by the test voltage function

7.1.13

test voltage curve

summation of the base curve and the filtered residual curve

NOTE This is a mathematical representation of the filtering process and is not a physical entity or an equivalent impulse.

7.1.14

equivalent smooth impulse

estimated lightning-impulse voltage without overshoot having a peak value equal to the maximum value of the test voltage curve and the same front time and time to half-value as the related test voltage curve

NOTE An equivalent smooth impulse has the same dielectric breakdown behaviour as the recorded curve.

7.1.15

value of the test voltage

U_t

maximum value of the test voltage curve measured from the base level in the same sense as the applied impulse

7.1.16

overshoot magnitude

β

difference between the extreme value of the recorded curve and the maximum value of the base curve

เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่วางกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.17

relative overshoot magnitude

β'
ratio of the overshoot magnitude to the extreme value, usually expressed as a percentage

7.1.18

front time

T_1
virtual parameter defined as 1/0,6 times the interval T between the instants when the impulse is 30 % and 90 % of the peak value on the test voltage curve (points A and B, Figure 7)

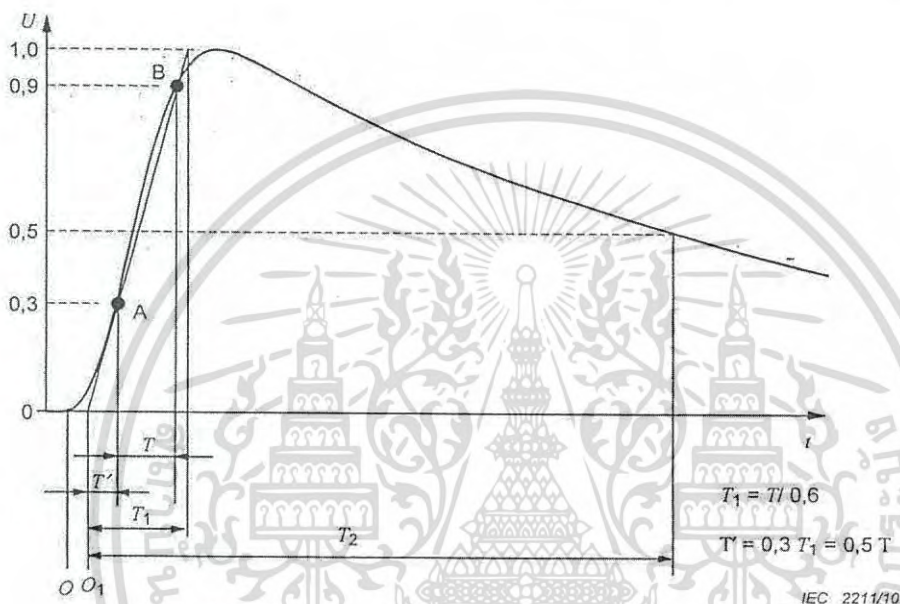


Figure 7 – Full impulse voltage time parameters

7.1.19

virtual origin

O_1
instant preceding that corresponding to point A, of the test voltage curve (see Figure 7) by a time $0,3 T_1$

NOTE For records having linear time scales, this is the intersection with the time axis of a straight line drawn through the reference points A and B on the front.

7.1.20

average rate of rise

slope of the best fitting straight line, calculated from the recorded curve, using all the data points between the 30 % and 90 % of the extreme value levels and usually expressed in kilovolts per microsecond

NOTE In the case of noise or oscillations at the 30 % and 90 % levels, the data set is bounded by the first point after the last crossing of the 30 % level and by the last point before the first crossing of the 90 % level.

7.1.21

peak time

T_e
extreme value, U_e , divided by the average rate of rise

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.22

time to half-value

 T_2

virtual parameter defined as the time interval between the virtual origin, O_1 , and the instant when the test voltage curve has decreased to half the test voltage value (see Figure 7)

7.1.23

voltage time interval

 T_λ

time interval for which the recorded curve exceeds λU_e where $0 < \lambda < 1$ (see Figure 8)

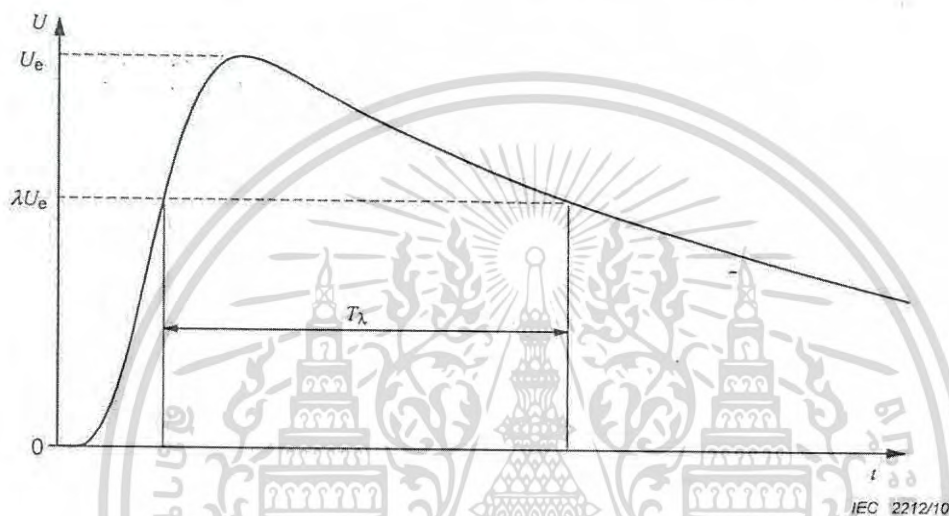


Figure 8 – Voltage time interval

7.1.24

voltage integral

integral of the recorded curve with respect to time over a specified time interval (see Figure 9).

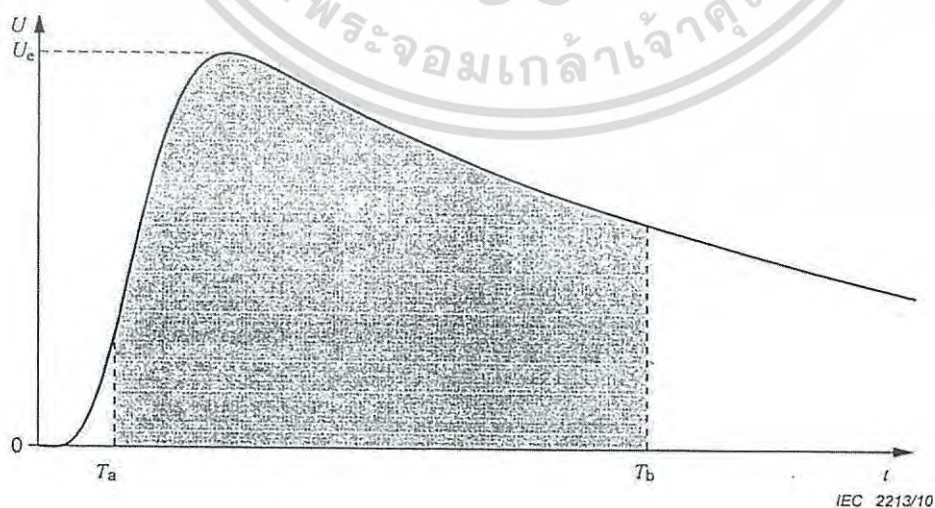


Figure 9 – Voltage integral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.25**chopped lightning-impulse voltage**

lightning-impulse voltage during which a disruptive discharge causes a rapid collapse of the voltage, practically to zero value (see Figure 10 to Figure 12).

7.1.26**instant of chopping**

instant at which the extrapolation of the line between the 70 % and 10 % points (C and D) on the voltage collapse crosses the level immediately before the collapse (see Figure 10 and Figure 11).

7.1.27**time to chopping**

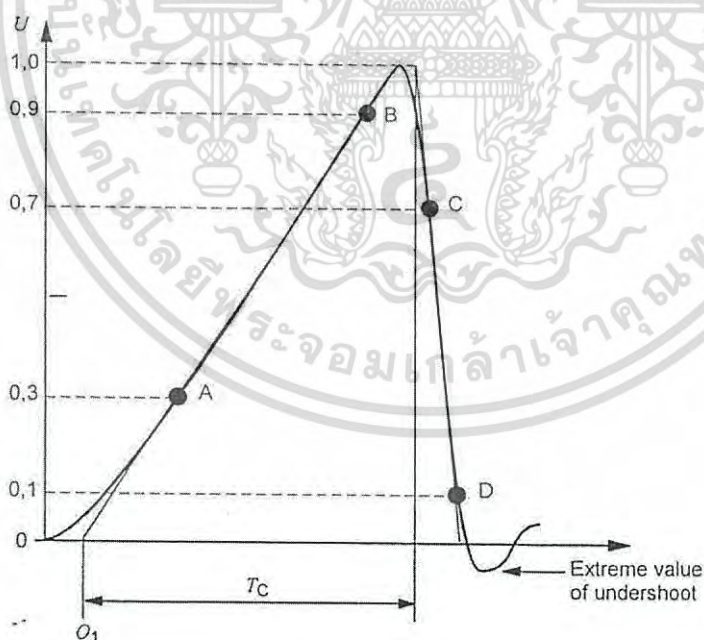
T_C
virtual parameter defined as the time interval between the virtual origin O_1 and the instant of chopping (see Figure 10 and Figure 11).

7.1.28**characteristics related to the voltage collapse during chopping**

two points C and D at 70 % and 10 % of the voltage immediately before the voltage collapse (see Figure 11)

NOTE 1 The duration of the voltage collapse is defined as 1/0,6 times the time interval between points C and D. The steepness of the voltage collapse is the ratio of the voltage at the instant of chopping to the duration of voltage collapse.

NOTE 2 The use of points C and D is for definition purposes only; it is not implied that the duration and steepness of chopping can be measured with any degree of accuracy using conventional measuring systems.



IEC 2214/10

Figure 10 – Lightning-impulse voltage chopped on the front

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

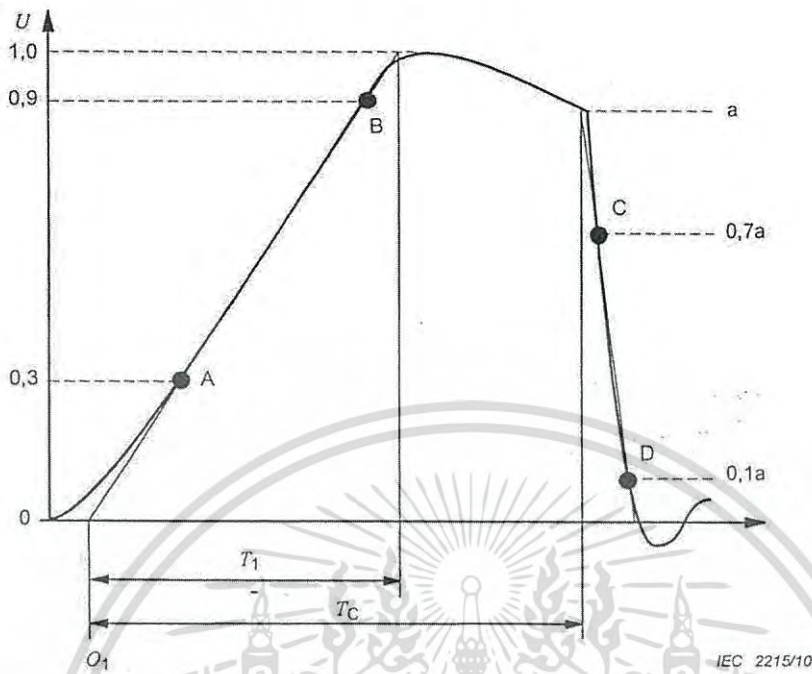


Figure 11 – Lightning-impulse voltage chopped on the tail

7.1.29

extreme value of the undershoot of an impulse
 maximum amplitude measured from the base level in the opposite sense to the applied impulse (see Figure 10).

7.1.30

linearly rising front-chopped impulse
 voltage rising with approximately constant steepness, until it is chopped by a disruptive discharge

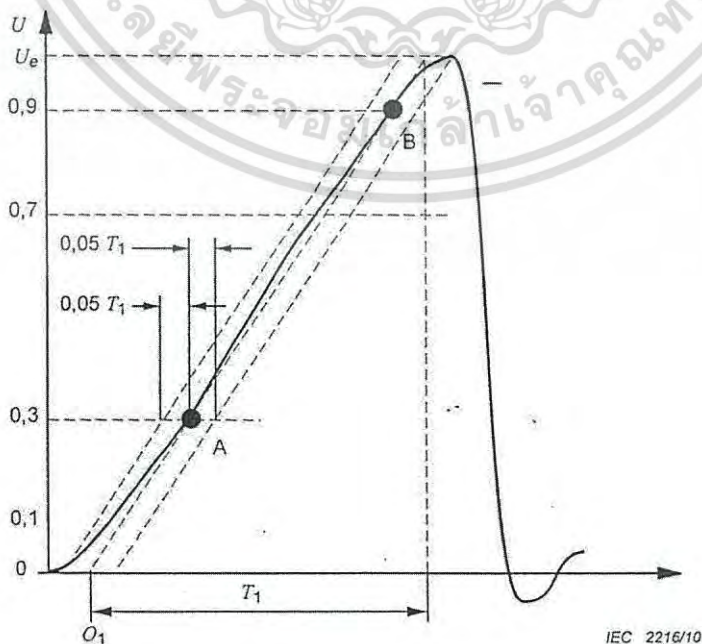


Figure 12 – Linearly rising front chopped impulse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่วาทกรรมใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NOTE 1 To define such an impulse, the best fitting straight line is drawn through the part of the front between 30 % and 90 % of the peak magnitude; the intersections of this with the 30 % and 90 % voltage values then being designated A and B, respectively (see Figure 12).

The impulse is defined by:

- the maximum voltage U_e ;
- the front time T_1 and
- the virtual steepness S : $S = U_e/T_1$.

This is the slope of the straight line drawn through the points A and B, usually expressed in kilovolts per microsecond.

This chopped impulse is considered to be approximately linearly rising if the front, from 30 % amplitude up to the instant of chopping, is entirely enclosed between two lines parallel to the line AB, but displaced from it in-time by $\pm 0,05 T_1$ (see Figure 12).

NOTE 2 The value and the tolerance on the virtual steepness S should be specified by the relevant Technical Committee.

7.1.31

Definitions for-voltage/time curves

7.1.31.1

voltage/time curve for linearly rising impulse voltage curve relating the discharge voltage to the front time T_1

NOTE The curve is obtained by applying impulse voltages of different steepness (see Figure 13).

7.1.31.2

voltage/time curve for impulse voltage of constant prospective shape curve relating the disruptive-discharge voltage of the test object to the time to chopping, which may occur on the front, at the peak or on the tail

NOTE The curve is obtained by applying impulse voltages with different prospective peak values (see Figure 13).

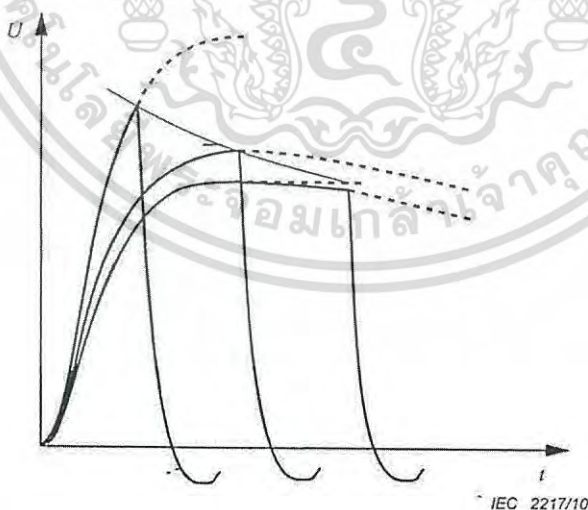


Figure 13 – Voltage/time curve for impulses of constant prospective shape

7.2 Test voltage

7.2.1 Standard lightning-impulse voltage

The standard lightning-impulse voltage is a smooth full lightning-impulse voltage having a front time of $1,2 \mu\text{s}$ and a time to half-value of $50 \mu\text{s}$ and described as a 1,2/50 impulse.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.2 Tolerances

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the following differences are accepted between specified values for the standard impulse and those calculated from the test voltage curve:

- Test voltage value: $\pm 3\%$.
- Front time: $\pm 30\%$.
- Time to half-value: $\pm 20\%$.

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the relative overshoot magnitude shall not exceed 10 %.

For certain test circuits and test objects, standard waveshapes within the stated tolerances may be impossible to realise. In such cases extension of front time T_1 or overshoot may be necessary. Guidance for such cases should be given by the relevant Technical Committee.

NOTE The peak time, T_e , the voltage time interval, T_i and the voltage integral are parameters under consideration for alternate characterization of lightning-impulse voltages. Values may be assigned by the relevant Technical Committee.

7.2.3 Standard chopped lightning-impulse voltage

This is a standard impulse chopped by an external gap with a time-to-chopping value between 2 μs to 5 μs .

Other times to chopping may be specified by the relevant Technical Committee. The duration of voltage collapse should be much faster than the front time of the impulse and limits may be set by the relevant Technical Committee. The requirements for measurement and the associated uncertainties are given in IEC 60060-2.

7.2.4 Special lightning-impulse voltages

In some cases oscillating lightning-impulse voltages may be applied. This offers the possibility of producing impulses with shorter front times or with extreme values corresponding to a generator efficiency greater than 1.

NOTE For details see IEC 60060-3.

7.2.5 Generation of the test voltage

The impulse is usually produced by an impulse generator consisting essentially of a number of capacitors that are charged in parallel from a direct voltage source, then switched into series and discharged into an impulse-forming circuit that includes the test object.

7.2.6 Measurement of the test voltage and determination of impulse shape

The measurement of the test voltage value, the time parameters and the overshoot or oscillations on the test voltage shall be made with approved measuring systems (see IEC 60060-2). The measurement shall be made with the test object in the circuit and, in general, the impulse shape shall be checked for each test object. Where a number of test objects of the same design and size are tested under identical conditions, the shape needs only to be verified once.

For a chopped lightning impulse the collapse can occur on the front, at the peak or on the tail. For a front chopped lightning-impulse voltage the test voltage curve is the recorded curve. Impulses chopped on the tail are treated as full waves for the evaluation of test voltage and front time, which can be determined from reduced voltage impulses (e.g. $\leq 50\%$) that do not cause chopping. The chopping can be accomplished by an external chopping gap or may occur due to a disruptive-discharge in the internal or external insulation of the test object.

With some test objects or test arrangements there may be a flattening of the peak or a rounding off of the voltage before the final voltage collapse. Similar effects may also be observed due to the imperfections of the measuring system. Exact determination of the parameters related to chopping requires the presence of both a sharp discontinuity and a fast measuring system. Other cases are left to the relevant Technical Committees for consideration.

Determination of the impulse shape by calculation from the test circuit parameters is not considered to be satisfactory.

7.2.7 Measurement of current during tests with impulse voltages

The relevant Technical Committee shall specify the characteristics of a current flowing in the test object that should be measured during tests with high impulse voltages. When this type of measurement is used for comparative purposes wave shape is of importance and the measurement of the absolute value of this current may be of lesser importance. For guidance see IEC 62475.

7.3 Test procedures

7.3.1 Withstand voltage tests

The recommended test procedure depends on the nature of the test object, as defined in 3.5. The relevant Technical Committee shall specify which procedure shall be applied. In procedures A, B and C the voltage applied to the test object is only the specified withstand value, while in procedure D several voltage levels have to be applied.

NOTE The statistical precision of the procedures is different, but for insulation coordination (IEC 60071) it is assumed that the outcome of the tests is identical.

7.3.1.1 Withstand voltage test: Procedure A

Three impulses of the specified shape and polarity at the specified withstand voltage level are applied to the test object. The requirements of the test are satisfied if no indication of failure is obtained, using methods of detection specified by the relevant Technical Committee.

NOTE This procedure is recommended for tests on degradable or non-self-restoring insulation.

7.3.1.2 Withstand voltage test: Procedure B

Fifteen impulses of the specified shape and polarity at the specified withstand voltage level are applied to the test object. The requirements of the test are satisfied if not more than two disruptive discharges occur in the self-restoring part of the insulation and if no indication of failure in the non-self-restoring insulation is obtained by the detection methods specified by the relevant Technical Committee.

NOTE If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, it could be taken as an indication that no failure has happened in the non-self-restoring insulation, when the last three impulses have not led to a disruptive discharge. In case of a disruptive discharge at one of the impulse numbers 13 to 15, up to three additional pulses can be applied (maximum 18). When no further disruptive discharge occurs, the test object has passed the test.

7.3.1.3 Withstand voltage test: Procedure C

Three impulses of the specified shape and polarity at the specified withstand voltage level are applied to the test object. If no disruptive discharge occurs the test object has passed the test. If more than one disruptive discharge occurs the test object has failed to pass the test. If one disruptive discharge occurs in the self-restoring part of the insulation, then nine additional impulses are applied and if no disruptive discharge occurs the test object has passed the test.

If any detection of failure in a non-self-restoring part of insulation is observed with the detection methods specified by the relevant Technical Committee during any part of the test, the test object has failed to pass the test.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.1.4 Withstand voltage test: Procedure D

For self-restoring insulation the 10 % impulse disruptive-discharge voltage U_{10} , may be evaluated by using statistical test procedures described in Annex A.

These test methods permit either direct evaluation of U_{10} , and U_{50} or indirect evaluation of U_{10} .

In the latter case U_{10} is derived from the U_{50} value using the relationship:

$$U_{10} = U_{50}(1 - 1,3s)$$

The relevant Technical Committee shall specify the value to be assumed for the standard deviation s of the disruptive-discharge voltage. For dry tests on air insulation, without any other insulation involved, the per-unit value $s = 0,03$ can be used.

The test object is deemed to be satisfactory if U_{10} is not less than the specified impulse withstand voltage.

The following test methods can be used to evaluate U_{50} :

- the multiple-level method (see Clause A.1.1) with $m \geq 4$ voltage levels, and $n_i \geq 10$ impulses per level;
- the up-and-down method (see Clause A.1.2) with $n = 1$ impulse per group and $m \geq 20$ useful applications.

To evaluate U_{10} the up-and-down withstand method, with $n = 7$ impulses per group and at least eight useful groups, can be used.

In all cases the voltage interval between levels ΔU should be approximately from 1,5 % to 3 % of the estimated value of U_{50} .

7.3.2 Procedures for assured disruptive-discharge voltage tests

The procedures for an assured disruptive-discharge voltage test are similar to those described in 7.3.1 with the appropriate changes between discharge and withstand conditions.

The relevant Technical Committee may also specify other procedures for specific test objects.

8 Tests with switching-impulse voltage

8.1 Definitions for switching-impulse voltage tests

8.1.1

switching-impulse voltage

impulse voltage with a front time of 20 μ s or longer

8.1.2

value of the test voltage

maximum value, if not otherwise specified by the relevant Technical Committee

8.1.3

time to peak

T_p
time interval from the true origin to the time of maximum value of a switching-impulse voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาหรือสิทธิบัตรของ IEC หรือ IEC ภูมิภาคใด ๆ ไม่สามารถนำมาใช้
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

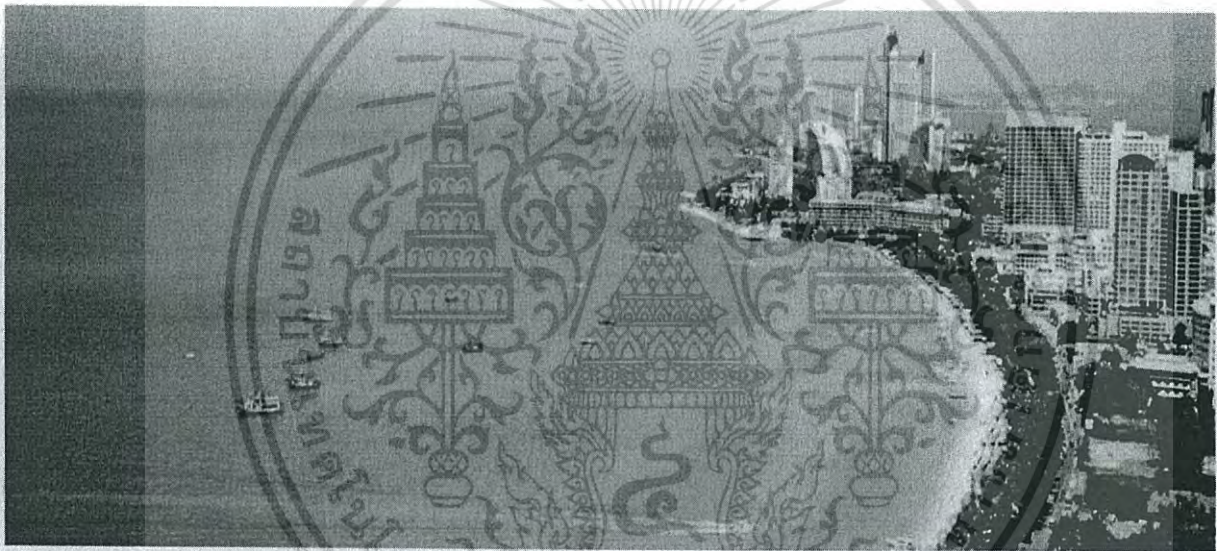
ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. S.Noinor, P.Yutthagowith, N.Pattanadech "Glaninger Circuit Design Used in Impulse Voltage Test for Low Inductance Loads", The 9th International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures (ISET 2015), PP.68-71, Chonburi, Thailand, November 26-27, 2015
2. S. Noimor and P. Yutthagowith, "Lightning Impulse Voltage Generation Circuit for Low Inductive Loads", The First International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH 2015), PP.91-94, Bangkok, Thailand, June 12 – 13, 2015.

ISET / ISS 2015 – PATTAYA
The 9th International Symposium on
EMC and Transients in Infrastructures
The 11th International Student Session

26 - 27 November 2015
Ambassador City Jomtien, Chonburi, Thailand



Organized by

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

In Cooperation with

Doshisha University, Kyoto, Japan

Chubu University, Kasugai, Japan

Tsuruoka National College of Technology, Tsuruoka, Japan

University of Bologna, Bologna, Italy

Seoul National University, Seoul, Korea

Federal Institute of Technology Lausanne, Switzerland

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Glaninger Circuit Design Used in Impulse Voltage Test for Low Inductance Loads

S. Noimor, P. Yutthagowith, and N. Pattanadech

Abstract—This paper presents the circuit parameter design of the Glaninger circuit used in impulse voltage test for obtaining lightning impulse voltage according to the IEC60060-1 standard when low inductance loads, such as low voltage winding of transformer and air core reactor, was tested. The standard defines the lightning impulse voltage waveform parameters and tolerance as follows. Front time (T_1) is $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ and time to half (T_2) is $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ and under-shoot voltage must be less than 50% of the peak voltage. From the experiment, it was found that Glaninger circuit is able to generate the impulse voltage according to the standard requirement when low inductance load was tested. However, the Glaninger's circuit parameters choosing method which was introduced by Glaninger was not clear. Therefore, this paper presents the systematic parameters calculation of lightning impulse voltage generator using Glaninger circuit. To verify the designed parameters, the designed parameters were simulated by computer program and practically tested in high voltage laboratory.

Keywords— Impulse voltage generator, Glaninger's circuit, Low inductance loads, Lightning impulse voltage tests.

I. INTRODUCTION

MOST electrical equipment used in the electrical power system is installed outdoors, so the electrical equipment may be damaged by overvoltage, especially overvoltage caused by lightning phenomena. To ensure that the equipment can withstand impulse voltage according to the designed insulation coordination, the standard [1] then requires withstand lightning impulse voltage test before installing the equipment in service.

Lightning impulse voltage is simulated from overvoltage caused by lightning phenomena. Generally, the lightning impulse voltage is generated by the conventional impulse generation circuit, Marx's circuit, which uses the relationship of charging capacitance (C_s), load capacitance (C_b), damping series resistance (R_d) and parallel resistance (R_e). According to standards [2], [3], generated lightning impulse voltage

This work was supported in part by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Funding No. KREF055706 and by the Thailand Research Fund under grant No. IRG5780006.

S. Noimor, P. Yutthagowith, and N. Pattanadech are with the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520 (kypeeraw@kmitl.ac.th).

waveform must be $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ for front time (T_1) and $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ for time to half (T_2).

Normally, the manufacturer designs the impulse voltage generator by mainly considering capacitance of load because most equipment in high voltage engineering field is assumed to be a capacitance load, but in the real condition there is still inductance load. When equipment under test is considered to be a capacitance load, the parallel resistance (R_e) value and the damping series resistance (R_d) value can be adjusted to improve impulse voltage waveform to be according to the standard [2] requirement, but if equipment under test is considered to be low inductance load, the same method to improve impulse voltage waveform will be no longer available.

Therefore, this paper aims to present the parameters design of lightning impulse voltage generator using Glaninger circuit which is capable for low inductance load ($4 \text{ mH} \geq L > 0.4 \text{ mH}$) [4]. Adjusting the parallel resistance (R_e) value, adding the additional inductance (L_d) to damping series resistance (R_d), and adding the additional parallel resistance (R_p) to the load are performed to improve the lightning impulse voltage waveform to be according to the standard [2] requirement.

II. THEORY

A. Conventional lightning impulse voltage generation circuit

Commonly, lightning impulse voltage which is used in high voltage test is generated by conventional lightning impulse voltage generation circuit, Marx's circuit [5]. For the circuit, there are a charging capacitance (C_s) for absorbing energy, a damping series resistance (R_d), a parallel resistance (R_e) and a load capacitance (C_b) in the circuit, and the efficiency of the circuit will depend on the voltage supplied to the circuit. For the lightning impulse voltage generated by the conventional circuit, front time (T_1) will be controlled by the damping series resistance (R_d) and the load capacitance (C_b), and time to half (T_2) will be controlled by the parallel resistance (R_p) and the charging capacitance (C_s). Both front time and time to half must be according to the standard [2] requirement. Front time (T_1) and time to half (T_2) can be calculated by eq. (1) and (2), respectively.

$$T_1 = k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (1)$$

$$T_2 = k_1 R_e (C_b + C_s) \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

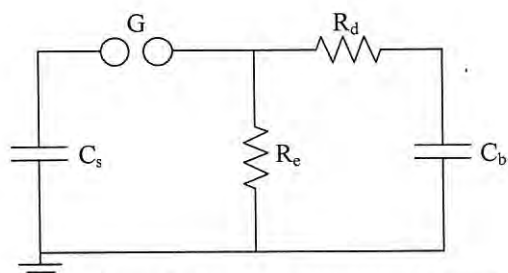


Fig. 1. Conventional equivalent impulse voltage generation circuit.

B. Glaninger circuit

Glaninger circuit [6] is developed from the conventional impulse generation circuit for generating impulse voltage in impulse voltage test with low inductance load. Glaninger circuit composes of a charging capacitance (C_s), a damping series resistance (R_d), a parallel resistance (R_e), an additional inductance (L_d) and an additional parallel resistance (R_p).

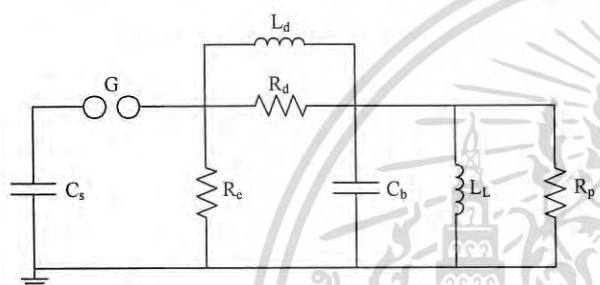


Fig. 2. Glaninger circuit.

The problem of the conventional circuit for testing with low inductance load is that the time to half (T_2) of the generated impulse voltage waveform is not under the standard [2] requirement. Therefore, to increase time to half (T_2) of the generated impulse voltage, an additional inductance (L_d) was added to the impulse generator circuit by connecting in parallel to the damping series resistance (R_d). The additional inductance (L_d) will act as low impedance at the tail part of the waveform because the tail part of the waveform is in the range of low frequency, so the charge can better flow through the parallel resistance (R_e). According to the behavior of the additional inductance (L_d), time to half (T_2) increases. However, the voltage oscillation may cause under-shoot voltage which is sometimes more than 50% of the peak voltage of the generated impulse voltage, so parallel resistance (R_e) value have to be adjusted to reduce under-shoot voltage. The additional parallel resistance (R_p) was connected in parallel to test object for reducing over shoot.

III. GLANINGER CIRCUIT DESIGN

In case of known inductance load, the minimum charging capacitance of which time to half is greater than 40 μ s can be calculated by eq. (5)

$$T = 2\pi\sqrt{L_L C_s} \tag{3}$$

$$\frac{T_2}{8} \geq 40 \times 10^{-6} \tag{4}$$

$$C_s \geq \frac{\left(\frac{320 \times 10^{-6}}{2\pi}\right)^2}{L_L} \tag{5}$$

When the load capacitance is also known by measuring or calculated from the test object, the damping series resistance (R_d) can be found by eq. (1), and if the front time and constant value (k_2) are fixed to be 1.2 μ s and 2.96, respectively, the damping series resistance (R_d) can be calculated by eq. (6).

$$R_d = \frac{0.4 \times 10^{-6}}{C_b} \tag{6}$$

The damping series resistance (R_d) will decrease the oscillation voltage or over-shoot of waveform. After charging capacitance value and damping series resistance value are known, the maximum value for parallel inductance added to damping series resistance of the impulse generator can be illustrated in eq. (7).

$$L_d \leq \frac{R_d}{10} \sqrt{L_L C_s} \tag{7}$$

In practical condition, all calculated inductance values are not available, so the inductance is selected. Typical values are 70 μ H, 100 μ H, 150 μ H, 200 μ H, 250 μ H, and 300 μ H.

After charging capacitance value, damping series resistance value, and additional inductance value are known, the additional parallel resistance (R_p) can be calculated by eq. (8),

$$1.1 \left(\frac{L_L}{L_L + L_d} \right)^2 = \frac{\left(\frac{1}{R_d}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L_d}\right)^2}{\left(\frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_p}\right)^2 + \left(\omega C_b - \frac{1}{\omega L_L} - \frac{1}{\omega L_d}\right)^2} \tag{8}$$

Where, ω is resonance angular frequency of the additional inductance (L_d) and the load capacitance (C_b).

In the impulse voltage generator design, the under-shoot voltage has to be less than 50% of impulse voltage peak value, so the parallel resistance (R_e) value have to be according to eq. (9).

$$R_e \leq 2.5 \sqrt{\frac{(L_d + L_L)}{C_s}} \tag{9}$$

IV. EXAMPLE CASES

To confirm the design procedure, five inductance loads of 4 mH and 3.164 mH with load capacitance of 8.5 nF, 1.5 mH, 1 mH, and 0.5 mH with load capacitance of 4 nF are selected as example cases of Glaninger circuit used in lightning impulse voltage test. The design circuit components calculated by the proposed procedure explained in the previous section are given in Table I.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE I
CIRCUIT COMPONENTS

Case	C_s (μ F)	R_d (Ω)	L_d (μ H)	R_p (Ω)	R_e (Ω)
1) $L_L = 4$ mH $C_b = 8.5$ nF	1	50	300	500	150
2) $L_L = 3.164$ mH $C_b = 8.5$ nF	2	55	250	517	70
3) $L_L = 1.5$ mH $C_b = 4$ nF	4	113	150	400	30
4) $L_L = 1$ mH $C_b = 4$ nF	6	113	150	300	20
5) $L_L = 0.5$ mH $C_b = 4$ nF	12	113	70	200	10

The simulated waveforms which used circuit components from the design circuits for five inductance loads are shown in Figs 3 to 7. For clarified expression, the waveforms are normalized by using per unit.

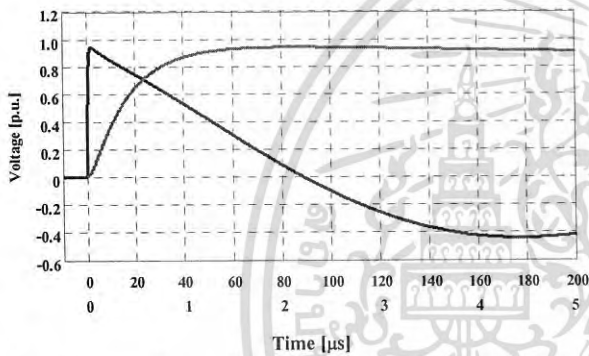


Fig. 3. Generated waveform by Glaninger circuit in Case 1.

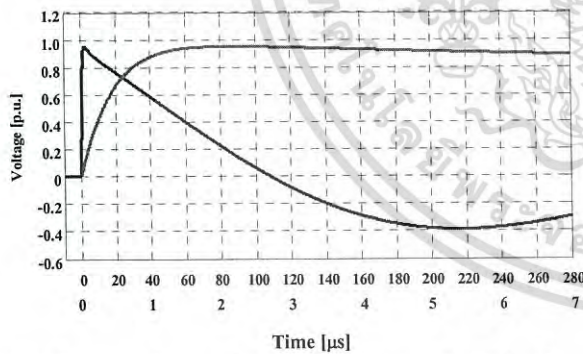


Fig. 4. Generated waveform by Glaninger circuit in Case 2.

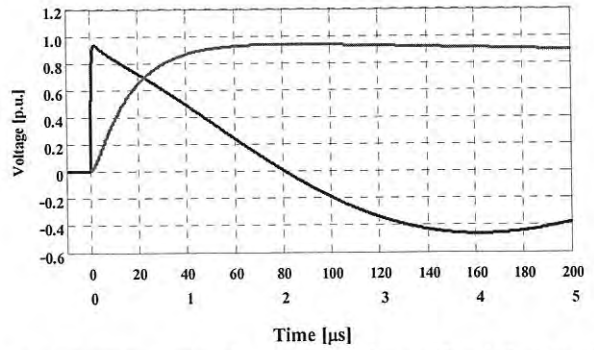


Fig. 5. Generated waveform by Glaninger circuit in Case 3.

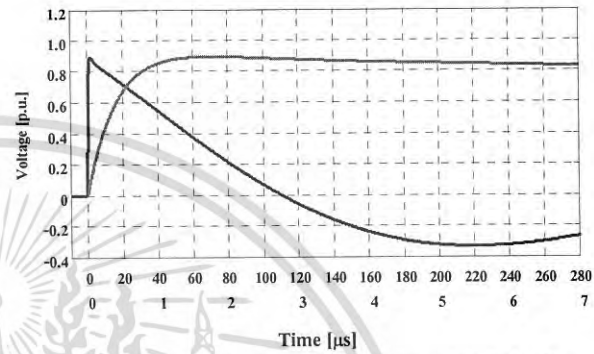


Fig. 6. Generated waveform by Glaninger circuit in Case 4.

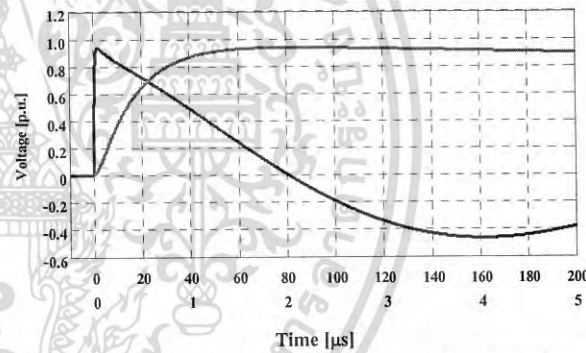


Fig. 7. Generated waveform by Glaninger circuit in Case 5.

TABLE II
SIMULATED WAVEFORM PARAMETERS

Case	Efficiency (%)	Front time T_1 (μ s)	Time to half T_2 (μ s)
1) $L_L = 4$ mH $C_b = 8.5$ nF	93.8	1.36	45.72
2) $L_L = 3.164$ mH $C_b = 8.5$ nF	95.1	1.30	51.93
3) $L_L = 1.5$ mH $C_b = 4$ nF	94.6	1.16	48.59
4) $L_L = 1$ mH $C_b = 4$ nF	89.2	1.11	51.86
5) $L_L = 0.5$ mH $C_b = 4$ nF	91.8	1.00	49.45

The waveform parameters are followed the standard requirement. The voltage generation efficiencies are higher than 85%. The times to half (T_2) are longer than 40 μ s and the under-shoot voltages are less than 50% of peak voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้เข้าประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V. EXPERIMENT RESULTS

The actual experiment was carried out in the KMITL High voltage laboratory to confirm the design procedure. Two inductance loads of 3.164 mH with load capacitance of 8.5 nF, and 1 mH with load capacitance of 4 nF were selected as example cases of Glaninger circuit used in lightning impulse voltage test.

The inductance loads of 3.164 mH with load capacitance of 8.5 nF was used in lightning impulse test. Using the proposed procedure, the C_s , R_d , L_d , R_p , and R_e are the same as values in the second row of Table I. The recorded and simulated waveforms are compared in Fig. 8 and good agreement is observed.

The waveform parameters are according to the standard requirement. The voltage generation efficiencies are higher than 90%. The times to half are longer than 40 μ s and the under-shoot voltages are less than 40% of voltage peak.

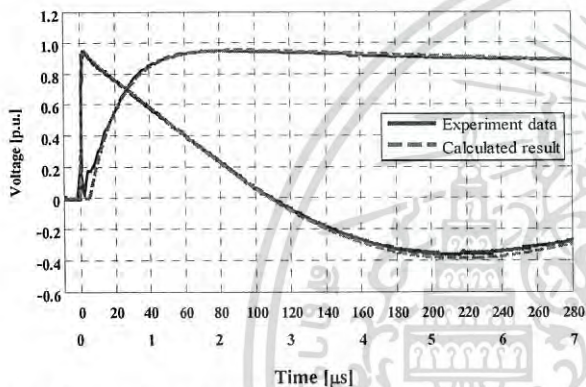


Fig. 8. Comparison of the voltage waveforms from simulation in case 2 and recorded from the experiment.

The inductance loads of 1 mH with load capacitance of 4 nF is used in the lightning impulse voltage test. Using the proposed procedure, the C_s , R_d , L_d , R_p , and R_e are the same as values in the fourth row of Table I. The recorded and simulated waveforms are compared in Fig. 9 and good agreement is observed.

The waveform parameters are according to the standard requirement. The voltage generation efficiencies are higher than 85%. The times to half are longer than 40 μ s and the under-shoot voltages are less than 40% of voltage peak.

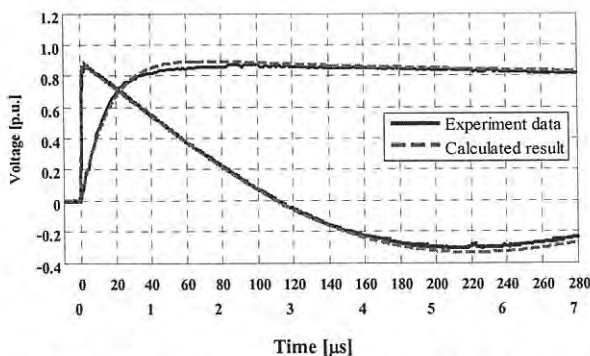


Fig. 9. Comparison of the voltage waveforms from simulation in case 4 and recorded from the experiment.

VI. CONCLUSIONS

The systematic design procedure of Glaninger circuit for lightning impulse voltage test has been proposed. Both the theoretical analysis and actual experiment have been shown that the proposed design can be used to generate lightning impulse voltage waveforms according to the standard requirement. With the designed components, the generated impulse voltage waveforms have low distortion, the voltage generation efficiencies are over 85%, the under-shoot voltages is less than 50%, and front times are 0.84-1.56 μ s and times to half are longer than 40 μ s.

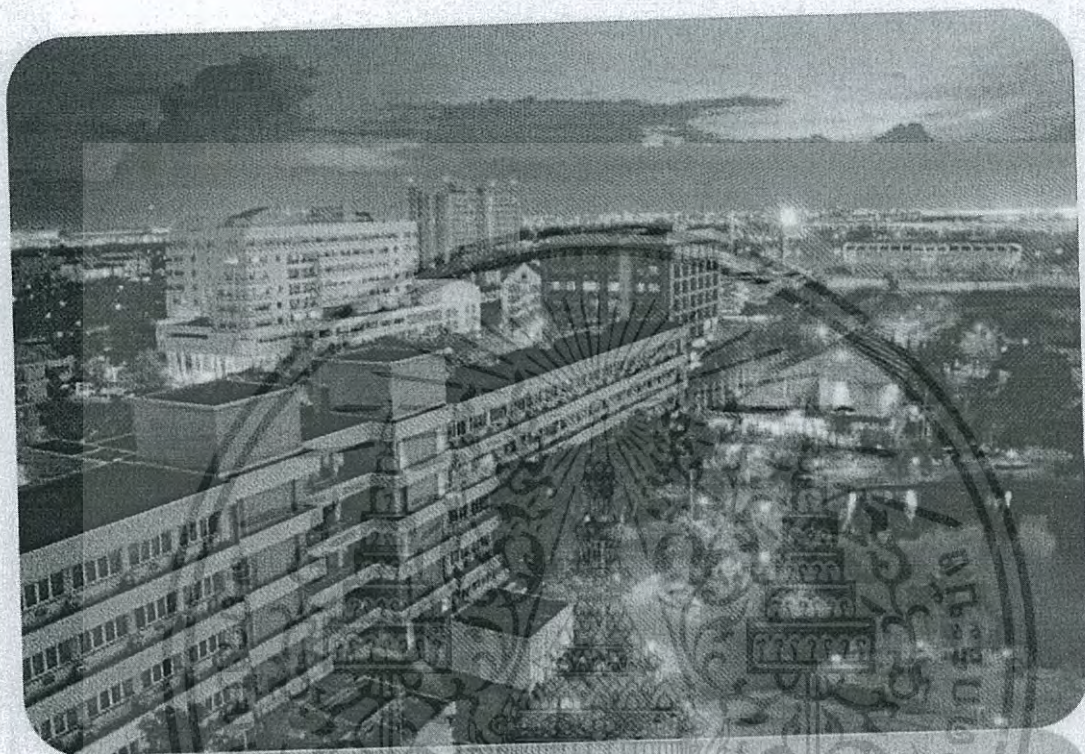
REFERENCES

- [1] IEC 60060-2, High-voltage Test Techniques. Part 2: Measuring systems, 3rd ed., Nov. 2010.
- [2] IEC 60060-1, High-voltage Test Techniques. Part 1: General Definitions and Test Requirements, 3rd ed., Sep. 2010.
- [3] IEEE Standard 4TM-2013, IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques, 2013.
- [4] K.Feser, "Circuit Design of Impulse Generators for the Lightning Impulse Voltage Testing of Transformers", www.haefely.com.
- [5] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals, 2nd ed., Newnes, August, 2000.
- [6] W.Schrader and W.Schufft, "Impulse Voltage Test of Power Transformers", paper No. 13, Workshop 2000, Alexandria, Virginia, Sep. 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISLH 2015

The 2015 ISLH International Conference



ISLH | KMITL ²⁰¹⁵

Proceedings of the International Symposium on Lightning Protection
and High Voltage Engineering 2015 (ISLH 2015)

June 12 – 13, 2015

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, Thailand



Lightning Impulse Voltage Generation Circuit for Low Inductive Loads

S. Noimor P. Tuethong N. pattanadech and P. Yutthagowith

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalongsung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
kypeeraw@kmitl.ac.th

ABSTRACT

This paper presents the design of lightning impulse voltage generation circuit to generate impulse voltage waveform in accordance with IEC60060-1 standard for application with low inductance load ($4 \text{ mH} > L \geq 0.4 \text{ mH}$). In this paper, the recorded and simulated lightning impulse voltage waveforms were compared. The paper elucidates the problem of using the conventional impulse generation circuit with an inductance load. To overcome the unsatisfied generating impulse waveform problem, Glaninger circuit is presented. The experiments showed that lightning impulse voltage waveforms generated by the conventional impulse voltage generation circuit did not need the requirement of the standard when low inductance load is tested. However, the lightning impulse voltage waveform generated by designed circuit can solve such problem.

Keywords: impulse voltage generation circuit, low inductance load, Glaninger circuit

1. Introduction

Electrical equipment used in electrical system is always installed outdoors and sometime damaged by over voltage resulting from lightning phenomena. Therefore, impulse voltage withstand test [1-2] of the equipment before installation is needed to ensure that the equipment will properly operate in accordance with the designed insulation coordination.

Lightning impulse voltage is simulated from over voltage resulting from lightning phenomena. Generally, the lightning impulse voltage is generated from the conventional impulse generation circuit which uses the relationship of charging capacitance (C_s), load capacitance (C_b), damping series resistance (R_d) and parallel resistance (R_e). According to standards [1-2], generated lightning impulse voltage waveform must have $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ for front time (T_1) and $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ for time to half (T_2).

Normally, the manufacturer designs the impulse voltage generation circuit by considering a load as a capacitance load, but there is also inductance load existing in the electric power system. If a testing load is the capacitance load, the parallel resistance and the damping series resistance can be adjusted to improve impulse voltage waveform, but if the load is the inductance load, the same method to improve impulse

voltage waveform characteristic will be no longer available.

This paper aims to present the impulse voltage generation circuit which is useable for low inductance load ($4 \text{ mH} > L \geq 0.4 \text{ mH}$) [3] to obtain impulse voltage waveform according to [1]. Adjusting the parallel resistance value, adding the parallel inductance to damping series resistance, and adding the parallel resistance to load are experimented to improve the lightning impulse voltage waveform to meet the standard requirement.

2. Theory

2.1 Conventional lightning impulse voltage generation circuit

Lightning impulse voltage in high voltage testing is generated by conventional circuit, Marx's circuit [4], which composes of charging capacitance (C_s) for absorbing energy, damping series resistance (R_d), parallel resistance (R_e) and load capacitance (C_b). The efficiency of impulse voltage generation depends on the voltage applied to the circuit. For impulse voltage waveform generation, front time is controlled by damping series resistance and load capacitance, and Time to half is controlled by parallel resistance and charging capacitance. Front time and time to half can be calculated by eq. (1) and (2), respectively.

$$T_1 = k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (1)$$

$$T_2 = k_1 R_e (C_b + C_s) \quad (2)$$

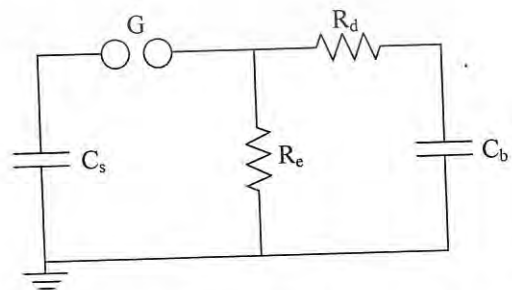


Fig. 1. Conventional equivalent impulse voltage generation circuit.

2.1 Glaninger circuit

Glaninger [5] circuit is developed for generating impulse voltage to test with low inductance load such as transformer coil and air core reactor. In Glaninger circuit, parallel inductance, additional inductance (L_d), is added to damping series resistance of conventional circuit as shown in Fig. 2. Components of Glaninger circuit composes of charging capacitance (C_s), damping series resistance (R_d), parallel resistance (R_e), additional inductance (L_d) and additional parallel resistance (R_p).

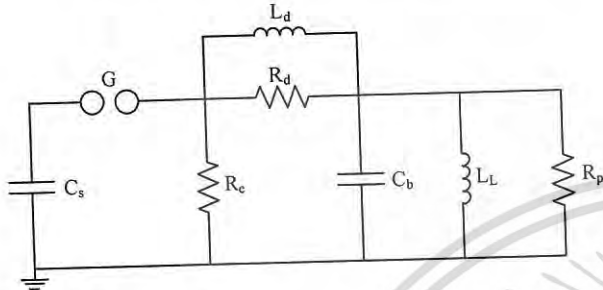


Fig. 2. Glaninger circuit

When the conventional circuit is used with low inductance load, time to half of voltage waveform is quite short because of the oscillation of voltage resulting from inductance and capacitance of tested load. To increase time to half (T_2), therefore, the additional inductance is added to the impulse generation circuit as illustrated in Fig. 2. The additional inductance will behave as a low impedance in a tail part of impulse waveform because the components of the tail part of waveform are low frequency component, so oscillation of voltage will happen between impulse voltage generator capacitance and load inductance. From above, time to half of impulse waveform will increase. However, the oscillation of voltage sometime generates under-shoot more than 50% of peak value of impulse voltage, so generated impulse voltage will be out of limitation of the standard. To solve under-shoot problem, the additional parallel resistance is added to tested load to decrease under-shoot.

3. Glaninger circuit design

In case of the load inductance is known, by measuring, the minimum charging capacitance can be calculated by eq. (4).

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (3)$$

$$C_s \geq \frac{\left(\frac{320 \times 10^{-6}}{2\pi}\right)^2}{L_L} \quad (4)$$

When the load capacitance is also known, R_d can be found by eq. 1, and if the front time is fixed to 1.2 μ s, R_d can be calculated by eq. (5).

$$R_d = \frac{0.4 \times 10^{-6}}{C_b} \quad (5)$$

R_d will decrease the oscillation voltage or under-shoot of waveform. After charging capacitance value and damping series resistance value are known, the maximum value for parallel inductance added to damping series resistance of the impulse generator can be illustrated in eq. (6).

$$L_d \leq \frac{R_d}{10} \sqrt{L_L C_s} \quad (6)$$

In practical condition, all calculated inductance values are not available, so the inductance of 300 μ H is selected.

After the additional inductance is known, the additional parallel resistance can be calculated by eq. (7),

$$1.05 \left(\frac{L_L}{L_L + L_d} \right)^2 = \frac{\left(\frac{1}{R_d} \right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L_d} \right)^2}{\left(\frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_p} \right)^2 + \left(\omega C_b - \frac{1}{\omega L_L} - \frac{1}{\omega L_d} \right)^2} \quad (7)$$

where, ω is resonance angular velocity of L_L and C_b .

In the impulse generator design, the under-shoot have to be less than 50% of impulse voltage peak value, so the additional parallel resistance value have to be according to eq. (8).

$$R_p \geq 2.5 \sqrt{\frac{(L_d + L_L)}{C_s}} \quad (8)$$

4. Test result

To confirm, the proposed design of the generation circuit. 5 cases of experiments were carried out. The experimental and simulated results are compared and good agreements are observed as follows;

Case 1

Impulse voltage was generated by the typical impulse voltage generation circuit as illustrated in Fig. 3. The circuit parameters are given in Table I.

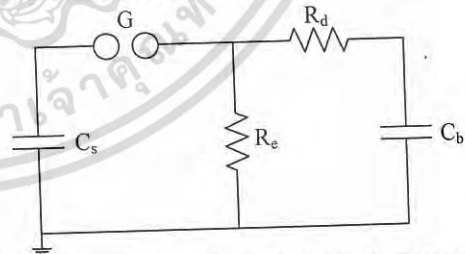


Fig. 3. Conventional equivalent circuit of impulse voltage generator.

TABLE I
Circuit components

Charging capacitance (C_s); μ F	Series resistance (R_d); Ω	Parallel resistance (R_e); Ω	Load capacitance (C_b); nF
1.007	57	75	8.39

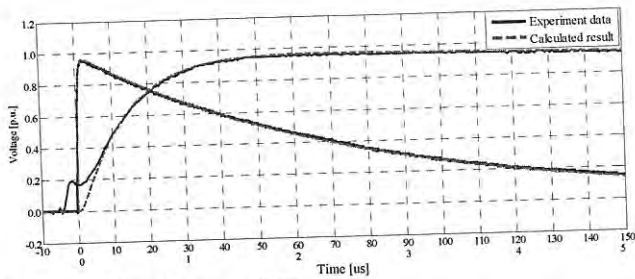


Fig. 4. Impulse voltage waveform

Test result showed that the typical impulse voltage generation circuit generated impulse voltage of which waveform was within the limitation of IEC60060-1 standard.

Case 2

Impulse voltage was generated by the typical impulse voltage generation circuit combining with low inductance load as illustrated in Fig. 5. The circuit parameters are given in Table II.

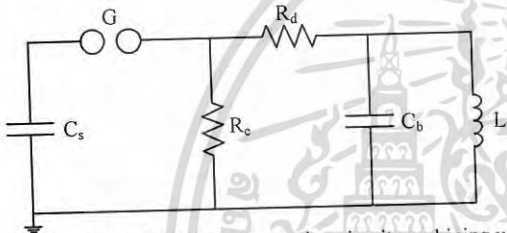


Fig. 5. Conventional impulse voltage generation circuit combining with low inductance load.

TABLE II
Circuit components

Charging capacitance (C_s); μF	Series resistance (R_d); Ω	Parallel resistance (R_e); Ω	Load capacitance (C_b); nF	Load inductance (L); mH
1.007	57	75	8.39	3.164

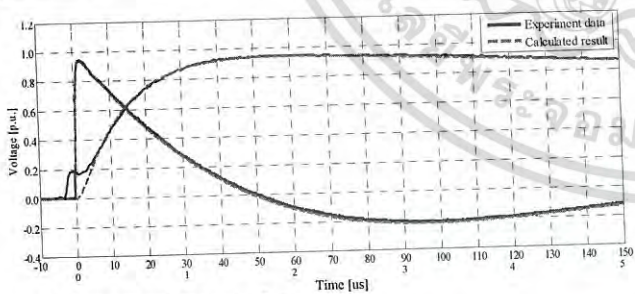


Fig. 6. Impulse voltage waveform

Test result showed that the impulse voltage generated by the typical impulse voltage generation circuit combining with low inductance load had only front time (T_1) within the standard limitation.

Case 3

Impulse voltage was generated by the circuit in case 2 with increasing parallel resistance value to 151 Ω . The circuit parameters are given in Table III.

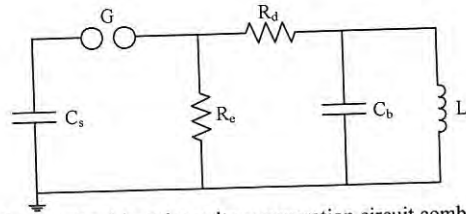


Fig. 7. Conventional impulse voltage generation circuit combining with low inductance load.

TABLE III
Circuit components

Charging capacitance (C_s); μF	Series resistance (R_d); Ω	Parallel resistance (R_e); Ω	Load capacitance (C_b); nF	Load inductance (L); mH
1.007	57	151	8.39	3.164

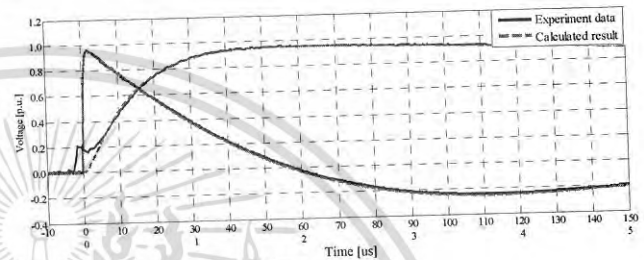


Fig. 8. Impulse voltage waveform

Test result showed that increasing of parallel resistance value could improve time to half (T_2) of the impulse voltage waveform. However, the impulse voltage waveform did not meet the standard requirement.

Case 4

Impulse voltage was generated by the circuit in case study 2 with disconnecting parallel resistance, and the circuit can be illustrated in Fig. 9. The circuit parameters are given in Table IV.

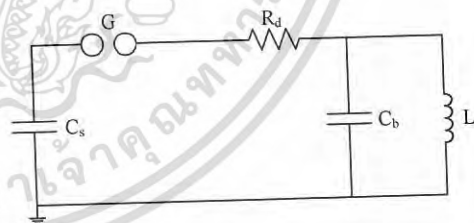


Fig. 9. Conventional impulse voltage generation circuit with disconnecting parallel resistance

TABLE IV
Circuit components

Charging capacitance (C_s); μF	Series resistance (R_d); Ω	Parallel resistance (R_e); Ω	Load capacitance (C_b); nF	Load inductance (L); mH
1.007	57	-	8.39	3.164

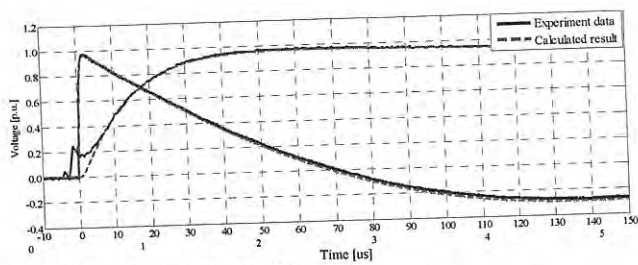


Fig. 10. Impulse voltage waveform

Test result showed that parallel resistance disconnecting could improve time to half (T_2) of the impulse voltage waveform. However, the impulse voltage waveform was not still within the limitation of the standard.

Case 5

Impulse voltage was generated by the Glaninger circuit as illustrated in Fig. 11. The circuit parameters are given in Table V-I and Table V-II.

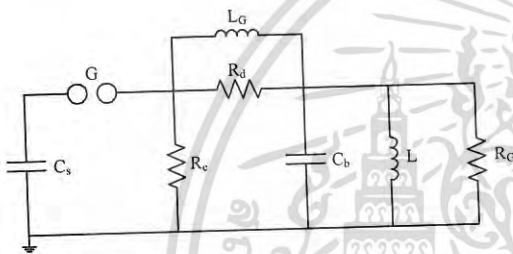


Fig. 11. Glaninger circuit.

TABLE V-I
Circuit components

Charging capacitance (C_s); μF	Series resistance (R_s); Ω	Parallel resistance (R_e); Ω	Load capacitance (C_b); nF
1.007	57	75	8.39

TABLE V-II
Circuit components

Load inductance (L); mH	Glaninger inductance (L_G); mH	Glaninger resistance (R_G); Ω
3.164	0.3	517

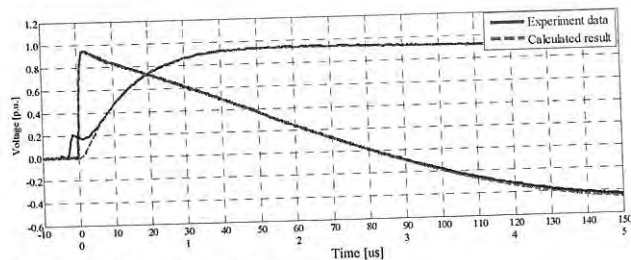


Fig. 12. Impulse voltage waveform

From test result, the impulse voltage generated by Glaninger circuit has waveform characteristics in accordance with the standard.

T_1 and T_2 of generated lightning impulse voltage waveform in each case are given in table VI

TABLE VI
Impulse voltage wave form characteristic

Case	Front time (T_1) μs	Time to half (T_2) μs
1	1.269	55.48
2	1.186	20.20
3	1.219	24.35
4	1.253	30.86
5	1.202	42.02

5. Conclusion

The experiments show that the typical impulse voltage generation circuit generates impulse voltage waveform within the standard limitation when the circuit was tested with the capacitance load and the resistance load. For low inductance load, Glaninger circuit is a promising choice to generates the impulse voltage waveform in accordance with the standard requirement, and the efficiency of generated impulse voltage is more than 90%.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to give the special acknowledgement to High Voltage Laboratory, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for providing the facility in this research work.

REFERENCES

- [1] IEC 60060-1, High-voltage Test Techniques. Part 1: General Definitions and Test Requirements, 3rd ed., Sep. 2010.
- [2] IEEE Standard 4TM-2013, IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques, 2013.
- [3] K.Feser, "Circuit Design of Impulse Generators for the Lightning Impulse Voltage Testing of Transformers", www.haefely.com.
- [4] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals, 2nd ed., Newnes, August, 2000.
- [5] W.Schrader and W.Schufft, "Impulse Voltage Test of Power Transformers", paper No. 13, Workshop 2000, Alexandria, Virginia, Sep. 2000

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายสุรศักดิ์ น้อยหอม
 วัน เดือน ปีเกิด 2 สิงหาคม 2534
 ที่อยู่ 375 หมู่ 2 ตำบล จันทว่าใต้
 อำเภอ แม่จัน จังหวัด เชียงราย
 57270



ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้น โรงเรียนแม่จันวิทยาคม
 พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย โรงเรียนแม่จัน
 วิทยาคม
 พ.ศ. 2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 พ.ศ. 2559 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)
 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1) การทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้