

การออกแบบและประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม
เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฉนวน

THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF COMPOSITE VOLTAGE
GENERATOR CIRCUIT FOR THE STUDY OF INSULATION PROPERTIES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-020-116

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม
เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฉนวน

THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF COMPOSITE VOLTAGE
GENERATOR CIRCUIT FOR THE STUDY OF INSULATION PROPERTIES



T105467



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 105467
วัน,เดือน,ปี..... 24 พ.ย. 2552

12169961

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2552
KMITL-2009-EN-M-020-116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF COMPOSITE VOLTAGE
GENERATOR CIRCUIT FOR THE STUDY OF INSULATION PROPERTIES**

POOCHIT BOONTHO

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

2009

KMITL-2009-EN-M-020-116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมเพื่อศึกษาคุณสมบัติของฉนวน
Thesis Title The Design and Implementation of Composite Voltage Generator Circuit for the Study of Insulation Properties
นักศึกษา ว่าที่ร้อยตรีภูษิต บุญโท
รหัสประจำตัว 50060215
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-020-116

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ	
ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว	
ดร.ศุภกิตต์ โชติโก	
ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว	
รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 09.30-11.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฉนวน
นักศึกษา	ว่าที่ร้อยตรีภูษิต บุญโท
รหัสนักศึกษา	50060215
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยใช้วงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบตามลำดับ โดยวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบ สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน $1.2/50 \mu s$ ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ได้ นอกจากนี้ได้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน โดยได้เลือกโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม , ดีเอมดีและกระดาษฉนวนเป็นตัวอย่างทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ทำให้ค่าความต้านทานฉนวนลดลง , ทำให้ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลดลง

Thesis Title	The Design and Implementation of Composite Voltage Generator Circuit for The Study of Insulation Properties
Student	Acting Second Lieutenant Poochit Boontho
Student ID.	50060215
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Associate Professor Monthol Leelajindakalek

ABSTRACT

This thesis presents the design and implementation of composite voltage generator circuit that consists of alternating current voltage and lightning impulse voltage. This circuit applies high pass filter and low pass filter to protect the impulse voltage generator and the testing transformer respectively. The constructed composite voltage generator circuit generates standard lightning impulse voltage $1.2/50 \mu s$ superimposed on alternating current voltage 50 Hz. Besides, this thesis also proposes the effect of composite voltage on three kinds of insulation; polyester film, DMD and craft paper. According to experimental results, the composite test voltage causes changing of insulation properties; decreasing insulation resistance, increasing dielectric loss factor and decreasing AC/impulse voltage dielectric strength.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รองศาสตราจารย์มณฑล ติลาจินดาไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ผู้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับปริญญาบัตรที่ข้าพเจ้าได้ศึกษาในระดับปริญญาตรีและแม่แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าก็ได้รับคำปรึกษาที่ดี การเข้มงวด กวดขันให้ทำงานวิจัยอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้ในบางช่วงที่ข้าพเจ้ารู้สึกท้อแท้หรือหมดกำลังใจที่จะทำงานวิจัย ก็จะได้รับคำพูดที่ทำให้กำลังใจจากท่านทุกครั้ง ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจที่จะทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หน่วยงานต้นสังกัดของข้าพเจ้า ที่สนับสนุนด้านทุนการศึกษาในระดับปริญญาโทตลอดทั้งสองปี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักบริหารวิชาการ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ

ขอขอบคุณคุณโกสินทร์ คล่องเชิงसान , คุณอภิชาติ นิมเทียบ , คุณเพทาย นิมสนอง , คุณภูษิต ถึงสุข , คุณบัวเรียน ชาดี , คุณสกลวุฒิ ภูผาสุข , คุณกิตติชัย แก้วดำ , คุณปริญญา สุวรรณมาโจ , คุณเพชร แดงรักย์ , คุณสรราชัย อานอาษาและคุณบุญยวีร์ ทองเขียว เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยช่วยข้าพเจ้าทำงานวิจัยจนติดใจจนต้นเสมอ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อสุนทร บุญโทและคุณแม่บุญเรือง บุญโท บิดาและมารดาของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง ท่านทั้งสองสอนให้ข้าพเจ้าทำงานหนักตั้งแต่เด็ก ทำให้ข้าพเจ้าไม่กล้าที่จะเถลไถลไปทางไหนเพราะกลัวที่จะต้องกลับไปทำนาที่บ้าน อีกทั้งสอนเรื่องการประพฤติตัว การวางตัวหรือแม้แต่การวางแผนชีวิตในอนาคต ถึงแม้ท่านทั้งสองจะจบแค่ชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 แต่ก็มีความคิดในการใช้ชีวิตที่ไม่ด้อยไปกว่าใครเลย ท่านทั้งสองทำให้ข้าพเจ้ารู้สึกว่าคุณพ่อข้าพเจ้าช่างเป็นคนที่มีโชคดีมาก ๆ ที่ได้เกิดมาเป็นลูกของท่านทั้งสอง

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ภูษิต บุญโท

III

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	6
2.1 แรงดันเกินทรานเซียนต์.....	6
2.1.1 แรงดันเกินภายนอก.....	7
2.1.2 แรงดันเกินภายใน.....	7
2.1.3 แรงดันเกินชั่วคราว.....	7
2.2 ผลกระทบของแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า.....	8
2.3 แรงดันรูปคลื่นผสม.....	8
2.3.1 แรงดันอิมพัลส์.....	9
2.3.2 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	10
2.3.3 ระดับแรงดันรูปคลื่นผสมสำหรับทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้า.....	11
2.4 การสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม.....	13
2.5 วงจรกรองความถี่.....	14
2.6 ฉนวน.....	15
2.6.1 โพลีเอสเตอร์.....	15
2.6.2 กระดาษฉนวน.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การตรวจสอบคุณสมบัติของฉนวน.....	17
2.7.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน.....	17
2.8.2 การทดสอบหาค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	18
2.7.3 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	20
บทที่ 3 การประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม.....	21
3.1 การออกแบบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม โดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านและ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกัน.....	21
3.1.1 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน.....	22
3.1.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	22
3.2 การจำลองวิเคราะห์ห้วงวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	23
3.2.1 การจำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	23
3.2.2 การจำลองวิเคราะห์ห้วงวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม.....	25
3.3 การประกอบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน, วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและวงจรสร้าง แรงดันรูปคลื่นผสม.....	28
3.4 การตรวจสอบการสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมจากวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ ประกอบ.....	30
บทที่ 4 การศึกษาผลของแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน.....	35
4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนภายหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม.....	35
4.1.1 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฉนวนที่ใช้ศึกษา.....	35
4.1.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน.....	36
4.1.3 การทดสอบหาค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	38
4.1.4 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	40
4.1.5 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	42
4.1.6 สรุปผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนภายหลังได้รับแรงดัน รูปคลื่นผสม.....	43
4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนภายหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการ ปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฉนวนที่ใช้ศึกษา.....	44
4.2.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน.....	45
4.2.3 การทดสอบหาค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	46
4.2.4 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	47
4.2.5 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	48
4.2.6 สรุปผลการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนภายหลังได้รับแรงดัน รูปคลื่นผสมที่มีการปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก. ความผิดพลาดที่ตรวจวัดได้ในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค....	53
ภาคผนวก ข. ข้อมูลคุณสมบัติของโพลีเอสเตอร์, ดีเอ็มและกระดาษฉนวน ที่ใช้ใน การศึกษา.....	59
ภาคผนวก ค. แบบ โครงสร้างวงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน....	63
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระดับแรงดันรูปคลื่นผสมสำหรับทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบแรงต่ำ.....	11
2.2 คุณสมบัติของกระดาษฉนวนตามมาตรฐาน JIS C-2305 (Class 2).....	17
2.3 ระดับแรงดันทดสอบค่าความต้านทานฉนวน.....	18
3.1 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ.....	21
3.2 คุณสมบัติของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ต้องการ.....	21
3.3 คุณสมบัติของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบ.....	23
3.4 คุณสมบัติของแรงดันรูปคลื่นผสมที่ตรวจวัดได้จากวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบ.....	34
4.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนก่อนและหลังได้รับแรงดันทดสอบ.....	37
4.2 ผลการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียโคอีเล็คทริกของฉนวนก่อนและหลังได้รับแรงดันทดสอบ.....	39
4.6 ผลการทดสอบหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก่อนและหลังได้รับแรงดันทดสอบ.....	41
4.4 ผลการทดสอบหาความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนก่อนและหลังได้รับแรงดันทดสอบ.....	43
4.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปของฉนวนภายหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 90° เมื่อเทียบกับฉนวนที่ไม่ได้รับแรงดันไฟฟ้า.....	43
4.6 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนของฉนวนหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ที่มุมทับซ้อน 90°.....	45
4.7 ผลการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียโคอีเล็คทริกของฉนวนหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ที่มุมทับซ้อน 90°.....	46
4.8 ผลการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ที่มุมทับซ้อน 90°.....	47
4.9 ผลการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ที่มุมทับซ้อน 90°.....	48

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก ,แรงดันเกินภายในและแรงดันเกินชั่วคราว.....	6
2.2 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด.....	10
2.3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม.....	10
2.4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	11
2.5 วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม.....	13
2.6 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรองความถี่ในอุดมคติ.....	14
2.7 วงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน.....	15
2.8 ตัวอย่างฉนวน โพลีเอสเตอร์และดีเอ็มดีที่ใช้ในงานวิจัย.....	16
2.9 ตัวอย่างกระดาษฉนวนที่ใช้ในงานวิจัย.....	17
2.10 เครื่องมือวัดค่าความต้านทานฉนวน.....	18
2.11 ไดอะแกรมวิธีการวัดค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวน.....	19
2.12 อุปกรณ์วัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวน.....	20
2.13 การสูญเสียสภาพความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน.....	20
3.1 วงจรจำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่.....	24
3.2 ผลการจำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่สูงผ่าน.....	24
3.3 ผลการจำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน.....	24
3.4 วงจรจำลองวิเคราะห์ของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม.....	25
3.5 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ตรวจวัดได้ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบกับวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน.....	25
3.6 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ตรวจวัดได้วัสดุทดสอบ.....	26
3.7 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตรวจวัดได้ระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากับวงจรรองความถี่สูงผ่าน.....	26
3.8 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 0°	25
3.9 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 90°	26
3.10 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 180°	26
3.11 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 270°	26
3.12 วงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ประกอบสร้าง.....	28
3.13 วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสร้าง.....	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ชุดควบคุมและแสดงผลวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม.....	29
3.15 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าที่ตรวจวัดได้ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบกับ วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน.....	30
3.16 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าที่ตรวจวัดได้วัสดุทดสอบ.....	31
3.17 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตรวจวัดได้ระหว่างเครื่องกำเนิด แรงดันอิมพัลส์ฟ้าเข้ากับวงจรรองความถี่สูงผ่าน.....	31
3.18 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 0°	32
3.19 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 90°	32
3.20 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 180°	33
3.21 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 270°	33
4.1 ตัวอย่างฉนวน โพลีเอสเตอร์, ดีเอ็มดีและกระดาษฉนวนที่ใช้ในการศึกษา.....	35
4.2 ไดอะแกรมแสดงวงจรทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน.....	36
4.3 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน.....	36
4.4 ไดอะแกรมแสดงวงจรทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	38
4.5 วงจรการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	38
4.6 ไดอะแกรมแสดงวงจรทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	40
4.7 วงจรการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	40
4.8 ไดอะแกรมแสดงวงจรทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้า.....	42
4.9 วงจรการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้า.....	42
4.10 ลักษณะฉนวนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและภายหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม.....	49

วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25 ปี พ.ศ. 2545 โดยได้ทำการประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ใช้ช่องว่างเก็บ (Sphere-Gap) และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) เป็นอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งสามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz $10 \text{ kV}_{\text{peak}}$ และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า $1.2/50 \mu\text{s}$ $30 \text{ kV}_{\text{peak}}$

รวิชัย สิมมา และคณะ ได้ทำการวิจัยเรื่อง “การออกแบบและการสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมสำหรับการทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับระหว่างมุม 0° - 360° สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ” ซึ่งได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 ปี พ.ศ. 2550 โดยได้ทำการประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมสำหรับทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบแรงต่ำ ซึ่งสามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz 700 V , แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า $1.2/50 \mu\text{s}$ 6 kV และสามารถกำหนดมุมทับซ้อนได้ระหว่าง 0° - 360° ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

โกสินทร์ คล่องเชิงสาร และคณะ ได้ทำการวิจัยเรื่อง “วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์” ซึ่งได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 ปี พ.ศ. 2550 โดยได้ทำการประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ควบคุมมุมทับซ้อนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และได้นำเสนอการใช้งานวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งสามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz 325 V , แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า $1.2/50 \mu\text{s}$ 1.1 kV และสามารถกำหนดมุมทับซ้อนได้ระหว่าง 0° - 360° ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ทำการประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบภายในห้องทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมทั้งการประกอบสร้างวงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน สำหรับใช้เป็นวงจรป้องกันของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลกระทบของแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน โดยเลือกใช้ฉนวนตัวอย่างคือ โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม , ดีเอ็มดีและกระดาษฉนวน ซึ่งเป็นฉนวนที่มีใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากในเครื่องจักรไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า , เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น ทั้งนี้การศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน จะศึกษาถึงคุณสมบัติความต้านทานฉนวน , ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก , ความคงทนต่อ

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งานนวนให้มีความเข้าใจถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของนวนในแง่ของการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น ว่านวนที่ใช้งานสามารถทนต่อแรงดันผิพร้องที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ปัจจุบันในแต่ละประเทศมีการใช้มาตรฐานการทดสอบนวน ทั้งมาตรฐานสากลและมาตรฐานในระดับภูมิภาค ในแต่ละเงื่อนไขของการทดสอบจะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ , แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือแรงดันอิมพัลส์แต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งแรงดันทดสอบที่ได้กล่าวมาทั้งหมด อาจไม่สอดคล้องกับสภาพของแรงดันที่แท้จริงที่นวนไฟฟ้าได้รับในขณะที่เกิดความผิพร้องขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้าในขณะที่เกิดความผิพร้องขึ้นเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกทับซ้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ แต่ทั้งนี้ก็ไม่อาจปฏิเสธได้ว่าการทดสอบนวนไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ , แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือแรงดันอิมพัลส์แต่เพียงอย่างเดียวโดยไม่ได้ทดสอบด้วยแรงดันรูปคลื่นผสม นวนอาจจะทนต่อแรงดันทดสอบได้แต่นวนไฟฟ้าอาจจะไม่ทนต่อความผิพร้องที่เกิดขึ้นจริงในระบบไฟฟ้าได้เนื่องจากแรงดันรูปคลื่นผสม ดังนั้นการทดสอบด้วยแรงดันรูปคลื่นผสมจะช่วยให้ยืนยันถึงความสามารถในการทนทานต่อความผิพร้องในระบบไฟฟ้าของนวนไฟฟ้าได้มากขึ้น

ทั้งนี้นวนที่ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม อาจทำให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปหรืออาจเกิดการชำรุดเสียหายมากกว่านวนที่ได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ , แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือแรงดันอิมพัลส์แต่เพียงอย่างเดียว

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมจะประกอบด้วยส่วนสำคัญส่วนหนึ่ง คือ วงจรป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ ซึ่งการเลือกใช้งานวงจรป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์อาจเลือกใช้ช่องว่างแก๊ป เพราะมีข้อดี คือ สามารถป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้เป็นอย่างดีและสามารถหาใช้งานได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือ การปรับระยะช่องว่างแก๊ปมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนซ์ข้ามผ่าน หากปรับระยะไม่เหมาะสมอาจทำให้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าไม่เบรกดาวนซ์ข้ามผ่าน ไปทับซ้อนกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือหากเกิดการเบรกดาวนซ์ขึ้นแรงดันอิมพัลส์ที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะไม่ใช้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (Standard Lightning Impulse Voltage) หรือแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งมาตรฐาน (Standard Switching Impulse Voltage) แต่จะกลายเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด (Chop Wave Impulse Voltage) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการใช้งานวงจรองความถี่สูงผ่านและวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกันเพราะมีข้อดี คือ สามารถป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบได้ดีในระดับหนึ่งและสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ทุกครั้ง แต่มีข้อเสีย คือ จำเป็นต้องมีการคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อไม่ให้ค่าองค์ประกอบของวงจรดังกล่าวส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนในแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิจัยประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การออกแบบและประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่มีเฟสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับระหว่าง 0° - 360°

ส่วนที่ 2 การศึกษาผลของแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้อนทับกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่มีต่อฉนวน โดยทำการเปรียบเทียบใน 3 กรณี คือ ฉนวนก่อนได้รับแรงดันไฟฟ้า, ฉนวนที่ได้รับเฉพาะแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและฉนวนที่ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม ซึ่งในกรณีที่ 3 ยังแบ่งเป็น 4 หัวข้อย่อย คือฉนวนที่ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้อนทับกับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 0° , 90° , 180° และ 270°

ส่วนที่ 3 การศึกษาวิจัยผลของแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้อนทับกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่มีการปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้อนทับที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน

1.6 ขั้นตอนของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา, ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย, สมมติฐานของการวิจัย, ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย, ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยแรงดันเกินทรานเซียนต์, ผลกระทบของแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า, แรงดันรูปคลื่นผสม, การสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม, วงจรกรองความถี่, ฉนวนและการตรวจสอบคุณสมบัติของฉนวน

บทที่ 3 กล่าวถึงการประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม ซึ่งประกอบไปด้วย การออกแบบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมโดยใช้วงจรความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกัน, การจำลองวิเคราะห์ห้วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์, การประกอบ

สร้างวงจรกรองความถี่สูงผ่าน , วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมและ
การตรวจสอบการสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมจากวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบ

บทที่ 4 กล่าวถึงการศึกษาผลของแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน

บทที่ 5 กล่าวถึงข้อสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. ความผิดพร่องที่ตรวจวัดได้ในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ภาคผนวก ข. ข้อมูลคุณสมบัติของโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม , ดีเอ็มดีและกระดาษฉนวน ที่ใช้ใน
การศึกษา

ภาคผนวก ค. แบบโครงสร้างวงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

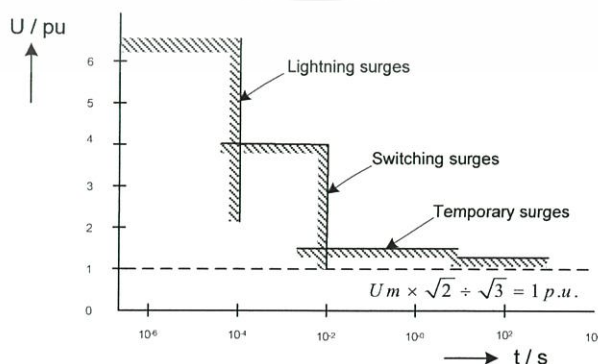
ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยแรงดันเกินในระบบไฟฟ้ารวมทั้งผลกระทบของแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าที่มีต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า , แรงดันรูปคลื่นผสม , การสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมโดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกัน , ฉนวนและการทดสอบเพื่อหาค่าความเป็นฉนวน , ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก , ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

2.1 แรงดันเกินทรานเซียนต์ (Transient Overvoltage)

แรงดันเกินทรานเซียนต์ หมายถึง แรงดันที่ขนาดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้นไม่เกิน 5 ms ความเป็นไปของแรงดันเกินทรานเซียนต์ มีความสำคัญอย่างมากต่อเทคนิคการฉนวนแรงสูง เนื่องจากแรงดันเกินทรานเซียนต์เป็นสาเหตุทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นในระบบไฟฟ้า ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงแก่ฉนวน ซึ่งอาจมีค่าสูงกว่าความคงทนของฉนวนและนำไปสู่การเกิดความผิดปกติ (Fault) ในระบบไฟฟ้า [1]

แรงดันเกินทรานเซียนต์สามารถแบ่งตามสาเหตุที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 ประเภท คือ แรงดันเกินภายนอก (External Overvoltage) ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเรียกว่าแรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันเกินภายใน (Internal Overvoltage) ซึ่งเกิดจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจรเรียกว่าแรงดันเกินสวิตซ์ นอกจากนี้แรงดันเกินอีกชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากเกิดจากความผิดปกติในระบบมีลักษณะเป็นออสซิลเลชัน (Oscillation) ที่มีความถี่พลังงานหรือเป็นฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) เรียกว่าแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) ช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกินทั้ง 3 ชนิด มีค่าแตกต่างกันดังรูปที่ 2.1 [2] โดยทำการเปรียบเทียบขนาดของแรงดันค่ายอดของแรงดันเกินในแต่ละชนิดในระบบเพอร์ยูนิต (Per Unit) โดย $U_{ph} = U_m \sqrt{2} / \sqrt{3} = 1 \text{ pu}$



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก , แรงดันเกินภายในและแรงดันเกินชั่วคราว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 แรงดันเกินภายนอก

เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแบบจึงอยู่ในอากาศ ดังนั้นจึงมีโอกาสสูงมากที่จะถูกฟ้าผ่าได้ทั้งในกรณีผ่าลงโดยตรงหรือการดีสชาร์จ (Discharge) ในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าลงบริเวณใกล้เคียง ซึ่งจะก่อให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่งแรงสูง แรงดันเกินนี้สามารถคำนวณได้โดยอาศัยหลักการคิดคำนวณตามทฤษฎีของคลื่นจร (Traveling Wave Theory) และทฤษฎีการคำนวณวงจร RCL ลักษณะรูปคลื่นแรงดันเกินภายนอก มีช่วงเวลาหน้าคลื่นประมาณ $1 - 2 \mu s$ และช่วงเวลาหางคลื่น $40 - 60 \mu s$ มีค่ายอดคลื่นสูงประมาณ 6 pu หรือมากกว่า และเป็นอันตรายกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างมาก จำเป็นที่จะต้องกำจัดออกจากระบบไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด เพื่อมิให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเกิดการชำรุดเสียหาย

2.1.2 แรงดันเกินภายใน

แรงดันเกินภายในเกิดจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจรทั้งในกรณีการทำงานของผู้ปฏิบัติงานและการทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อเกิดความบกพร่องขึ้น หรือเกิดจากการลัดวงจรเนื่องจากความบกพร่องของฉนวน หรืออาจเกิดจากแรงดันฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดควาบไฟ (Flash Over) ตามผิวฉนวนภายนอกที่มีความสกปรก เปียกชื้นด้วยหมอก น้ำค้าง น้ำฝนหรือเกิดลัดวงจรเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอม หรือเกิดจากวงจรเรโซแนนซ์ (Resonance) เพราะค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ในสายส่งแรงสูง ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเกินภายในมีช่วงระยะเวลาหน้าคลื่น $100 - 300 \mu s$ และช่วงเวลาหางคลื่น $2,000 - 3,000 \mu s$ มีค่ายอดคลื่นสูงประมาณ 4 pu การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งจะใช้กับระดับการฉนวนที่ระบบแรงดันสูงกว่า $300 kV$

2.1.3 แรงดันเกินชั่วคราว

แรงดันเกินชั่วคราวจะแตกต่างจากแรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันเกินสวิตซ์ซึ่ง คือ ช่วงความถี่จะมีตั้งแต่ระดับความถี่ต่ำไปจนความถี่สูง และมีช่วงระยะเวลาจากไม่กี่วินาทีไปจนถึงเป็นชั่วโมง (ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดความผิดปกติ) แรงดันเกินชั่วคราว มีความสำคัญต่อการเลือกค่าที่กำหนดของกักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) โดยมีเงื่อนไขว่ากักฟ้าผ่าจะต้องไม่ทำงานที่แรงดันเกินชั่วคราว เพราะกักฟ้าผ่าจะไม่สามารถทนต่อพลังงานของแรงดันเกินชั่วคราวได้ ซึ่งอาจทำให้กักฟ้าผ่าระเบิดเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น

แรงดันเกินชั่วคราวมีลักษณะของออสซิลเลชัน มีความถี่เท่า ๆ กับความถี่พลังงานที่รูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Wave) หรือใกล้เคียงที่เกิดจากการตัดตัวเหนี่ยวนำ (Reactor) ชดเชยกับค่าความจุไฟฟ้าสายส่ง หรือมีความถี่สูงกว่าความถี่พลังงานและมักมีฮาร์โมนิกส์ซ้อนอยู่เกิดจากกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า (Load) ส่วนที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่พลังงานมักเกิดคร่อมตัวเก็บประจุที่ต่ออันดับเกิดจากการปลดภาระทางไฟฟ้าเต็มที่ (Full Load)

แบบเหนี่ยวนำออกไปกะทันหันและเพิ่มภาระทางไฟฟ้าแบบเก็บประจุเข้าไป ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ภาระทางไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ในบางกรณีแรงดันเกินชั่วคราวอาจเกิดจากเรโซแนนซ์ , เฟอร์โรเรโซแนนซ์ (Ferro Resonance) , เกิดความผิดปกติของดินแบบไม่สมดุล (Unbalance Ground Fault) และผลของปรากฏการณ์เฟอร์รันตี (Ferranti Effect) แรงดันเกินชั่วคราวจะเกิดบนเฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ เมื่อมีความผิดปกติของดินแบบ 1 เฟส หรือ 2 เฟส เกิดขึ้น แรงดันเกินแบบนี้มีค่าไม่เกิน $\sqrt{3}$ pu และไม่มีอันตรายกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

2.2 ผลกระทบของแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า

ผลกระทบของแรงดันเกินที่มีต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ในระบบไฟฟ้า สามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท คือ [3]

- อุปกรณ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง มี 2 ลักษณะ คือ อุปกรณ์นั้นไม่ได้รับผลกระทบใด ๆ จากแรงดันเกินที่เกิดขึ้น หรืออุปกรณ์มีประสิทธิภาพการทำงานลดลงในระดับที่ไม่สามารถสังเกตได้แต่สามารถทำงานได้ตามปกติ
- อุปกรณ์มีการทำงานที่ผิดปกติ แต่อุปกรณ์สามารถกลับคืนสู่สภาพการทำงานปกติได้ด้วยตัวเองหรืออาจต้องใช้เครื่องมือพิเศษช่วย
- อุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบเกิดการชำรุดเสียหายและไม่สามารถใช้งานได้
- อุปกรณ์สร้างความเสียหายต่อเนื่องลุกลาม โดยอุปกรณ์ที่ได้รับความเสียหายหรือเกิดการดำเนินงานที่ผิดปกติเป็นต้นเหตุก่อให้เกิดความเสียหายต่อไปยังอุปกรณ์รอบข้าง อาจก่อให้เกิดการระเบิดหรือลุกไหม้ได้

ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจได้ว่าอุปกรณ์ที่ติดตั้งใช้งานในระบบไฟฟ้า สามารถทำงานได้เป็นปกติ ภายหลังที่อุปกรณ์ได้รับแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า จึงควรทำการทดสอบอุปกรณ์เหล่านั้น ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติคล้ายกับแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมในการทดสอบให้เหมือนกับที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจริงดังที่กล่าวข้างต้นแล้ว และยังคงคำนึงถึงขนาดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและกระแสไหลผ่านอุปกรณ์ที่เหมาะสม เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงเมื่อเกิดแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า ซึ่งแรงดันดังกล่าวคือแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานที่ถูกทับซ้อนด้วยแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า

2.3 แรงดันรูปคลื่นผสม (Composite Voltage)

แรงดันรูปคลื่นผสมเป็นแรงดันที่จำลองสภาพแรงดันไฟฟ้าที่อุปกรณ์ได้รับในขณะที่เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ซึ่งในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันรูปคลื่นผสมจะประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกทับซ้อนด้วยแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า มาตรฐาน IEC 61000-4-5 [4] ได้ระบุลักษณะแรงดันรูปคลื่นผสมประกอบด้วย แรงดันอิมพัลส์ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปิดวงจร (Open-circuit) $1.2/50 \mu s$ หรือกระแสอิมพัลส์ชนิดลัดวงจร (Short-circuit) $8/20 \mu s$ ที่ทับซ้อนอยู่บนแรงดันใช้งานปกติของอุปกรณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า เนื่องจากเป็นแรงดันเกินที่เราไม่สามารถควบคุมได้ อีกทั้งยังมีความรุนแรงมากและส่งผลเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก

2.3.1 แรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage)

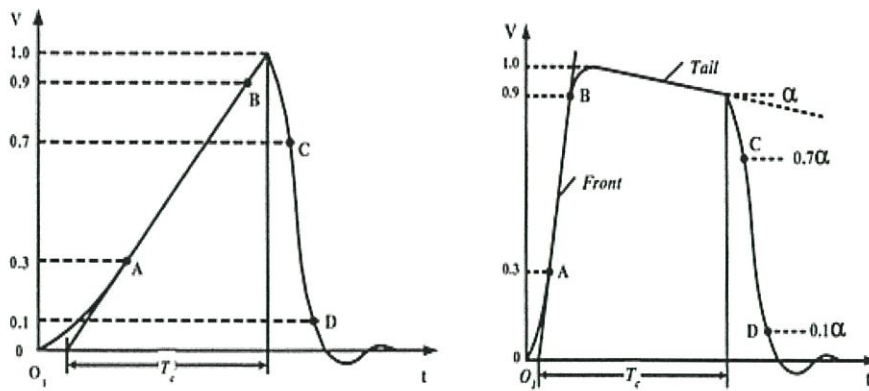
แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันทรานเซียนต์แบบไม่เป็นรายคาบ (Non-periodic Transient Voltage) ขนาดของแรงดันอิมพัลส์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากศูนย์ไปถึงค่ายอดแล้วลดลง ไปถึงศูนย์อย่างช้า ๆ ในทางปฏิบัติอาจแบ่งแรงดันอิมพัลส์ตามลักษณะรูปคลื่นหรือสาเหตุที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 ชนิด คือ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์

แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ทดสอบหาความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของอุปกรณ์ก่อนนำไปติดตั้งใช้งานจริง หรือใช้เพื่อการศึกษาวิจัยแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นเป็นการเลียนแบบรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ ซึ่งค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของฉนวนไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันค่ายอดสูงสุดเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของขนาดแรงดันด้วย ฉะนั้นเพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จึงได้มีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน โดยยึดถือเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติเป็นเกณฑ์ ซึ่งกำหนดด้วยคุณสมบัติดังต่อไปนี้

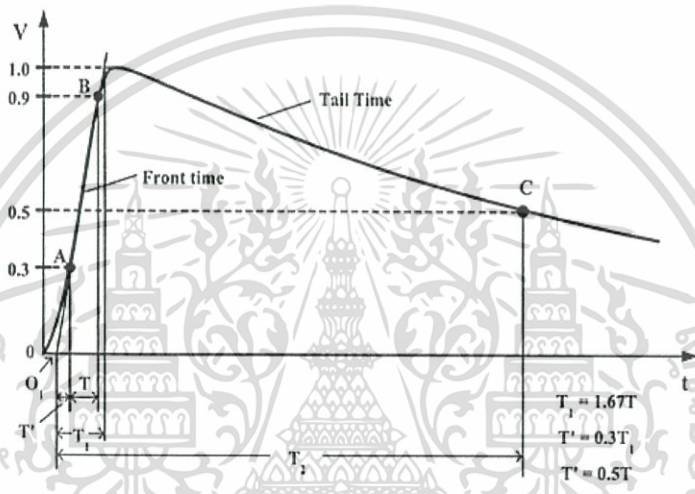
- ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ (V_p)
- ชั่วของแรงดันอิมพัลส์
- ช่วงเวลาน้ำคลื่น (Front time : T_1) คือ ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มต้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด
- ช่วงเวลาหางคลื่น (Tail time : T_2) คือ ช่วงเวลาที่เริ่มนับจากแรงดันเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งมีขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

ข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) [5] ได้แบ่งแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าออกเป็น 2 ประเภท คือ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด (Chopped Wave Lightning Impulse Voltage) และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (Full Wave Lightning Impulse Voltage) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด คือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่รูปคลื่นเกิดการดีสชาร์จแบบทำลายทำให้แรงดันตกลงสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว การตัดของรูปคลื่นแรงดันอาจเกิดที่หน้าคลื่นหรือส่วนหางคลื่นก็ได้ ดังรูปที่ 2.2
- แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม คือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่รูปคลื่นมีขนาดแรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดแล้วลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด



รูปที่ 2.3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม

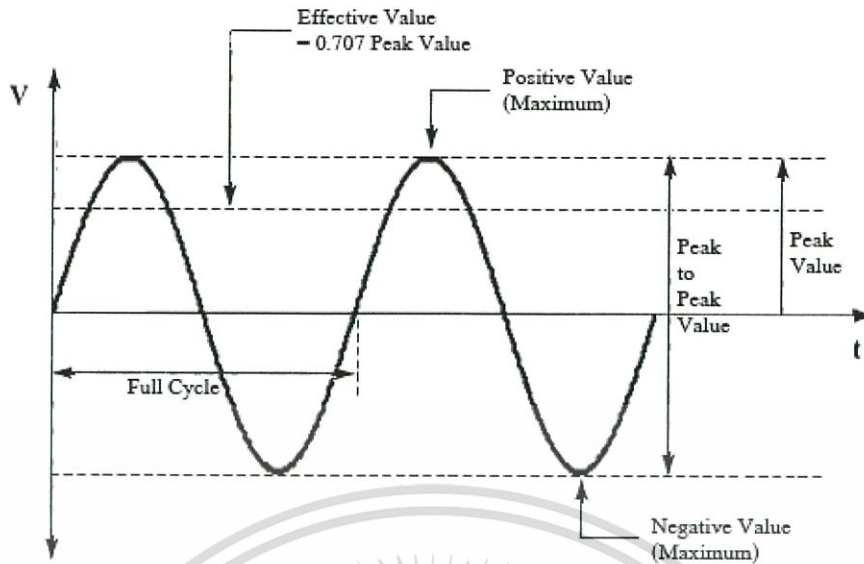
แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) คือ แรงดันอิมพัลส์ที่มีช่วงเวลา T_1/T_2 เป็น $1.2/50 \mu s$ โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนดังนี้

- เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu s \pm 30\%$
- เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 50 \mu s \pm 20\%$
- ค่ายอดแรงดัน $V_p \pm 3\%$

2.3.2 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current Voltage ; AC Voltage)

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ คือ แรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะการไหลเปลี่ยนทิศทางตลอดเวลา โดยขณะหนึ่งมีค่าเป็นศูนย์แล้วจะเพิ่มขึ้นมีค่าสูงสุดในทิศทางบวกแล้วลดลงเป็นศูนย์ ต่อจากนั้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกจนถึงค่าสูงสุดในทิศทางลบแล้วจะลดลงเป็นศูนย์อีก จะสลับกันไปตลอดเวลา รูปคลื่นการเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นคาบเวลาของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนี้ มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) สำหรับทดสอบอุปกรณ์ต้องมีความถี่อยู่ในระหว่าง 45-65 Hz และลักษณะรูปคลื่นโดยประมาณต้องเป็นรูปคลื่นไซน์มีครึ่งวงรอบ (Half-Cycle) ทั้งด้านบวกและด้านลบจะต้องเหมือนกัน

2.3.3 ระดับแรงดันรูปคลื่นผสมสำหรับทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้า

มาตรฐาน IEC 61000-4-5 ซึ่งเป็นมาตรฐานของอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ลดสภาพความเป็นฉนวนภายหลังได้รับแรงดันเกิน ได้กำหนดระดับแรงดันสำหรับทดสอบอุปกรณ์ในระบบแรงต่ำ ทั้งในส่วนของ Open Circuit Voltage 1.2/50 μ s และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ สรุปได้ดังตารางที่ 2.1 [4]

ตารางที่ 2.1 ระดับแรงดันรูปคลื่นผสมสำหรับทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบแรงต่ำ

Level	Open Circuit Voltage $\pm 10\%$ (kV)	AC Voltage 50Hz
0	N/A	representative operating condition voltage of the equipment under test
1	0.5	
2	1.0	
3	2.0	
4	4.0	
5	a	
X	Special	

หมายเหตุ 1. ระดับแรงดันอิมพัลส์ที่ระบุในตารางเป็นค่าที่ใช้สำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับและระบบป้อนเข้า-ส่งออกไฟฟ้ากระแสสลับที่ต่อเข้าโดยตรงกับเครือข่ายระบบไฟฟ้าหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ในระดับ Level 0 ไม่ต้องทำการทดสอบเนื่องจากระบบมีการป้องกันเป็นอย่างดีและมีระดับแรงดันเกินต่ำ
3. ในระดับ Level 5 แรงดันอิมพัลส์จะถูกกำหนดโดยระดับของระบบจ่ายกำลัง
4. ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่ใช้ทดสอบ เป็นระดับปกติของระบบไฟฟ้า

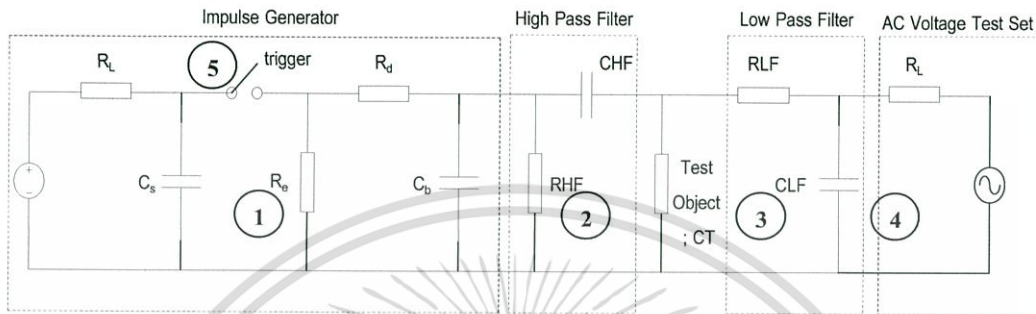
โดยที่

- Level 0 หมายถึง ระบบไฟฟ้าได้รับการป้องกันเป็นอย่างดี หรืออยู่ในห้องเฉพาะและมีระดับแรงดันเกินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 V
- Level 1 หมายถึง ระบบไฟฟ้าได้รับการป้องกันเป็นบางส่วนและมีระดับแรงดันเกินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 500 V
- Level 2 หมายถึง ระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งสายเคเบิลแยกออกเป็นอย่างดี หรือติดตั้งอยู่ในระยะสั้นและมีระดับแรงดันเกินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 kV
- Level 3 หมายถึง ระบบไฟฟ้าที่สายเคเบิลกำลังและสายเคเบิลควบคุมติดตั้งขนานกันไปและมีระดับแรงดันเกินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 kV
- Level 4 หมายถึง ระบบไฟฟ้าที่มีจุดต่อภายนอกตลอดความยาวของสายเคเบิล โดยสายเคเบิลดังกล่าวสามารถใช้งานได้ทั้งวงจรอิเล็กทรอนิกส์และวงจรกำลัง และมีระดับแรงดันเกินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 kV
- Level 5 หมายถึง ระบบไฟฟ้าที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อระบบสื่อสารและสายส่งกำลังเหนือศีรษะ
- Level X หมายถึง อยู่ในสถานะเฉพาะซึ่งจะกำหนดโดยคุณลักษณะของแต่ละผลิตภัณฑ์
- a หมายถึง ระดับแรงดันทดสอบที่กำหนดร่วมกันระหว่างผู้ผลิตและผู้ใช้งาน

สำหรับงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่ศึกษาแนวโน้มผลกระทบของแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน ซึ่งมีขอบเขตการดำเนินการศึกษาถึงผลของระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและระดับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ทับซ้อนกัน โดยมีการปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองเพิ่มขึ้นและลดลง โดยฉนวนที่เลือกใช้ในงานวิจัยได้แก่ โพลีเอสเตอร์ฟิล์มหนา 350 μm , ดีเอ็มดี หนา 350 μm และกระดาษฉนวน หนา 500 μm ซึ่งมีระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับใช้งานปกติ 4 kV_{rms} ดังนั้นจึงพิจารณากระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 4 kV_{rms} (5.66 kV_{peak}) ส่วนระดับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ากำหนดที่ 6 kV_{peak} ขั้วบวก ซึ่งจากการศึกษาของ Berger [6] พบว่าฟ้าผ่าบวกมีความรุนแรงมากกว่าฟ้าผ่าลบ เนื่องจากฟ้าผ่าบวกมีปริมาณประจุและขนาดกระแสฟ้าผ่ามากกว่าฟ้าผ่าลบ

2.4 การสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมจะประกอบด้วยวงจรย่อย 5 ส่วน [7] คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์, วงจรป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์, วงจรป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ, หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบและวงจรเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

- เมื่อ 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 2 คือ วงจรป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 3 คือ วงจรป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ
 4 คือ หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ
 5 คือ วงจรเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

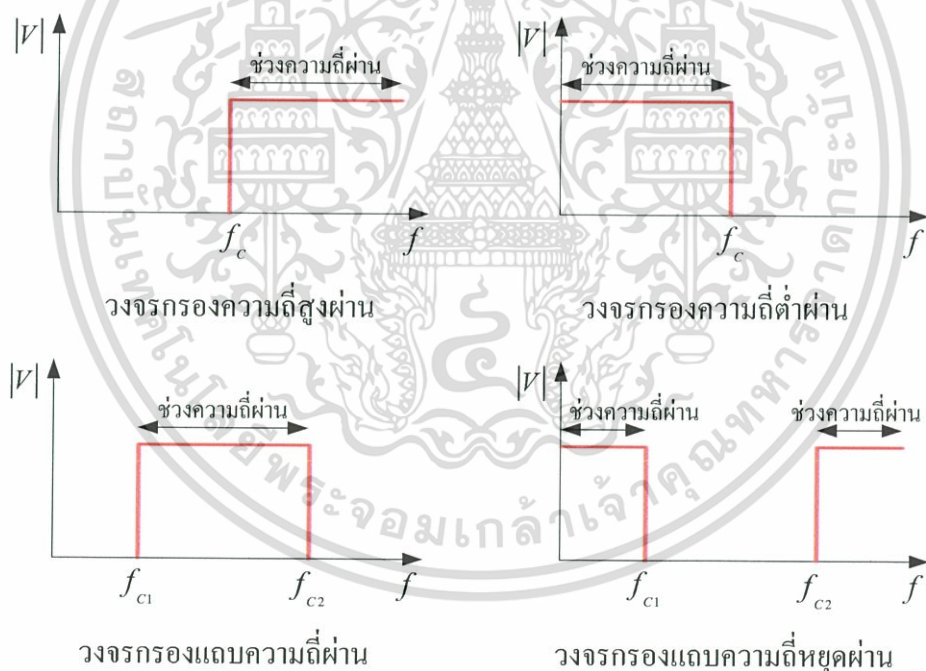
เงื่อนไขที่สำคัญของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม [8] คือ เมื่อนำวงจรย่อยมาประกอบเป็นวงจรใหญ่ วงจรย่อยเหล่านี้จะต้องไม่ส่งแรงดันรบกวนกันและจะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเฉพาะวัสดุทดสอบเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องติดตั้งวงจรป้องกันกันระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์กับวัสดุทดสอบ เพื่อป้องกันมิให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปทำความเสียหายให้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ นอกจากนี้ยังต้องติดตั้งวงจรป้องกันกันระหว่างวัสดุทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ เพื่อป้องกันมิให้แรงดันอิมพัลส์เข้าไปทำความเสียหายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ นอกจากนี้วงจรป้องกันจะต้องไม่กลายเป็นภาระทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทั้งสอง

วงจรป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบมีรูปแบบเดียว คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ส่วนวงจรป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ มีใช้งานอยู่ 2 ชนิด คือ วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) และช่องว่างเก็บ (Sphere Gap) ซึ่งวงจรกรองความถี่สูงผ่านมีข้อดีคือ สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้อย่างสม่ำเสมอ แต่มีข้อเสียคือ ค่าองค์ประกอบภายในวงจรซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุอาจส่งผลต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ [7] ส่วนช่องว่างเก็บมีข้อดีคือสามารถหาใช้งานได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือจำเป็นต้อง

มีการปรับระยะช่องว่างเก็ปให้เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรคดาวน์ (Break Down) ข้ามผ่านช่องว่างเก็ป ก่อนที่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะเบรคดาวน์ข้ามผ่านไปยังวัสดุทดสอบ [9] สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

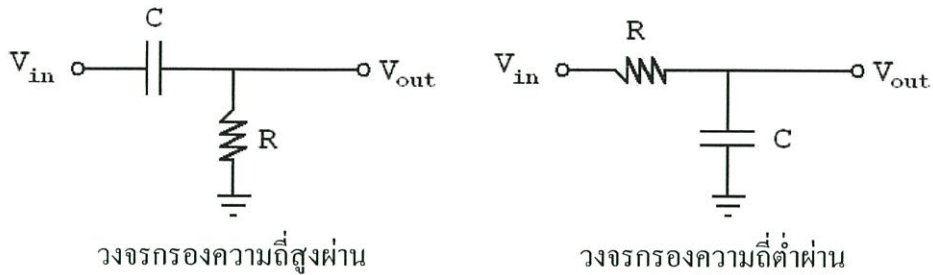
2.5 วงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่นับเป็นวงจรกรองป้องกันที่มีความสำคัญมาก โดยจะนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ , การสื่อสาร , การควบคุม , ทางด้านเครื่องมือแพทย์และทางด้านเครื่องเสียง ซึ่งในทุกวันนี้วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อก (Analog Filter) และวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital Filter) วงจรกรองความถี่ทำหน้าที่จำแนกความถี่ตามความต้องการของผู้ใช้แบ่งเป็น 4 ชนิด ตามคุณลักษณะของผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) คือ วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) , วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) , วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) และวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน (Band Stop Filter) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรกรองความถี่แบบอนาลอก ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน (Resistor) , ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ชนิดวงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังรูปที่ 2.7 สำหรับใช้ป็นวงจรป้องกันของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้า ทดสอบในวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม



วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

รูปที่ 2.7 วงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน ออกแบบวงจรแบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ มีข้อพิจารณา ดังสมการที่ 2.1 -2.3 ส่วนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านออกแบบวงจรแบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ โดยมีข้อพิจารณา ดังสมการที่ 2.1, 2.4 และ 2.5 ดังนี้

$$f_c = 1/2\pi RC \quad (2.1)$$

$$A_{VHF} = 1/\sqrt{(1+(f_c/f)^2)} \quad (2.2)$$

$$\phi_{HF} = \tan^{-1}(f_c/f) \quad (2.3)$$

$$A_{VLF} = 1/\sqrt{(1+(f/f_c)^2)} \quad (2.4)$$

$$\phi_{LF} = -\tan^{-1}(f/f_c) \quad (2.5)$$

- เมื่อ f_c คือ ความถี่ข้ามผ่าน
- A_{VHF} คือ อัตราขยายแรงดันของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน
- ϕ_{HF} คือ มุมเฟสไหลเลื่อนของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน
- A_{VLF} คือ อัตราขยายแรงดันของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน
- ϕ_{LF} คือ มุมเฟสไหลเลื่อนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

2.6 ฉนวน [10]

ฉนวนหรือไดอิเล็กตริก เป็นสารที่นำไฟฟ้าได้น้อยมากหรือไม่นำไฟฟ้าเมื่อมีสนามไฟฟ้า มากระทำต่อฉนวน เนื่องจากภายใน โมเลกุล ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่เลยหรือมีจำนวนน้อย ฉนวนที่ สมบูรณ์เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะไม่มี การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระและสภาพต้านทาน จะต้องมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) คุณลักษณะสำคัญที่เป็นตัวบ่งบอกคุณภาพของฉนวนมี 4 ประเภท คือ ความต้านทาน , ค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity), แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกและ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

2.6.1 โพลีเอสเตอร์ (Polyester)

โพลีเอสเตอร์มีคุณสมบัติเด่นในการเป็นฉนวน ความแข็งแรงทางกลและความมี เสถียรภาพของรูปร่างในช่วงอุณหภูมิของการใช้งานกว้าง มีค่าความต้านทานทางอาร์ค (Arc Resistance) สูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยคุณสมบัติของโพลีเอสเตอร์ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของฟิลเลอร์ (Filler) โพลีเอสเตอร์สามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ตามมาตรฐาน MIL-M-14G คือ Type MAG , Type MAI-60 , Type MAT-30 และ Type MAI-30 โดยที่ Type MAG และ Type MAI-60 มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ดี โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM Type MAI-60 มีคุณสมบัติดังนี้ ค่าเปอร์มิตติวิตี ที่ความถี่ $60-10^6$ Hz เท่ากับ 5.6-4.6 , ค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ที่ความถี่ $60-10^6$ Hz เท่ากับ 0.10-0.20 , สภาพความต้านทาน เท่ากับ 10^{13} Ω -cm และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 375 V/mil

ดีเอ็มดีเป็นฉนวนผสมที่เกิดจากการทับซ้อนกันระหว่างโพลีเอสเตอร์ฟิล์มและโพลีเอสเตอร์ไฟเบอร์ โดยนำฉนวนทั้งสองชนิดมาทับซ้อนกันทำให้ความแข็งแรงทางกลมากขึ้น

การใช้งานโพลีเอสเตอร์ในอุปกรณ์ไฟฟ้านิยมใช้ในการทำขั้วต่อ (Terminal) หรือใช้เป็นฉนวนกั้นระหว่างชั้นของขดลวดในมอเตอร์ ทั้งนี้โพลีเอสเตอร์และดีเอ็มดีที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างฉนวนโพลีเอสเตอร์และดีเอ็มดีที่ใช้ในงานวิจัย

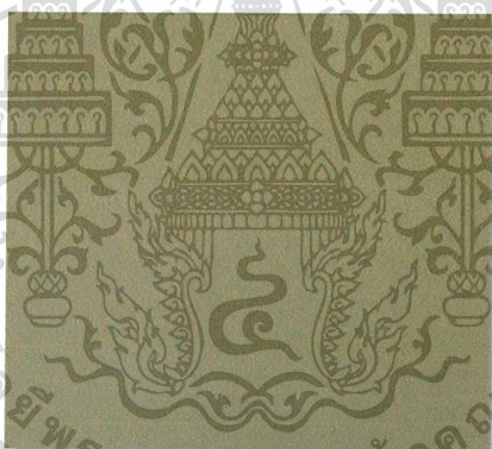
2.6.2 กระดาษฉนวน

กระดาษฉนวนที่ใช้ในงานในระบบไฟฟ้ามีอยู่ 2 ประเภท คือ กระดาษบาง (Paper) และ กระดาษอัดแรง (Board) กระดาษบางมีความหนาน้อยกว่า 8 mm. ส่วนกระดาษอัดแรงมีความหนามากกว่า 0.8 mm. ความหนาและความหนาแน่นของกระดาษฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน กล่าวคือ กระดาษที่มีความหนาแน่นต่ำ (0.8 g/cm^3) เหมาะสำหรับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุและเป็นฉนวนของเคเบิล ส่วนกระดาษที่มีความหนาแน่นปานกลาง (1.0 g/cm^3) เหมาะสำหรับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุไฟฟ้ากำลัง และกระดาษที่มีความหนาแน่นสูง (1.2 g/cm^3) เหมาะสำหรับการใช้ในตัวเก็บประจุแบบมีขั้วพลังงานหรือเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งนี้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกระดาษฉนวนแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของกระดาษฉนวนตามมาตรฐาน JIS C-2305 (Class 2)

		Thickness (mm)		
		0.13 - 0.8	$0.8 \leq t \leq 3.0$	$3.0 \leq t$
Density (g/mm^2)		0.95-1.30		
Moisture content (%) max.		10.0		
Ash content (%) max.		1.0		
Dielectric Breakdown	avg.	9.0	7.0	6.0
Strength (kV/mm)	min.	6.5	5.0	4.0

การใช้งานกระดาษฉนวนเป็นฉนวนมีหลากหลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นฉนวนกั้นระหว่างชั้นของขดลวด หรือกั้นระหว่างขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำในหม้อแปลงไฟฟ้า, ทำกระดาษถูกฟูกหรือกระดาษรองน้ำมัน เพื่อช่วยในการไหลหมุนเวียนของน้ำมันฉนวนทำให้การระบายความร้อนมีมากขึ้น ใช้เป็นลิ่มรองรับระหว่างขดลวดและ โครงสร้างหรือใช้สำหรับพันสายตัวนำที่ต้องการความยืดหยุ่น เป็นต้น สำหรับกระดาษฉนวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกระดาษฉนวนที่ใช้ในงานวิจัย

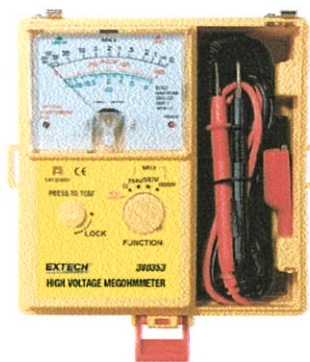
2.7 การตรวจสอบคุณสมบัติของฉนวน [10]

2.7.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Test)

การวัดความต้านทานฉนวนเป็นวิธีการทดสอบที่ไม่ทำลาย สำหรับตรวจสอบสภาพความเป็นฉนวนของฉนวน เพื่อตรวจสอบว่าฉนวนมีการชำรุดของเนื้อฉนวนหรือไม่ ซึ่งการชำรุดดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากฉนวนเสื่อมคุณภาพจากการใช้งานหรือสิ่งปนเปื้อน



Insulation Tester



Mega-ohm meter

รูปที่ 2.10 เครื่องมือวัดค่าความต้านทานฉนวน

สำหรับวิธีการในการวัดค่าความต้านทานฉนวนอาจใช้วิธี V-I Method หรือใช้เครื่องมือวัดค่าความต้านทานฉนวนดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทั้งนี้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้วัดสำหรับวัดค่าความต้านทานฉนวนของฉนวนที่ระดับแรงดันใช้งานต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ระดับแรงดันทดสอบค่าความต้านทานฉนวน

Rated Operating Voltage (V)	Testing Voltage (V)
< 300	500
300-600	500-1,000
2,400-5,000	2,500-5,000
5,000-15,000	5,000-15,000
>15,000	10,000-15,000

2.7.2 การทดสอบค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dissipation Factor Test : $\tan \delta$)

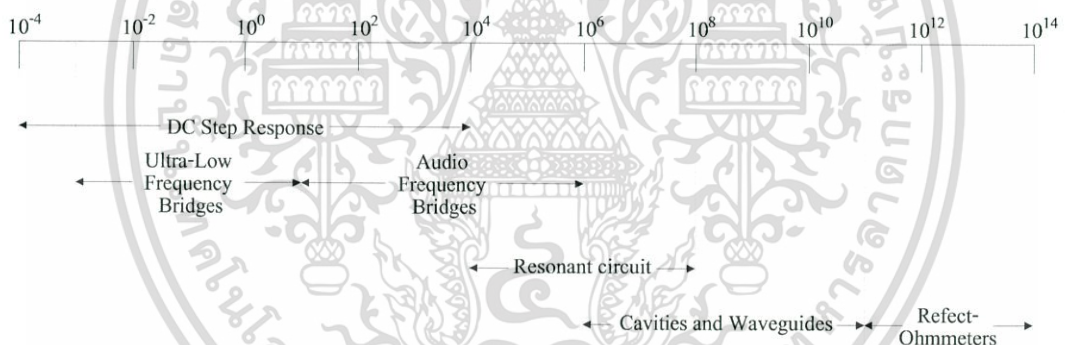
ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ใช้เป็นดัชนีชี้วัดอายุการใช้งานฉนวนตัวหนึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. ค่าความสูญเสียเนื่องจากการที่ฉนวนไม่ได้เป็นฉนวนบริสุทธิ์ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ามีผลให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าขึ้นมา ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากมีกระแสรั่วไหลผ่านฉนวน
2. ค่าความสูญเสียเนื่องจากพฤติกรรมการมีขั้ว โมเลกุลของฉนวนในสภาวะปกติจะดำรงอยู่อย่างอิสระ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ประจุบวกและประจุลบของโมเลกุลจะแยกออกจากกันและประจุติดตัวเสมือนไดโพลที่มีขนาดของประจุเท่ากันแต่มีขั้วตรงกันข้าม แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะกระทำต่อไดโพล ให้เกิดการปรับทิศทางให้วางตัวอยู่ในแนวสนามไฟฟ้า

ในกรณีที่อุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนแปลง ใดโพลจะต้องเกิดการเรียงตัวสลับที่ไปมาตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน

3. ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเกิดดิซซาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวน การเกิดดิซซาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวนจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่เนื้อฉนวนไม่ได้เป็นเนื้อเดียวสมบูรณ์ทั้งหมด (Non homogeneous) ภายในเนื้อฉนวนอาจจะมีโพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอมรวมอยู่ด้วย โพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอมจะมีค่าความจุไฟฟ้าและค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าเนื้อฉนวน เมื่อฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้ามักจะเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นภายในโพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอม กระแสดิซซาร์จจะอยู่ในโพรงอากาศ เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนชนกับผนังโพรง เกิดปฏิกิริยาเคมีและความร้อนขึ้น การเกิดดิซซาร์จบางส่วนดังกล่าวภายในเนื้อฉนวนจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนลดลง

โดยทั่วไปแล้วการวัดค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนสามารถที่จะทำได้ในช่วงกว้างของความถี่ที่ใช้งาน อย่างไรก็ตามค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกนั้นยังขึ้นกับอุณหภูมิและความถี่อีกด้วย โดยวิธีการวัดค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนแต่ละวิธีจะเหมาะสมกับช่วงของความถี่หนึ่งเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไคอะแกรมวิธีการวัดค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวน [10]

การตรวจสอบค่าความจุไฟฟ้าและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนสามารถใช้เครื่องมือวัดประเภท Schering Bridge โดยที่เครื่องมือวัดที่นิยมใช้กันในปัจจุบันได้มีการพัฒนาปรับปรุงไปมาก ยกตัวอย่างเช่น Glynne Bridge (Transformer Ratio Arm Bridge) เป็นต้น ดังมีรายละเอียดแสดงตัวอย่างอุปกรณ์ในรูปที่ 2.12



Automatic Schering Bridge Tester



Transformer Ratio Arm bridge

รูปที่ 2.12 อุปกรณ์วัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวน

2.7.3 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Breakdown Strength Test)

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย หรือเกิดการเบรกดาวน์ หรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพ หน่วยที่นิยมใช้คือ kV/cm ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะทางมิติของอิล็คโตรด ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กตริก คุณสมบัติของแรงดันที่ฉนวนได้รับและระยะเวลาที่ฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นก่อนที่จะนำฉนวนไปใช้งานในระบบไฟฟ้า จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนก่อน โดยที่วิธีการทดสอบและผลการทดสอบจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานที่เลือกใช้ สำหรับมาตรฐาน IEC 60060-1 ได้ระบุคุณสมบัติของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 2 ชนิด คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ สำหรับการสูญเสียสภาพความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนมี 2 ลักษณะ คือ การร้าวไฟตามผิวและการเบรกดาวน์ทะลุ (Puncture) ซึ่งมีตัวอย่างการสูญเสียสภาพความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.13



การร้าวไฟตามผิว



การแตกเสียหาย

รูปที่ 2.13 การสูญเสียสภาพความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม ซึ่งก่อนดำเนินการประกอบสร้าง จะทำการจำลองวิเคราะห์เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม , ความสามารถในการกรองความถี่ออสซิลเลชันของวงจรกรองความถี่ของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ออกแบบ ซึ่งในการศึกษาดังกล่าวจะพิจารณาเฉพาะแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่ววอกที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น

3.1 การออกแบบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมโดยใช้วงจรความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกัน

วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกทับซ้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ประกอบนั้น ใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบภายในห้องทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูงของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1

สำหรับวงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้เป็นวงจรป้องกันออกแบบโดยใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ มีคุณสมบัติที่ต้องการตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์		หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ	
แรงดันอิมพัลส์สูงสุด	200 kV	แรงดันสูงสุด	100 kV
ความต้านทานอัดประจุ	25 k Ω	พิกัดกำลัง	100 kVA
ความจุไฟฟ้าเก็บประจุอิมพัลส์	100 nF	ความถี่	50 Hz
ความจุไฟฟ้าโหลด	2 nF	ความต้านทานจำกัดกระแส	
ความต้านทานหน่วง	190 Ω	ผิดพร้อม	2.5 M Ω
ความต้านทานปล่อยประจุ	690 Ω		

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ต้องการ

รายละเอียด	วงจรกรองความถี่สูงผ่าน	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	180 kV _{peak}	180 kV _{peak}
ความถี่ข้ามผ่าน	50 Hz	0.5 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การออกแบบวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านจะต้องพิจารณาถึงค่าองค์ประกอบของวงจร เพื่อให้ค่าความต้านทานกลายเป็นโหลดของวงจร รวมทั้งผลกระทบที่มีต่อความผิดเพี้ยนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ความจุไฟฟ้าของวงจรรองความถี่สูงผ่านและความต้านทานของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านส่งผลต่อรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามากที่สุด [7]

รายการคำนวณของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน พิกัดแรงดันที่ต้องการมีค่า 180 kV ทั้งนี้ออกแบบเผื่อ 125% ของพิกัดแรงดันที่ต้องการ จะได้พิกัดแรงดันในการออกแบบเป็น 225 kV

3.1.1 วงจรรองความถี่สูงผ่าน

ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้มีค่า $0.22 \mu F$ พิกัดแรงดัน $1,600 V_{dc} / 650 V_{ac}$ คำนวณหาจำนวนตัวเก็บประจุและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมได้ ดังนี้

$$\text{จำนวนตัวเก็บประจุ } N = \frac{225 \times 10^3}{1600} = 140 \text{ ตัว}$$

$$\text{ความจุไฟฟ้า } C = \frac{0.22 \times 10^{-12}}{140} = 1,571 \text{ pF}$$

ตัวต้านทานที่เลือกใช้มีค่า 1,000 V (Maximum Overload Voltage) $1 k\Omega$ จำนวน 250 ตัวต่ออนุกรมกัน สามารถคำนวณค่าพิกัดแรงดันและค่าความต้านทาน ได้ดังนี้

$$\text{แรงดันไฟฟ้า } V = 1,000 \times 250 = 250 \text{ kV}$$

$$\text{ความต้านทาน } R = 1,000 \times 250 = 250 \text{ k}\Omega$$

3.1.2 วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้มีค่า $0.022 \mu F$ พิกัดแรงดัน $1,600 V_{dc} / 650 V_{ac}$ คำนวณหาจำนวนตัวเก็บประจุและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมได้ ดังนี้

$$\text{จำนวนตัวเก็บประจุ } N = \frac{225 \times 10^3}{1600} = 140 \text{ ตัว}$$

$$\text{ความจุไฟฟ้า } C = \frac{0.022 \times 10^{-12}}{140} = 157 \text{ pF}$$

ตัวต้านทานที่เลือกใช้มีค่า 1,000 V (Maximum Overload Voltage) $2.2 k\Omega$ จำนวน 250 ตัวต่ออนุกรมกัน สามารถคำนวณค่าพิกัดแรงดันและค่าความต้านทานได้ดังนี้

$$\text{แรงดันไฟฟ้า } V = 1,000 \times 250 = 250 \text{ kV}$$

$$\text{ความต้านทาน } R = 2,200 \times 250 = 550 \text{ k}\Omega$$

จากค่าองค์ประกอบของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านในรายการคำนวณข้างต้น สามารถสรุปค่าพิกัดแรงดันและคำนวณคุณสมบัติของวงจรจากสมการที่ 2.1-2.5 โดยมีขนาดพิกัดและผลการคำนวณตามตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบ

	วงจรรองความถี่สูงผ่าน	วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน
พิกัดแรงดัน (kV)	225	225
ความถี่ข้ามผ่าน (Hz)	405	1,843
อัตราขยายแรงดัน	-0.12	0.99
มุมเฟสไหลเลื่อน (degree)	83.0	-1.6

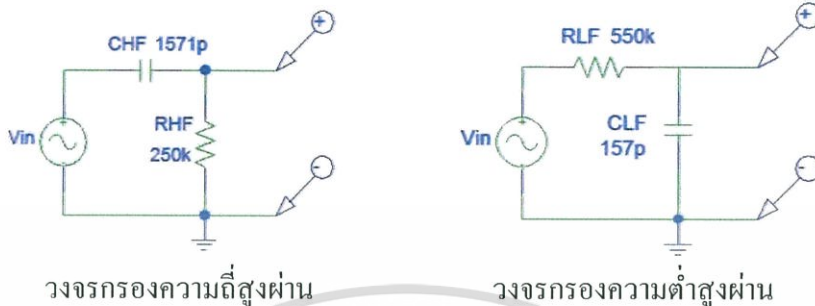
3.2 การจำลองวิเคราะห์ห้วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ก่อนการประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม จำเป็นต้องมีการจำลองวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรที่ได้ออกแบบ เพื่อเป็นการตรวจสอบและยืนยันถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจร อันได้แก่ ความสามารถในการสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม, ลักษณะรูปคลื่นที่สร้างได้, ความสามารถในการป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านตามลำดับ รวมทั้งเป็นการลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนของการประกอบสร้างวงจร ทั้งนี้หากผลการจำลองวิเคราะห์แสดงผลว่าค่าองค์ประกอบวงจรที่ออกแบบไม่สามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมตามที่ต้องการ ก็สามารถคำนวณค่าองค์ประกอบวงจรใหม่ได้ สำหรับวงจรที่เลือกใช้จำลองวิเคราะห์คือ โปรแกรม PSpice Student Edition ซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้า ใช้งานได้ง่ายและมีใช้งานในการวิเคราะห์ห้วงจรเป็นจำนวนมาก โดยหัวข้อการจำลองวิเคราะห์มี 2 หัวข้อ คือ การจำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่และการจำลองวิเคราะห์ห้วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม โดยการจำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่เป็นการศึกษาถึงความสามารถในการป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบจากความถี่ออสซิลเลชันที่เกิดขึ้นจากแหล่งจ่ายแรงดันทั้งสอง และการจำลองวิเคราะห์ห้วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมเป็นการศึกษาถึงความสามารถในการสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่จะประกอบสร้าง ทั้งนี้รายละเอียดการจำลองวิเคราะห์แสดงในข้อ 3.2.1 และ 3.2.2

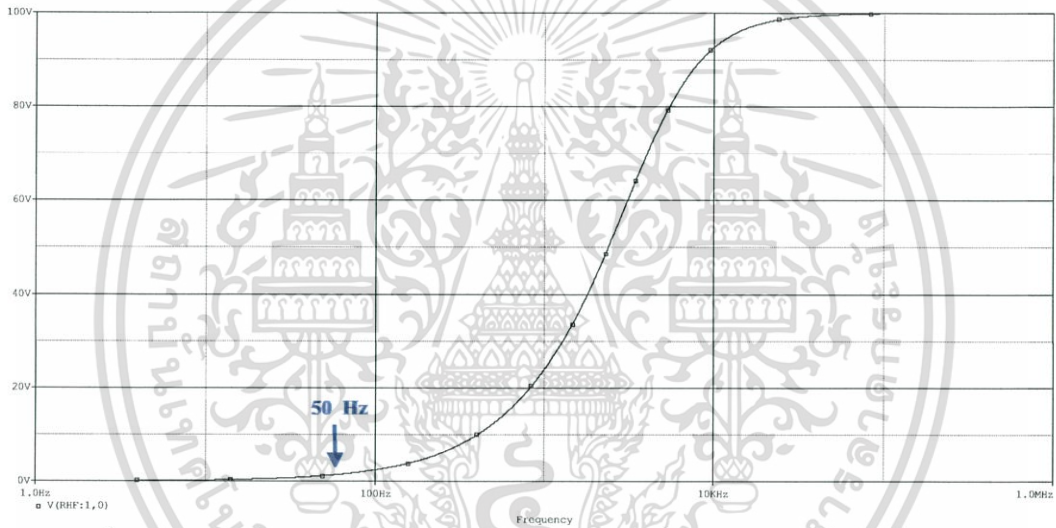
3.2.1 การจำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

จำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้โปรแกรม PSpice student edition และใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรจากรายการคำนวณตามข้อ 3.1 โดยมีวงจรการจำลองวิเคราะห์ตามรูปที่ 3.1 และมีผลการจำลองวิเคราะห์ตามรูปที่ 3.2 และ 3.4 ซึ่งจากการจำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่สูงผ่าน

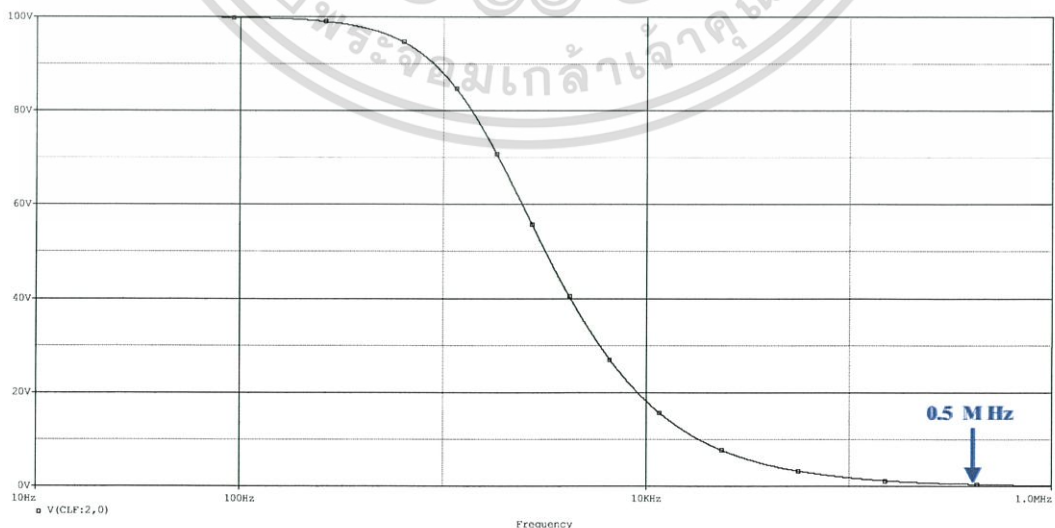
และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้โปรแกรม PSpice พบว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบสามารถกรองความถี่ออสซิลเลทของแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า 0.5 MHz [11] และวงจรกรองความถี่สูงผ่านสามารถกรองความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ได้



รูปที่ 3.1 วงจรจำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่



รูปที่ 3.2 ผลการจำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

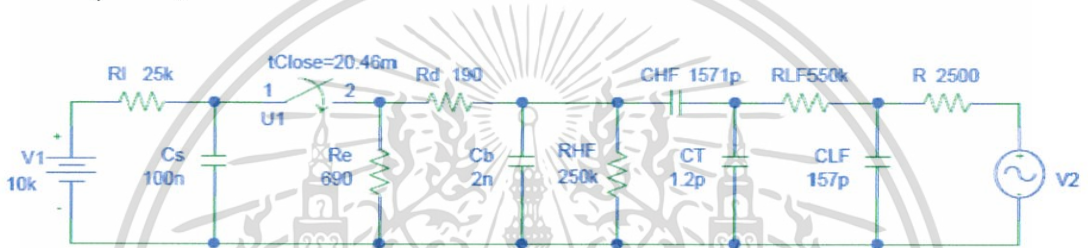


รูปที่ 3.3 ผลการจำลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

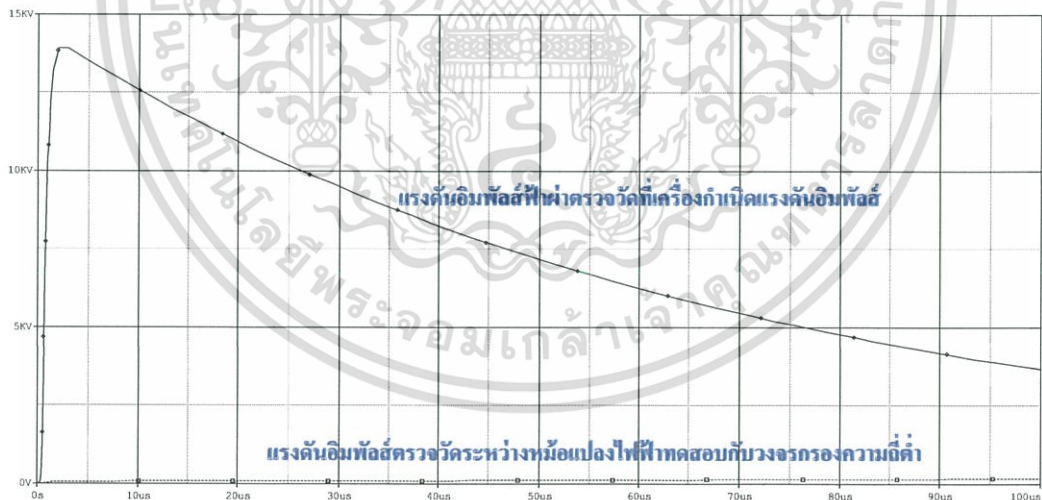
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การจำลองวิเคราะห์ห้วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

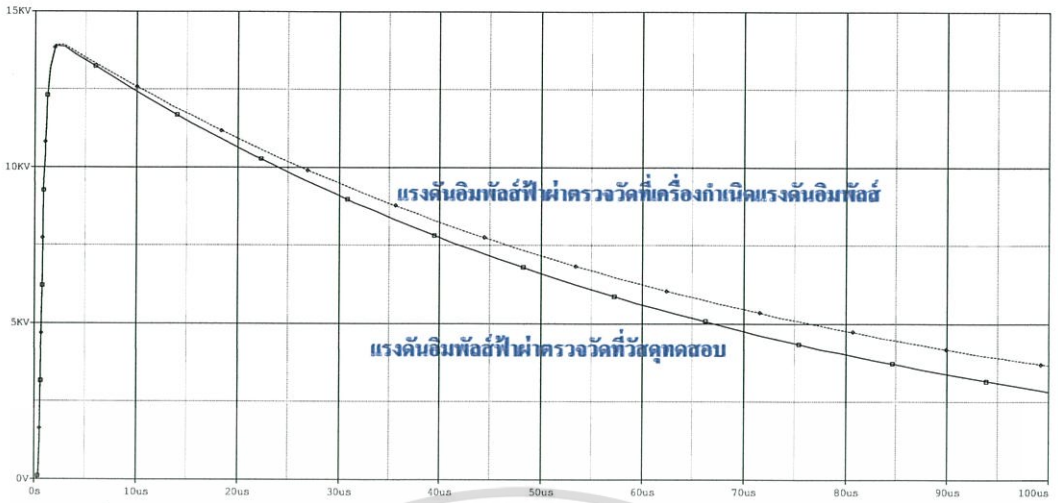
จำลองวิเคราะห์ห้วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบตามตารางที่ 3.1 และค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านจากรายการคำนวณตามข้อ 3.1.1 และ 3.1.2 โดยมีวงจรจำลองวิเคราะห์ตามรูปที่ 3.4 และมีผลการจำลองวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.5-3.12 ซึ่งจากการจำลองวิเคราะห์ พบว่าวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านสามารถกรองความถี่ออกสขิลเลชันของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ โดยรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ตรวจวัดได้ที่วัสดุทดสอบมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-1 และวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ออกแบบสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่มุมต่าง ๆ ได้



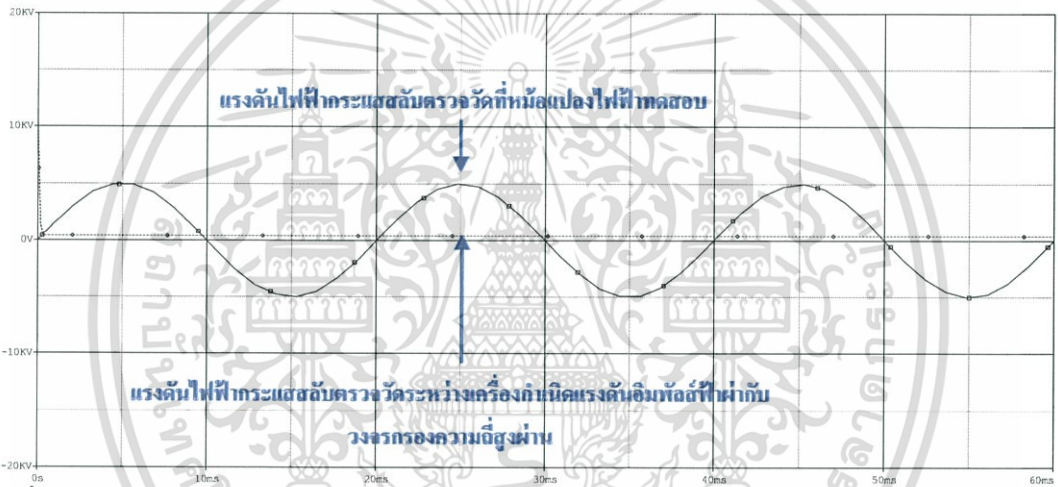
รูปที่ 3.4 วงจรจำลองวิเคราะห์ของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม



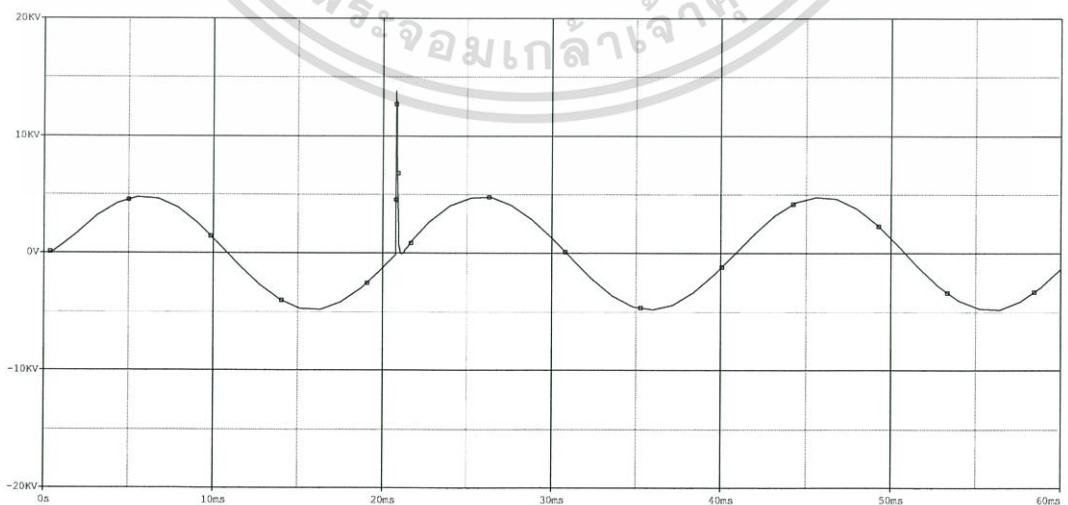
รูปที่ 3.5 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ตรวจวัดได้ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบกับวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 3.6 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้วัสดุทดสอบ

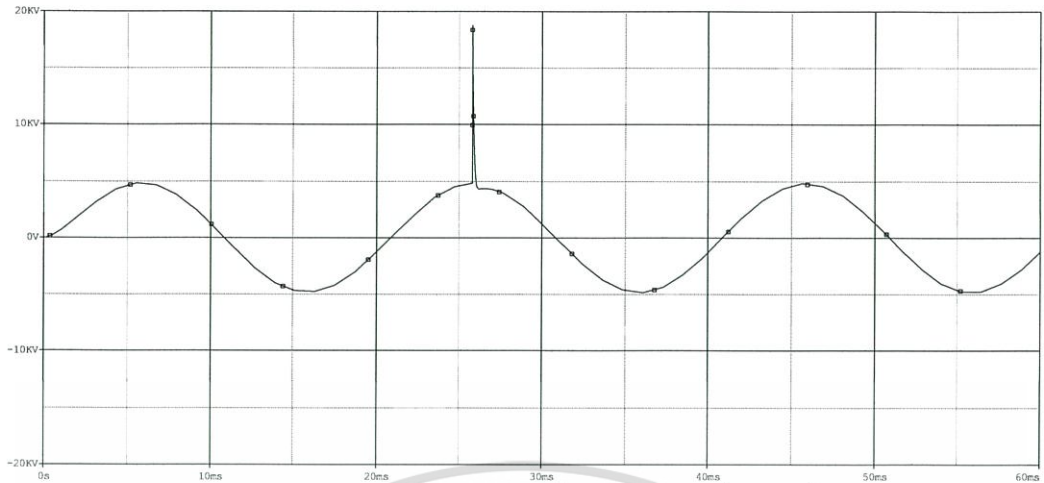


รูปที่ 3.7 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตรวจวัดได้ระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ากับวงจรรองความถี่สูงผ่าน

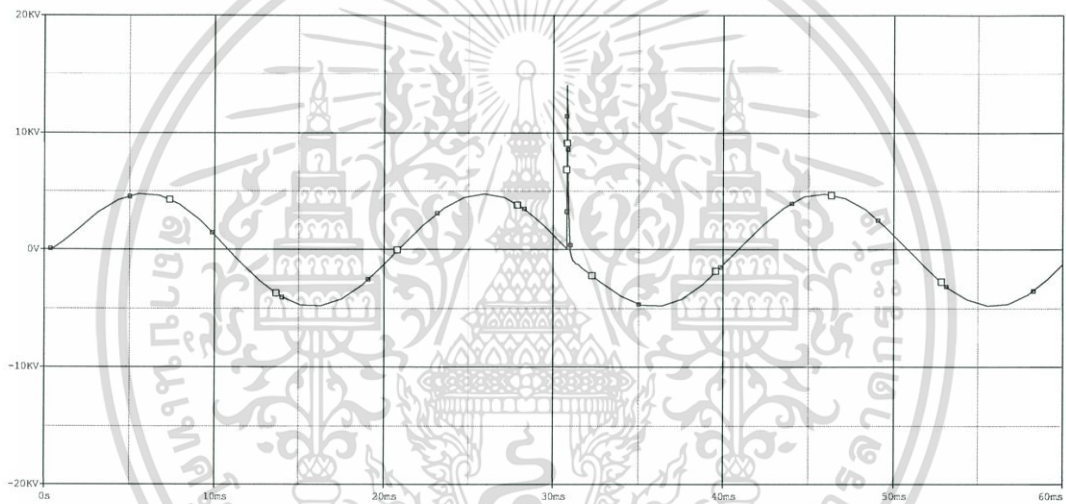


รูปที่ 3.8 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 0°

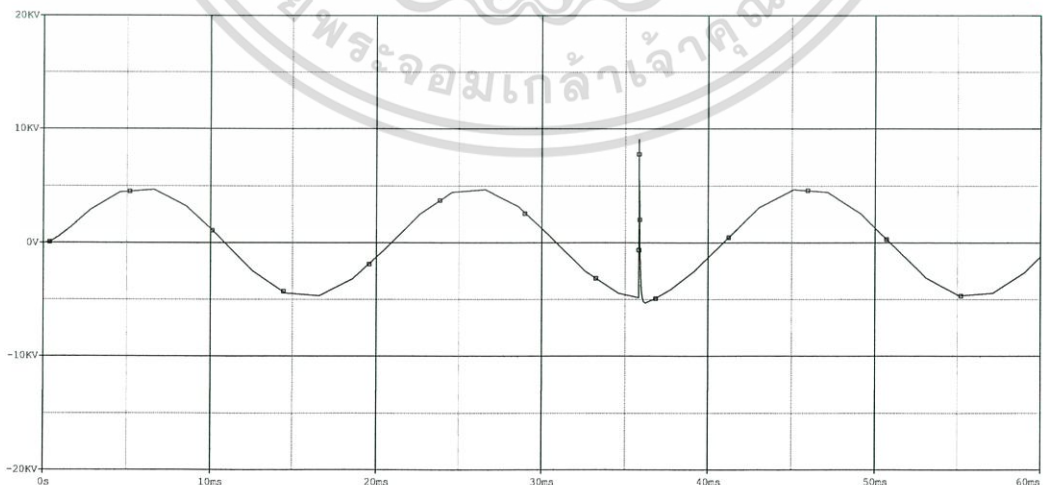
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 90°



รูปที่ 3.10 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 180°



รูปที่ 3.11 ผลการจำลองวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 270°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การประกอบวงจรรองความถี่สูงผ่าน , วงจรรองความถี่ต่ำผ่านและวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

จากผลการจำลองวิเคราะห์ตามข้อ 3.2 พบว่าค่าองค์ประกอบวงจรที่ออกแบบในข้อ 3.1 สามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมได้ตามความต้องการ อีกทั้งวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านสามารถป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงดำเนินการประกอบวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านโดยเลือกใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุตามที่ระบุในข้อ 3.1.1 และ 3.1.2 ประกอบบนแผ่นอะคริลิกหนา 1 cm และบรรจุลงในท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm จากนั้นประกอบชุดอิเล็กทรอนิกส์ อะลูมิเนียมพร้อมซีลด์ร้อยต่อต่าง ๆ และสุดท้ายฉนวนวงจรรองความถี่ทั้งสองด้วยก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) ความดัน 2 Bar เพื่อเพิ่มความสามารถในการป้องกันการเบรคควานซ์ข้ามผ่านระหว่างรอยต่อของตัวต้านทานหรือตัวเก็บประจุย่อยของแต่ละอุปกรณ์ ทั้งนี้วงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ประกอบสร้างแล้วเสร็จแสดงดังรูปที่ 3.13

ภายหลังประกอบวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแล้วเสร็จ จึงนำวงจรรองความถี่ทั้งสองประกอบเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์, หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบและวัสดุทดสอบเพื่อสร้างเป็นวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม โดยวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบแล้วเสร็จ แสดงดังรูปที่ 3.14 และมีชุดควบคุมวงจรรวมทั้งส่วนแสดงผลดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.12 วงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสร้าง



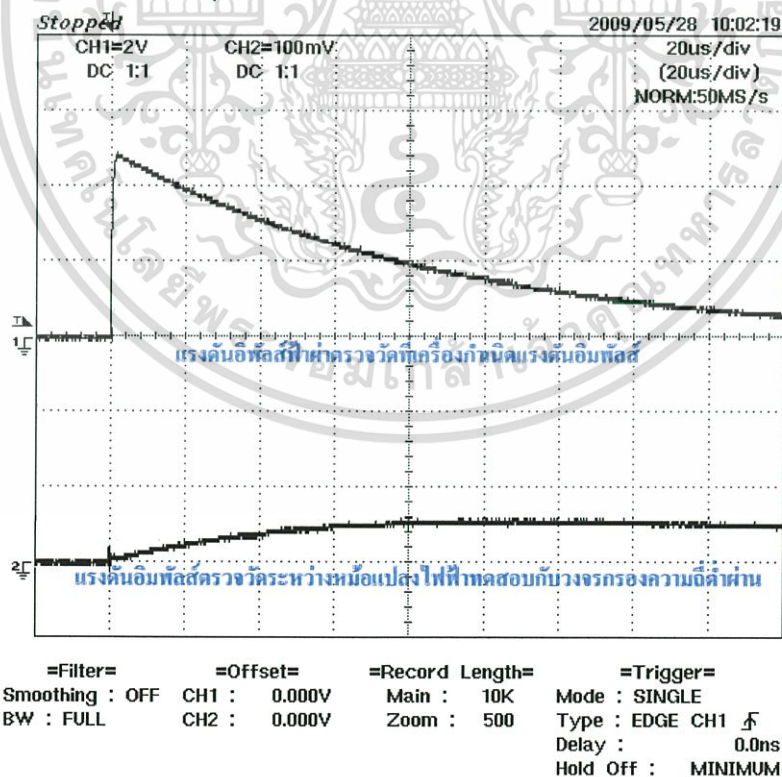
รูปที่ 3.14 ชุดควบคุมและแสดงผลวงจรถองสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การตรวจสอบการสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมจากวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบ

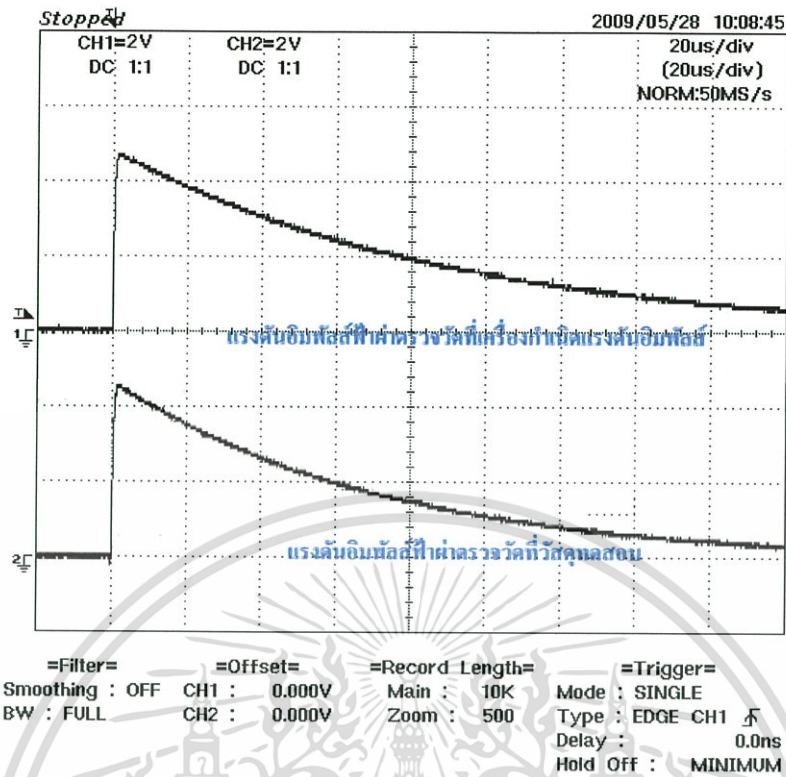
การทดสอบการสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมเป็นการตรวจสอบว่าวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมได้ถูกต้องตามผลที่ได้จากการคำนวณและการจำลองวิเคราะห์ โดยตรวจสอบความสามารถในการกรองความถี่ของสวิตช์ที่เกิดขึ้นในวงจรของวงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตกคร่อมที่วัสดุทดสอบว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของแรงดันอิมพัลส์หรือไม่ อีกทั้งตรวจสอบแรงดันรูปคลื่นผสมที่ตกคร่อมที่วัสดุทดสอบว่าสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุมเฟสต่าง ๆ ได้หรือไม่ เพื่อนำแรงดันรูปคลื่นผสมดังกล่าวไปศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อฉนวนต่อไป

การตรวจสอบการสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมจากวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบ พิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในระบบจำหน่าย 22 kV ซึ่งมีระดับแรงดันไฟฟ้าเฟส-กราวด์ (Phase-Ground) เท่ากับ $12.7 \text{ kV}_{\text{rms}}$ หรือ $17.96 \text{ kV}_{\text{peak}}$ และระดับความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 22 kV เท่ากับ $125 \text{ kV}_{\text{peak}}$ จากการทดสอบพบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบมีลักษณะรูปคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3.16-3.22 และมีค่าตรวจวัดได้โดยสรุป ดังตารางที่ 3.4

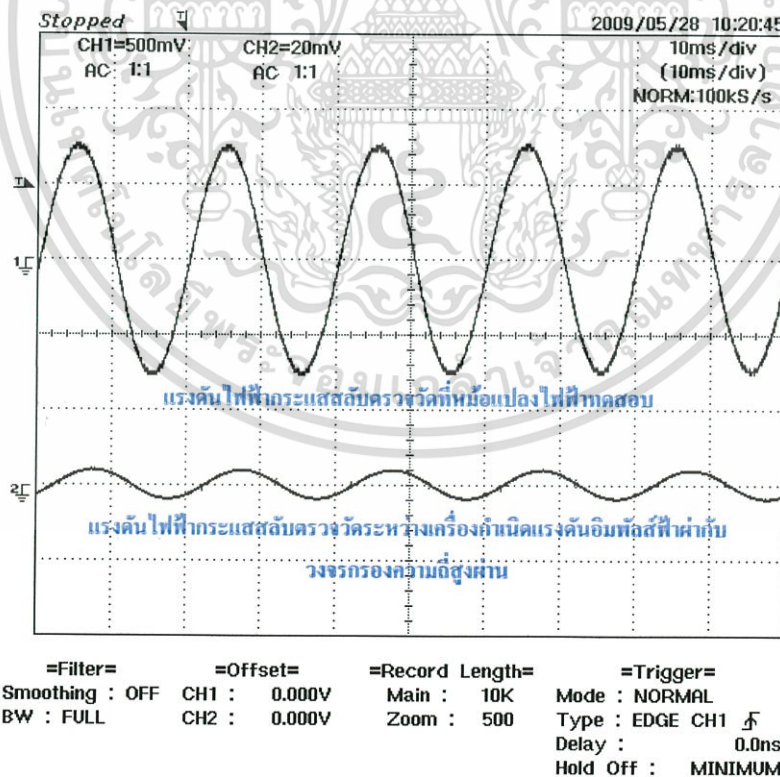


รูปที่ 3.15 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าที่ตรวจวัดได้ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

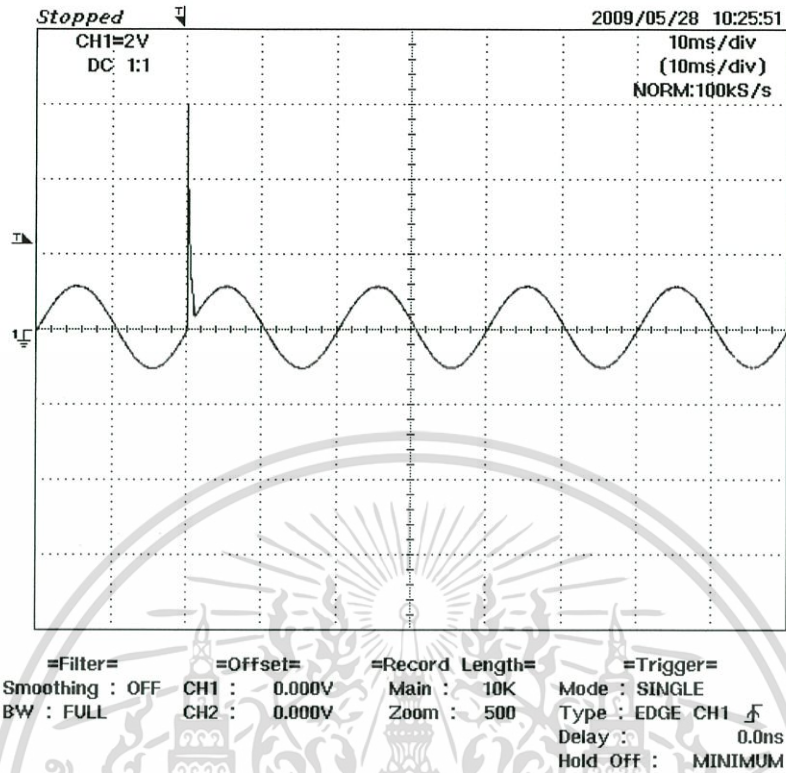
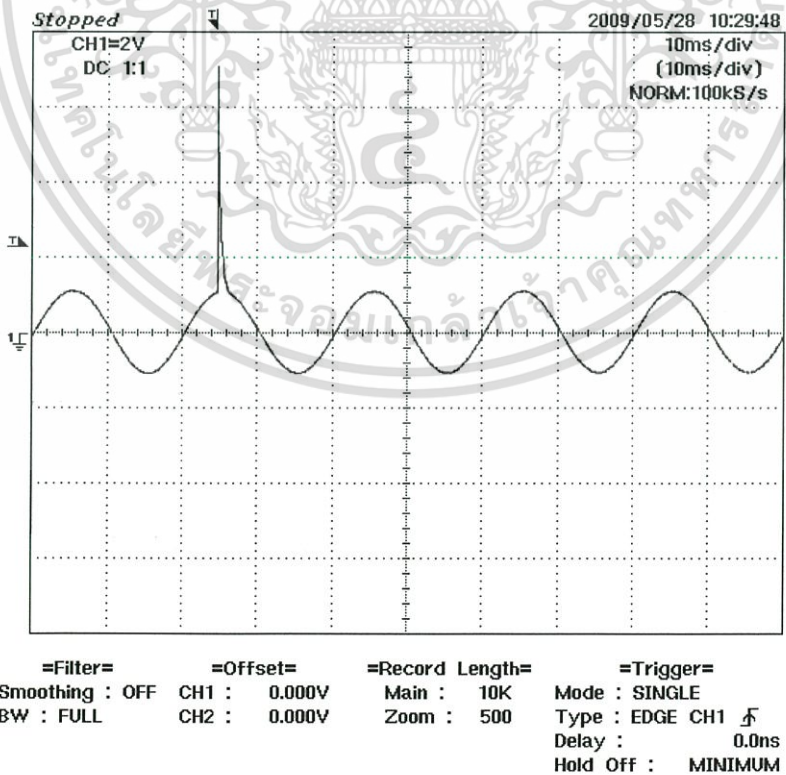


รูปที่ 3.16 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันอินพุตไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้วัสดุทดสอบ

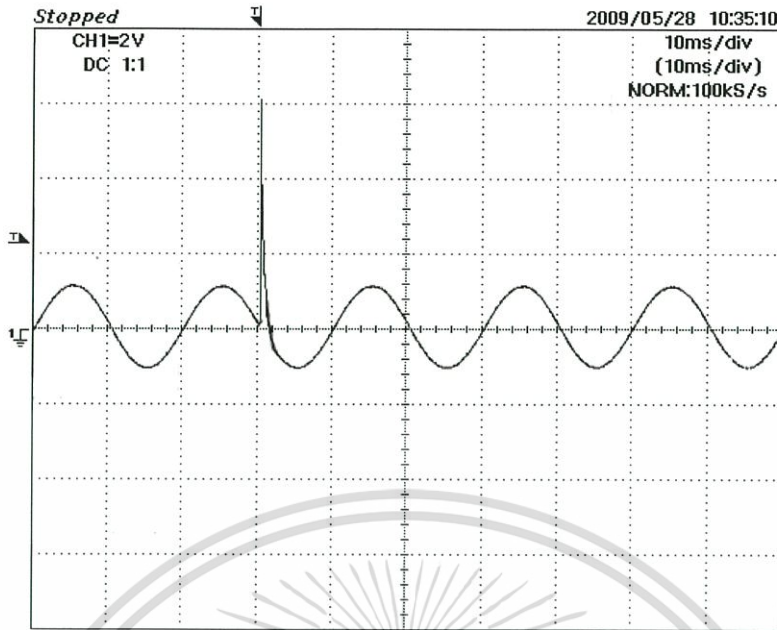


รูปที่ 3.17 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตรวจวัดได้ระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันอินพุตไฟฟ้ากับวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

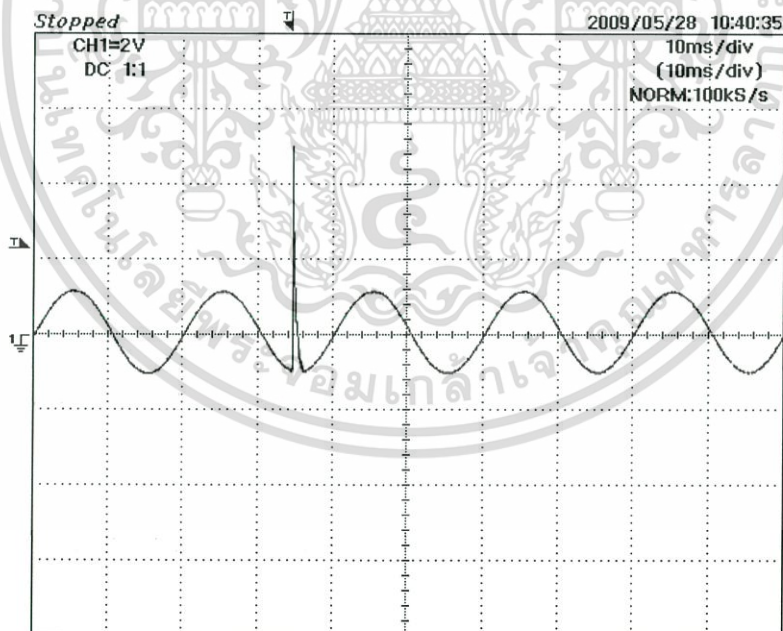
รูปที่ 3.18 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 0° รูปที่ 3.19 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : 0.000V Main : 10K Mode : SINGLE
BW : FULL CH2 : 0.000V Zoom : 500 Type : EDGE CH1
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 3.20 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 180°



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : 0.000V Main : 10K Mode : SINGLE
BW : FULL CH2 : 0.000V Zoom : 500 Type : EDGE CH1
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 3.21 ผลการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 270°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของแรงดันรูปคลื่นผสมที่ตรวจวัดได้จากวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบ

คุณสมบัติ	ค่าที่ตรวจวัดได้ที่		
	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	วัสดุทดสอบ	หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ
ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	125 kV _{peak}	121.50 kV _{peak}	1.30 kV _{peak}
ช่วงเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	1.3/59 μs	1.29/51.8 μs	-
ค่ายอดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	1.50 kV _{peak}	16.50 kV _{peak}	17.96 kV _{peak}

ตารางที่ 3.4 สามารถสรุปคุณสมบัติของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟส-กราวด์ ระบบ 22 เควี 17.96 kV_{peak} 50 Hz และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ขั้วบวก 125 kV_{peak} 1.2/50 μs ได้ดังนี้

- วงจรที่ประกอบสร้างสามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมบนวัสดุทดสอบได้
 - แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีช่วงเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-1 โดยมีการลดทอนค่ายอดแรงดัน 2.80%
 - แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบ มีการลดทอนค่ายอดแรงดัน 8.13%
- ภายหลังการประกอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมแล้วเสร็จ จึงใช้วงจรดังกล่าวสำหรับสร้างแรงดันทดสอบฉนวน เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนภายหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมต่อไป

บทที่ 4

การศึกษาผลของแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนภายหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมเปรียบเทียบกับฉนวนที่ไม่ได้รับแรงดันไฟฟ้าใด ๆ , ฉนวนที่ได้รับเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และฉนวนที่ได้รับเฉพาะแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ทั้งนี้ฉนวนที่เลือกใช้เป็นตัวอย่างทดสอบ ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม หนา 350 μm , ดีเอ็มดี หนา 350 μm และกระดาษฉนวน หนา 500 μm โดยมีตัวอย่างฉนวนที่ใช้ทดสอบ แสดงในรูปที่ 4.1 สำหรับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนที่ดำเนินการศึกษาได้แก่ ค่าความต้านทานฉนวน , ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก , ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า



โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม

ดีเอ็มดี

กระดาษฉนวน

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างฉนวนโพลีเอสเตอร์ , ดีเอ็มดีและกระดาษฉนวนที่ใช้ในการศึกษา

4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนภายหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม

4.1.1 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับฉนวนที่จะใช้ศึกษา

- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 5.56 kV_{peak} 50 Hz เป็นระยะเวลา 5 นาที
- แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 6 kV_{peak} 1.2/50 μs จำนวน 10 รูปคลื่น
- แรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 5.56 kV_{peak} 50 Hz และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 6 kV_{peak} 1.2/50 μs โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นระยะเวลา 5 นาที และในระหว่างนั้นป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวจำนวน 10 รูปคลื่น ทั้งนี้แรงดันรูปคลื่นผสมที่ใช้มีมุมทับซ้อนแยกเป็น 4 กลุ่มย่อย คือแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุมทับซ้อน $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$

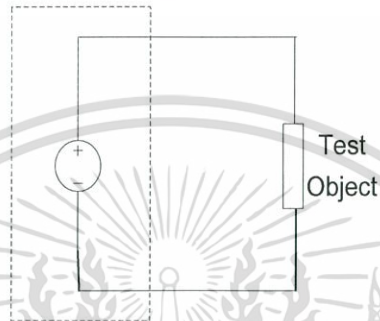
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน

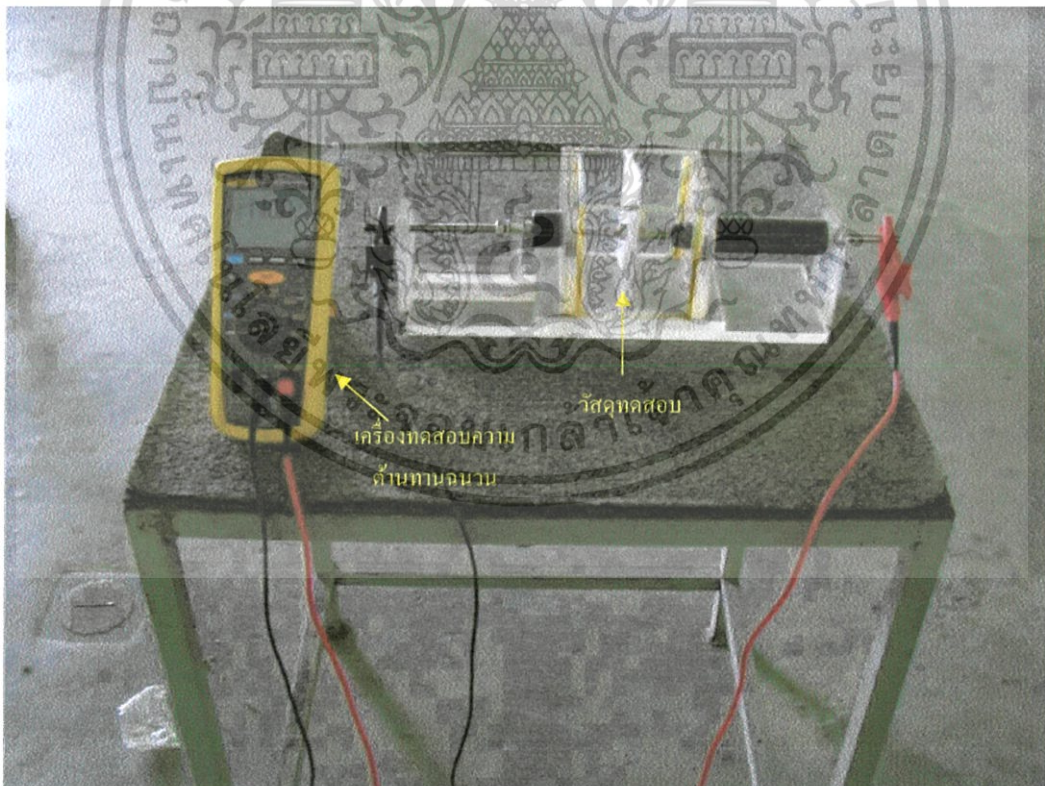
นำฉนวนที่ไม่ได้รับแรงดันไฟฟ้าใด ๆ จำนวน 5 ชิ้น และฉนวนที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าตามข้อ 4.1.1 จำนวนอย่างละ 5 ชิ้น รวมจำนวน 35 ชิ้น มาทำการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน โดยมีแรงดันทดสอบที่ $2,500 \text{ V}_{dc}$ โดยมีไดอะแกรมและรูปวงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 4.2-4.3

จากการทดสอบสามารถสรุปค่าความต้านทานฉนวน โดยเฉลี่ยของฉนวนชนิดต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.1

Insulation Test Set



รูปที่ 4.2 ไดอะแกรมแสดงวงจรทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน



รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนของฉนวนก่อนและหลังได้รับแรงดันทดสอบ

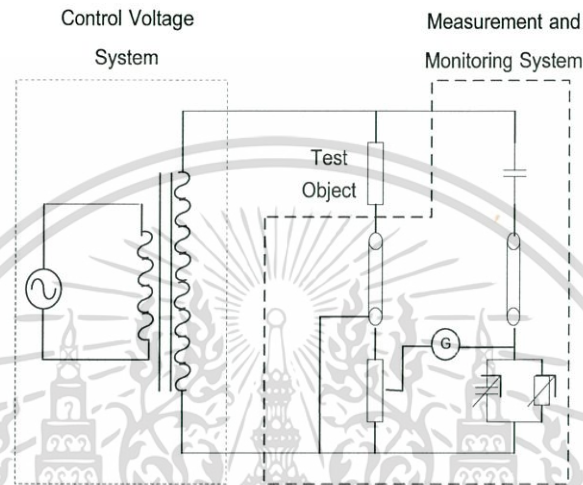
ประเภทฉนวน	ค่าความต้านทานฉนวน (GΩ)		
	โพลีเอสเตอร์	กระดาษฉนวน	ดีเอ็มดี
ไม่ได้รับแรงดัน	10.56	3.89	7.12
ได้รับเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	10.24	3.88	7.04
ได้รับเฉพาะแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	10.22	3.86	6.91
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 0°	10.13	3.68	6.56
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 90°	9.43	3.28	6.22
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 180°	10.15	3.71	6.60
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 270°	10.20	3.79	6.85

จากตารางที่ 4.1 พบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมส่งผลให้ค่าความต้านทานฉนวนของฉนวนที่ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุมทับซ้อน 90° ส่งผลให้ค่าความต้านทานฉนวนมีค่าลดลงมากที่สุด

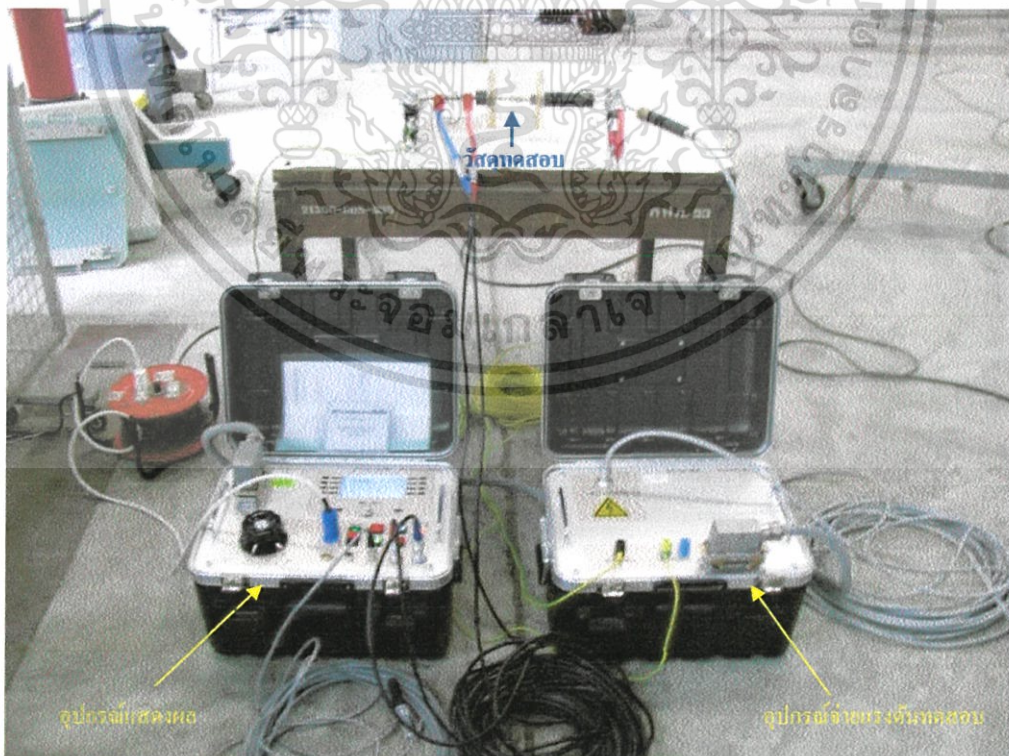
4.1.3 การทดสอบหาค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

นำฉนวนที่ไม่ได้รับแรงดันไฟฟ้าใด ๆ จำนวน 5 ชิ้น และฉนวนที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าตามข้อ 4.1.1 จำนวนอย่างละ 5 ชิ้น รวมจำนวน 35 ชิ้น มาทำการทดสอบหาค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยมีไดอะแกรมและรูปวงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 4.4-4.5

จากการทดสอบสามารถสรุปค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกโดยเฉลี่ยของฉนวนชนิดต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมแสดงวงจรทดสอบหาค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก



รูปที่ 4.5 วงจรการทดสอบหาค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนก่อนและหลังได้รับแรงดันทดสอบ

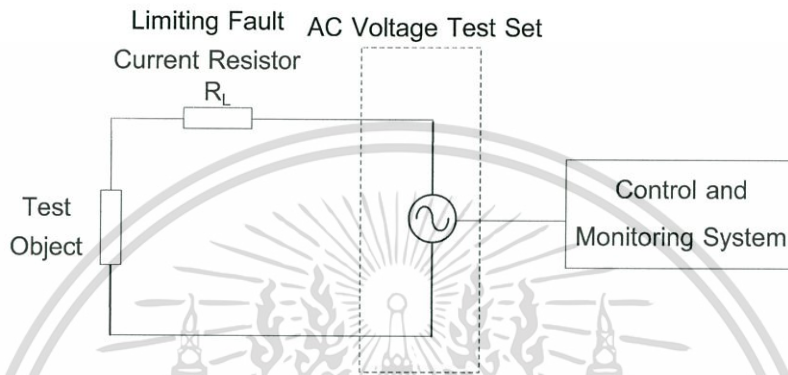
ประเภทฉนวน	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก		
	โพลีเอสเตอร์	กระดาษฉนวน	ดีเอ็มดี
ไม่ได้รับแรงดัน	0.414	0.315	0.370
ได้รับเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	0.427	0.570	0.399
ได้รับเฉพาะแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	0.439	0.562	0.408
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 0°	0.446	0.575	0.415
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 90°	0.452	0.625	0.459
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 180°	0.441	0.572	0.417
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 270°	0.440	0.565	0.412

จากตารางที่ 4.2 พบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมส่งผลให้ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนที่ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุมทับซ้อน 90° ส่งผลให้ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด

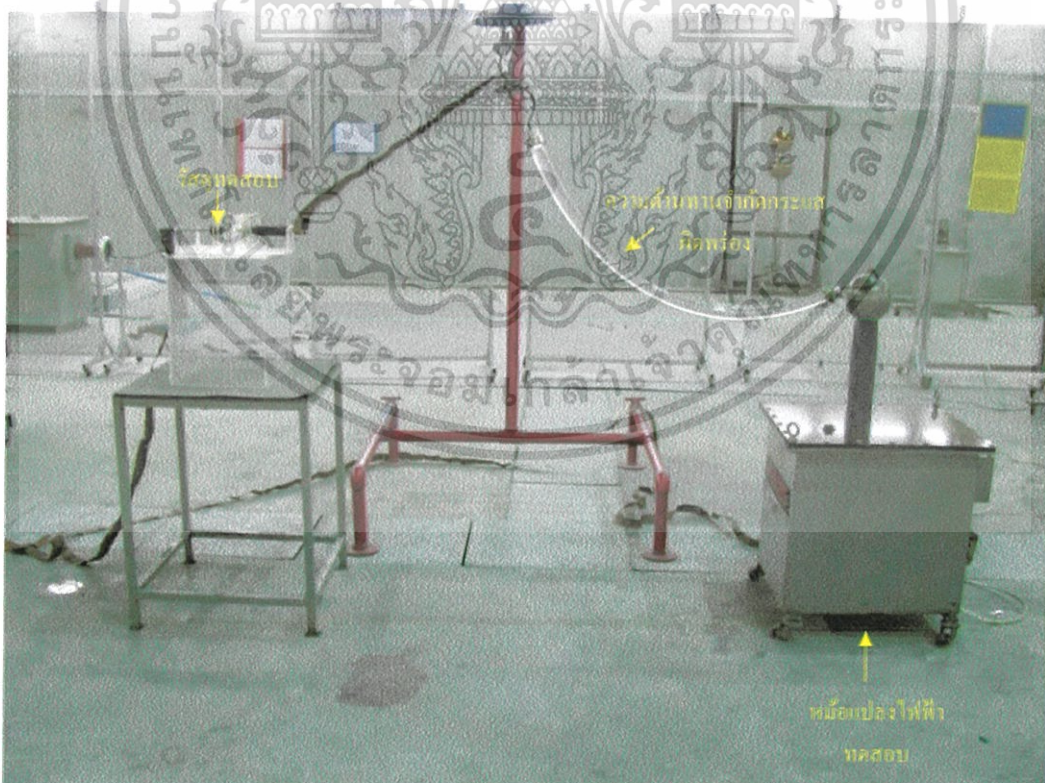
4.1.4 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

นำฉนวนที่ไม่ได้รับแรงดันไฟฟ้าใด ๆ จำนวน 5 ชิ้น และฉนวนที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าตามข้อ 4.1.1 จำนวนอย่างละ 5 ชิ้น รวมจำนวน 35 ชิ้น มาทำการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีไดอะแกรมและรูปวงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 4.6-4.7

จากการทดสอบสามารถสรุปค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยเฉลี่ยของฉนวนชนิดต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.6 ไดอะแกรมแสดงวงจรทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 4.7 วงจรการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก่อนและหลังได้รับแรงดันทดสอบ

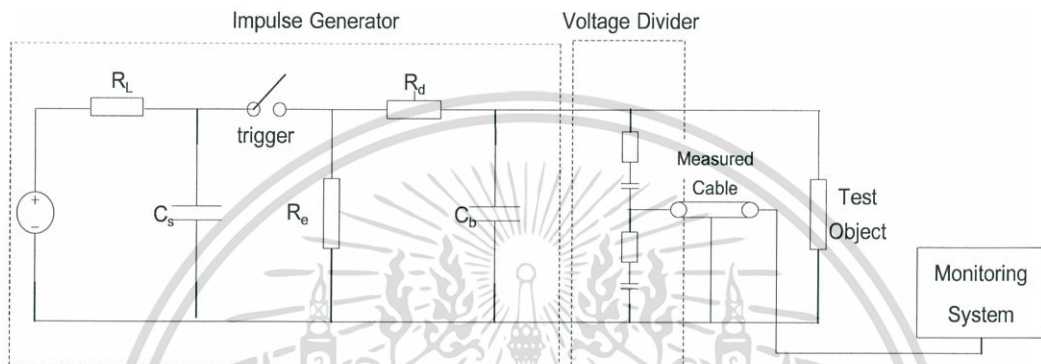
ประเภทฉนวน	ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (kV_{rms})		
	โพลีเอสเตอร์	กระดาษฉนวน	ดีเอ็มดี
ไม่ได้รับแรงดัน	23.10	9.39	18.57
ได้รับเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	22.40	9.36	18.36
ได้รับเฉพาะแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	22.35	9.31	18.02
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 0°	22.15	8.89	17.11
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 90°	20.63	7.92	16.21
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 180°	22.20	8.95	17.21
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 270°	22.25	9.10	17.59

จากตารางที่ 4.3 พบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมส่งผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนที่ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุมทับซ้อน 90° ส่งผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าลดลงมากที่สุด

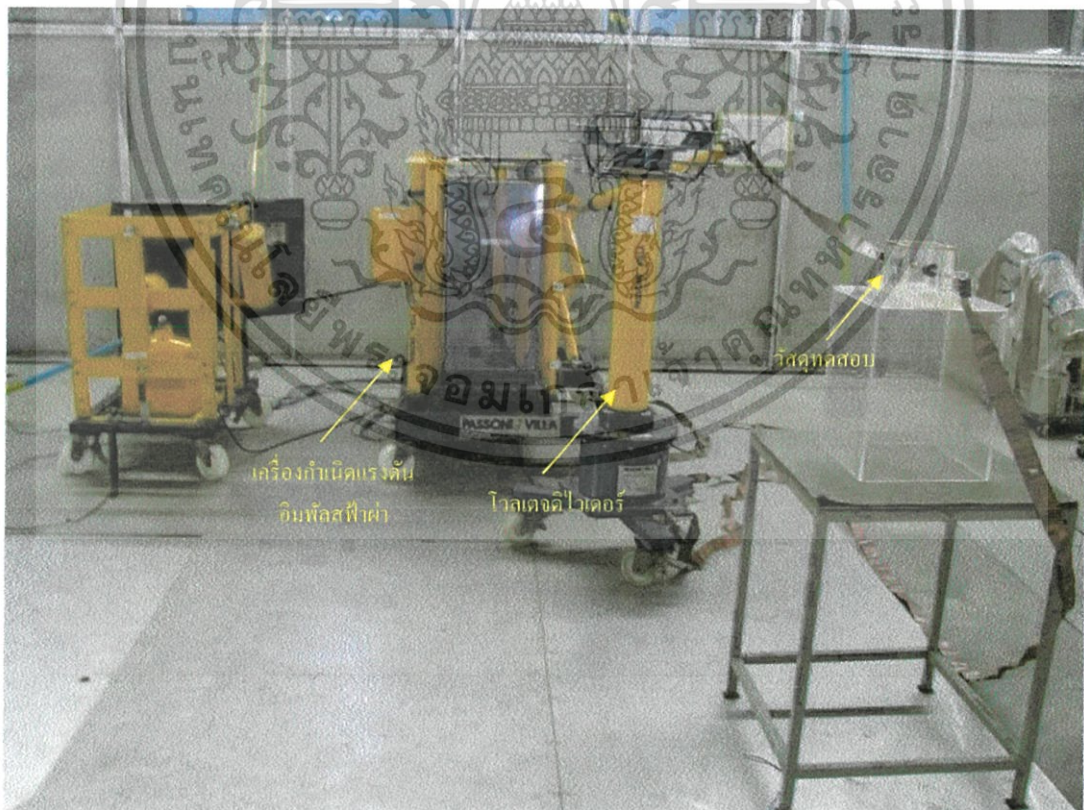
4.1.5 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า

นำฉนวนที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าใด ๆ จำนวน 5 ชิ้น และฉนวนที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าตามข้อ 4.1.1 จำนวนอย่างละ 5 ชิ้น รวมจำนวน 35 ชิ้น มาทำการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าด้วยวิธี Up-Down 50% Disruptive Discharge Method โดยมีไดอะแกรมและรูปวงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 4.8-4.9

จากการทดสอบสามารถสรุปค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของฉนวนชนิดต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.8 ไดอะแกรมแสดงวงจรทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า



รูปที่ 4.9 วงจรการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนก่อนและหลังได้รับแรงดันทดสอบ

ประเภทฉนวน	ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (kV _{peak})		
	โพลีเอสเตอร์	กระดาษฉนวน	ดีเอ็มดี
ไม่ได้รับแรงดัน	45.20	15.00	38.34
ได้รับเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	45.00	15.10	38.40
ได้รับเฉพาะแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	44.70	14.50	37.30
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 0°	42.50	13.50	36.50
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 90°	40.10	12.80	33.20
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 180°	42.40	13.60	36.30
ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 270°	43.80	13.94	37.43

จากตารางที่ 4.4 พบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมส่งผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนที่ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุมทับซ้อน 90° ส่งผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีค่าลดลงมากที่สุด

4.1.6 สรุปผลการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนภายหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.1-4.4 ต่างให้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือ แรงดันรูปคลื่นผสมทำให้อุณหภูมิของฉนวนเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอกและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดการทับซ้อนกันที่มุม 90° ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนมากกว่าแรงดันรูปคลื่นผสมที่เกิดการทับซ้อนที่มุมอื่น ๆ โดยมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับฉนวนไม่ได้รับแรงดันไฟฟ้า มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของฉนวนภายหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 90° เมื่อเทียบกับฉนวนที่ไม่ได้รับแรงดันไฟฟ้า

คุณสมบัติทางไฟฟ้า	โพลีเอสเตอร์	กระดาษฉนวน	ดีเอ็มดี
ความต้านทานฉนวน	-10.69 %	-15.65 %	-5.26 %
ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก	9.18 %	38.41 %	24.05 %
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	-10.69 %	-15.65 %	-12.71 %
ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	-11.28 %	-16.30 %	-13.41 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ค่าที่แสดงในตารางคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$X = \frac{(P_1 - P_0) \times 100}{P_0} \quad (4.1)$$

เมื่อ X คือ การเปลี่ยนแปลงไปของคุณสมบัติทางไฟฟ้า

P_1 คือ ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนที่ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุม 90°

P_0 คือ ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนที่ไม่ได้รับแรงดันไฟฟ้า

4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนภายหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนภายหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม พบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีมุมทับซ้อน 90° ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนมากกว่าแรงดันรูปคลื่นผสมที่เกิดการทับซ้อนที่มุมอื่น ๆ ดังนั้นการศึกษาในหัวข้อนี้ จึงเลือกการมุมทับซ้อนของแรงดันรูปคลื่นผสมที่ 90° และการปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกำหนดให้อยู่ที่ $\pm 50\%$

4.2.1 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับฉนวนที่จะใช้ศึกษา

- แรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ $2.83 \text{ kV}_{\text{peak}}$ 50 Hz และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว $1.2/50 \text{ }\mu\text{s}$ โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นระยะเวลา 5 นาที และในระหว่างนั้นป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวจำนวน 10 รูปคลื่น ซึ่งสามารถแบ่งระดับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ $3 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $6 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $9 \text{ kV}_{\text{peak}}$
- แรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ $5.66 \text{ kV}_{\text{peak}}$ 50 Hz และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว $1.2/50 \text{ }\mu\text{s}$ โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นระยะเวลา 5 นาที และในระหว่างนั้นป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวจำนวน 10 รูปคลื่น ซึ่งสามารถแบ่งระดับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ $3 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $6 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $9 \text{ kV}_{\text{peak}}$
- แรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ $8.48 \text{ kV}_{\text{peak}}$ 50 Hz และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว $1.2/50 \text{ }\mu\text{s}$ โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นระยะเวลา 5 นาที และในระหว่างนั้นป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวจำนวน 10 รูปคลื่น ซึ่งสามารถแบ่งระดับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ $3 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $6 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $9 \text{ kV}_{\text{peak}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน

นำฉนวนที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าตามข้อ 4.2.1 จำนวนอย่างละ 5 ชั้น รวมจำนวน 45 ชั้น มาทำการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวน โดยมีแรงดันทดสอบที่ 2,500 V_{dc} โดยมีไดอะแกรมและรูปวงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 4.2-4.3

จากการทดสอบสามารถสรุปค่าความต้านทานฉนวนโดยเฉลี่ยของฉนวนชนิดต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนของฉนวนหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่ววอก ที่มุมทับซ้อน 90°

ระดับแรงดัน (kV _{peak})		ค่าความต้านทานฉนวน (GΩ)		
AC Voltage	Impulse Voltage	โพลีเอสเตอร์	กระดาษฉนวน	ดีเอ็มดี
2.83	3	10.25	3.60	6.73
	6	10.06	3.55	6.64
	9	9.96	3.46	6.50
5.66	3	10.22	3.53	6.61
	6	9.43	3.28	6.22
	9	9.37	Break down	6.20
8.48	3	9.30	3.12	6.08
	6	9.23	3.08	6.05
	9	9.23	Break down	6.01

จากตารางที่ 4.6 พบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานฉนวนของฉนวนตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลง

4.2.3 การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

นำฉนวนที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าตามข้อ 4.1.1 จำนวนอย่างละ 5 ชั้น รวมจำนวน 45 ชั้น มาทำการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยมีไดอะแกรมและรูปวงจรถ่ายทอดสอบ ดังรูปที่ 4.4-4.5

จากการทดสอบสามารถสรุปค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกโดยเฉลี่ยของฉนวนชนิดต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่ววอก ที่มุมทับซ้อน 90°

ระดับแรงดัน (kV _{peak})		ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก		
AC Voltage	Impulse Voltage	โพลีเอสเตอร์	กระดาษฉนวน	ดีเอ็มดี
2.83	3	0.443	0.646	0.444
	6	0.442	0.587	0.447
	9	0.446	0.595	0.449
5.66	3	0.459	0.608	0.458
	6	0.452	0.625	0.459
	9	0.490	Break down	0.488
8.48	3	0.477	0.659	0.480
	6	0.482	0.676	0.490
	9	0.491	Break down	0.497

จากตารางที่ 4.7 พบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น

4.2.4 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

นำฉนวนที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าตามข้อ 4.1.1 จำนวนอย่างละ 5 ชั้น รวมจำนวน 45 ชั้น มาทำการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีไดอะแกรมและรูปวงจรถดสอบ ดังรูปที่ 4.6-4.7

จากการทดสอบสามารถสรุปค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยเฉลี่ยของฉนวนชนิดต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ที่มุมทับซ้อน 90°

ระดับแรงดัน (kV_{peak})		ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (kV_{rms})		
AC Voltage	Impulse Voltage	โพลีเอสเตอร์	กระดาษฉนวน	ดีเอ็มดี
2.83	3	22.43	8.70	17.54
	6	22.01	8.57	17.32
	9	21.79	8.35	16.95
5.66	3	22.35	8.52	17.23
	6	20.63	7.92	16.21
	9	20.94	Break down	16.16
8.48	3	20.35	7.54	15.87
	6	20.19	7.44	15.79
	9	20.20	Break down	15.68

จากตารางที่ 4.8 พบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลง

4.2.5 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

นำฉนวนที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าตามข้อ 4.1.1 จำนวนอย่างละ 5 ชิ้น รวมจำนวน 45 ชิ้น มาทำการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยมีไดอะแกรมและรูปวงจรถดสอบ ดังรูปที่ 4.8-4.9

จากการทดสอบสามารถสรุปค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยเฉลี่ยของฉนวนชนิดต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ที่มุมทับซ้อน 90°

ระดับแรงดัน (kV)		ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (kV _{peak})		
AC Voltage	Impulse Voltage	โพลีเอสเตอร์	กระดาษฉนวน	ดีเอ็มดี
2.83	3	43.59	11.87	35.93
	6	42.79	11.69	35.47
	9	42.35	11.39	34.71
5.66	3	43.44	11.62	35.30
	6	40.1	10.8	33.2
	9	40.70	10.50	33.10
8.48	3	39.56	Break down	32.50
	6	39.24	10.15	32.34
	9	39.26	Break down	32.11

จากตารางที่ 4.8 พบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลง

4.2.6 สรุปผลการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนภายหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.6-4.9 พบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพิ่มขึ้น ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่าเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังพบว่าผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ส่งผลต่อค่าความต้านทานฉนวนมากกว่าผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า สันนิษฐานได้ว่า อาจเกิดจากพลังงานที่ฉนวนได้รับจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่สูงกว่าระดับแรงดันใช้งานปกติ มีปริมาณมากกว่าพลังงานที่ฉนวนได้รับจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ทำให้ฉนวนเกิดความเสียหายมากกว่านั่นเอง

จากการศึกษาในข้อ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม สำหรับลักษณะฉนวนที่ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมจนเกิดการชำรุดเสียหายนั้นแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลักษณะฉนวนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและภายหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบโดยเลือกใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกัน สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน $1.2/50 \mu s$ ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ได้ และเมื่อประกอบใช้งานร่วมกับวงจรเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีใช้งานภายในห้องทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำให้วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่สามารถกำหนดมุมทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ ทั้งนี้สำหรับวงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ประกอบสร้าง ได้มอบให้กับห้องทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังแล้ว

จากการทดสอบเพื่อหาผลกระทบของแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อคุณสมบัติของฉนวนพบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่ถูกทับซ้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว มีผลทำให้คุณสมบัติของฉนวนเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ทำให้ค่าความต้านทานฉนวนมีค่าลดลง , ทำให้ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันทับซ้อนที่มุม 90° ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของฉนวนมากกว่าแรงดันทับซ้อนที่มุมอื่น ๆ นอกจากนี้จากการทดสอบยังพบว่าผลจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ทำให้คุณสมบัติของฉนวนเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าผลจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าอาจเกิดจากพลังงานที่ฉนวนได้รับจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่สูงกว่าระดับแรงดันใช้งานปกติ มีมากกว่าปริมาณพลังงานที่ฉนวนได้รับจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ทำให้ฉนวนเกิดความเสียหายมากกว่า

การศึกษาผลกระทบของแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อคุณสมบัติของฉนวนในงานวิจัยนี้เลือกใช้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz จากผลการทดสอบพบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมที่ทับซ้อนที่มุม 90° ส่งผลทำให้คุณสมบัติของฉนวนเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ทั้งนี้ในการศึกษาเพิ่มเติมอาจเปลี่ยนแรงดันทดสอบเป็นแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ซึ่งอาจแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของแรงดันรูปคลื่นผสมที่มุมทับซ้อนอื่น ๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของฉนวนอีกด้วย

นอกจากนี้การเพิ่มหัวข้อการทดสอบอื่น ๆ เช่น การตรวจสอบผิวฉนวนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด , การตรวจสอบการแตกกิ่งทางไฟฟ้าโดยใช้เมทิลีนบลู , การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน , การทดสอบแรงดึง เป็นต้น จะช่วยยืนยันถึงผลกระทบของแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อคุณสมบัติของฉนวนได้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [2] กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, โครงการวิจัยเพื่อป้องกันแรงดันเกินสำหรับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า, รายงานการวิจัย , 2546
- [3] IEEE C62.45.2-2002. **IEEE Recommended Practice on Surge testing Equipment Low - Voltage AC Power Circuits.** New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., 2003.
- [4] CEI/IEC 61000-4-5. **International Standard CEI/ IEC 61000-4-5 Part 4-5 Testing and measurement techniques - Surge immunity test.** Public Number CEI/IEC 61000-4-5 : 2005, Geneva : Switzerland, 2005.
- [5] IEC 60060-1, **High-voltage test technique; part 1 General definitions and test requirement,** 1989.
- [6] Berger K., **Methoden und Resultate der Blitzforschung auf den Monte San Salvatore bei Lugano in den Jahren 1963-1971.** Bull. SEV 63. 1972.
- [7] ภูจิต บุญโท, นรเศรษฐ พัฒนเดช, พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, มณฑล ถิลาจินดาไกรฤกษ์. “การศึกษาการจำลองวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรม PSpice เปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรม Matlab และ Electronics Workbench” การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยบูรพา, มีนาคม 2551, หน้า 224.
- [8] โกสินทร์ คล่องเชิงสาร, อานันท์วัฒน์ คุณากร, พีรวุฒิ ยุทธโกวิท , นรเศรษฐ พัฒนเดช. “วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30, ตุลาคม 2551, หน้า 189-192.
- [9] C.F.Huang, N.L.Allen , D.A.Greaves. High voltage circuits for application of composite voltages to test gaps . **IEE Proc. Sci. Meas. Technol.**, Vol.146, No.2, March 1999, pp. 64-69.
- [10] นรเศรษฐ พัฒนเดช. **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้าเล่ม 1 : ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า.** กรุงเทพมหานคร: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [11] Dieter Kind, Kurt Feser. **High-Voltage Test Techniques . 2nd ED.** Newnes. 1988.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

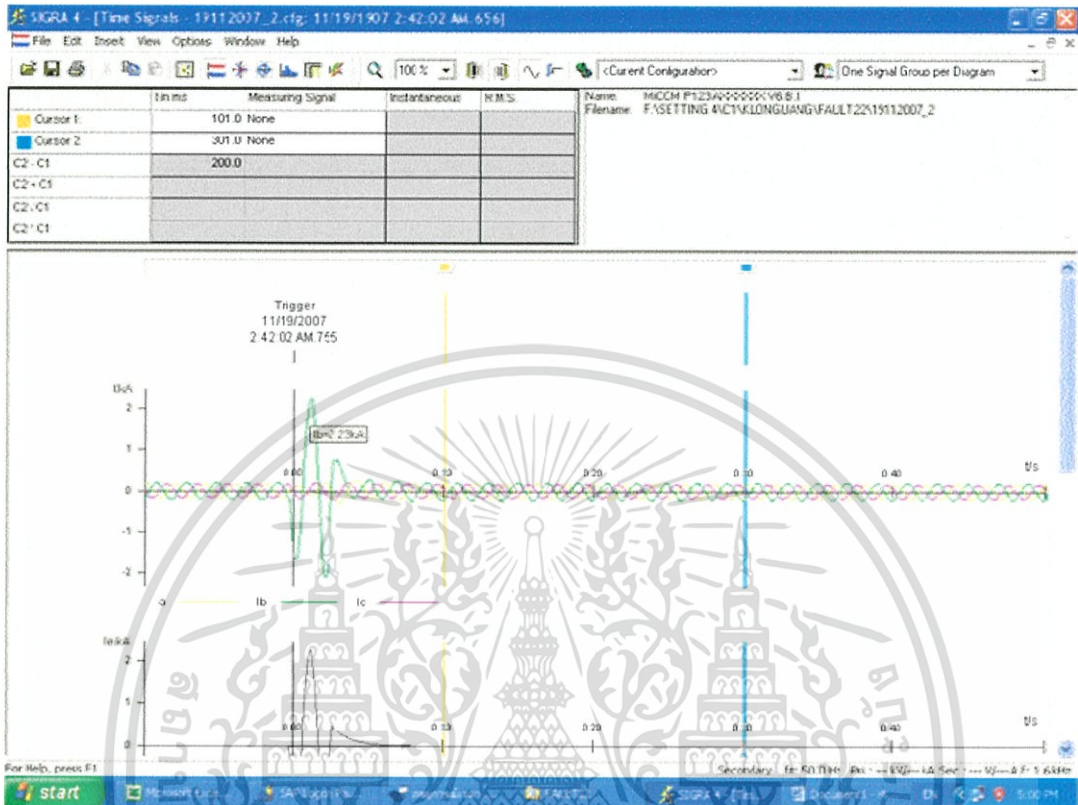


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์สั่งการระบบไฟฟ้า (ศสฟ.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้มีการบันทึกรายละเอียดความผิดปกติภายในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งตรวจวัดได้ที่สถานีไฟฟ้า 115/22 kV โดยในรายละเอียดจะระบุถึงลักษณะความผิดปกติ, สาเหตุหรือการตรวจสอบจุดเกิดเหตุ, การแก้ไขความผิดปกติ, การทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน, ผลจากความผิดปกติที่เกิดขึ้น, ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าดับ ซึ่งรายงานดังกล่าวจะมีบันทึกไว้ทุกครั้งที่เกิดความผิดปกติขึ้น สำหรับรูปคลื่นความผิดปกตินั้นจะถูกบันทึกไว้ในอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้า 115/22 kV ซึ่งจะเก็บข้อมูลความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าในรูปของรูปคลื่นกระแส, ขนาด, ระยะเวลา ทั้งนี้หากต้องการข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้คอมพิวเตอร์ดาวน์โหลดข้อมูลจากอุปกรณ์ดังกล่าวได้ทันที แต่อุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้า 115/22 kV ที่สามารถบันทึกข้อมูลได้นั้นจะต้องมีหน่วยความจำสำรองและฟังก์ชันการทำงานในส่วนของการบันทึกด้วย เช่น ผลิตภัณฑ์ MICOM P122 (Over Current Relay), MICOM P123 (Over Current Relay) เป็นต้น โดย กองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ (กอร.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะดำเนินการดาวน์โหลดข้อมูลดังกล่าวมาเก็บไว้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันภายในสถานีไฟฟ้า

สำหรับตัวอย่างความผิดปกติในระบบไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ที่สถานีไฟฟ้า 115/22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแสดงดังรูปที่ ก.1-ก.4 โดยลักษณะรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้มีลักษณะของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นทับซ้อนบนกระแสไฟฟ้าใช้งานปกติของระบบ ซึ่งมีความสอดคล้องกับลักษณะแรงดันรูปคลื่นผสมที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ตัวอย่างความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้าของ กฟภ.



รูปที่ ก.1 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่ตรวจจับได้ที่สถานีไฟฟ้าคลองใหม่ตัวอย่างที่ 1

รายงานเหตุความผิดปกติ

- วันพุธที่ 23 เม.ย. 2551 เวลา 16.22 น. เบรคเกอร์ระบบ 115 kV ของ กฟภ. ที่ สฟ.คลองใหม่ รหัส KOA3YB-02, KOA-3YB-03 ป้องกันสายส่งระบบ 115 kV ช่วง สฟ. คลองใหม่-สฟ.บางคล้า - สฟ.หัวตำโรง และผู้ใช้ไฟระบบ 115 kV จำนวน 2 ราย Trip Reclose & Trip Lockout

- Distance Relay Show Phase A, B Zone 1

- โหลดหาย 52.0 MW บริเวณทั้ง สฟ.บางคล้า, สฟ.หัวตำโรง และผู้ใช้ไฟระบบ 115 kV

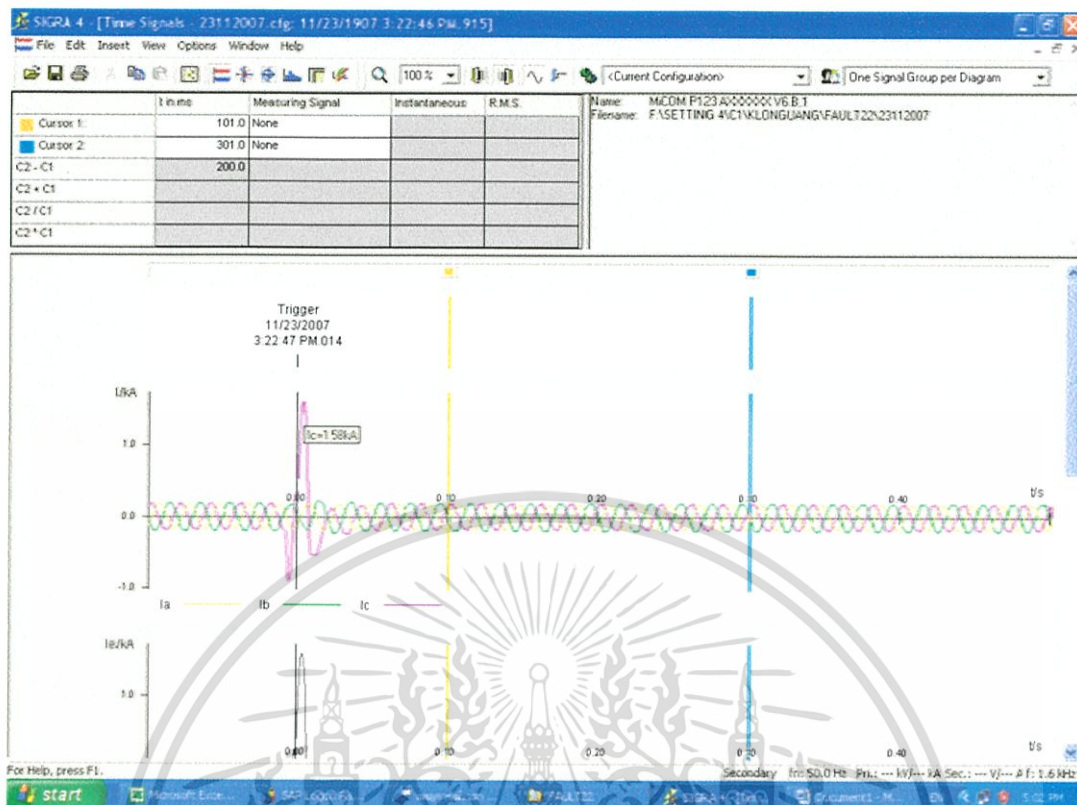
ได้แก่ บริษัท ไทยแอร์โร จำกัด, บริษัท โตโยต้า จำกัด

- รวมเวลาไฟดับ 3 นาที

- สาเหตุเจ้าหน้าที่ กฟภ. ตรวจสอบไม่พบสาเหตุ (สภาพอากาศฝนตกฟ้าคะนอง)

- ศสฟ. ได้แจ้ง ผปค.(ก.2) ให้ตรวจสอบสายส่งระบบ 115 kV ของ กฟภ. ใหม่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

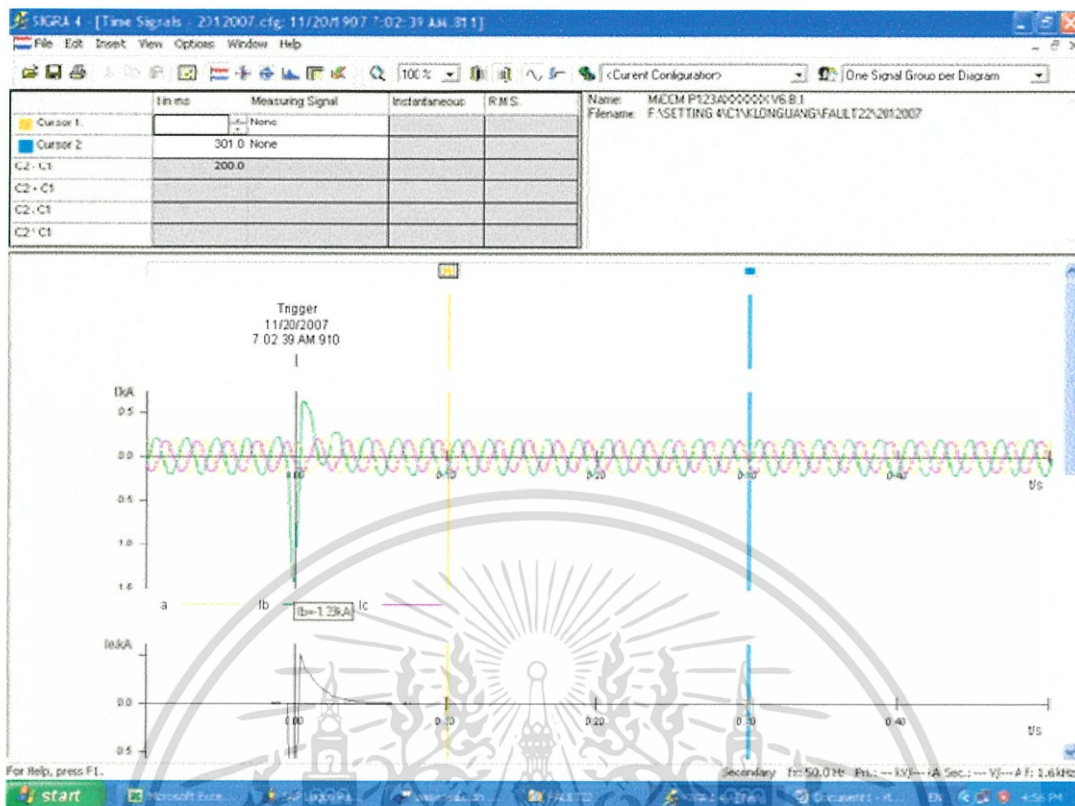


รูปที่ ก.2 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่ตรวจจับได้ที่สถานีไฟฟ้าคลองใหม่ตัวอย่างที่ 2

รายงานเหตุความผิดปกติ

- วันศุกร์ที่ 12 ม.ค. 2550 เวลา 15.15 น. เบรกเกอร์ระบบ 115 kV ของ กฟภ. ที่ สฟ.คลองใหม่ รหัส KOA4YB-01, KOA-4YB-02 ป้องกันสายส่งระบบ 115 kV ช่วง สฟ.คลองใหม่ - สฟ.คลองขวาง - สฟ.บางน้ำเปรี้ยว และผู้ใช้ไฟระบบ 115 kV จำนวน 4 ราย Trip Reclose & Trip Lockout
 - Distance Relay Show Phase C Zone 1
 - โหลดหาย 89.0 MW บริเวณทั้ง สฟ.คลองขวาง และ สฟ.บางน้ำเปรี้ยว ของ กฟภ.และผู้ใช้ไฟระบบ 115 kV ได้แก่ บริษัท บางกอกเคเบิ้ล จำกัด , บริษัท กุลธรคอนโทรล จำกัด , บริษัท จรุงไทยไวร์แอนเคเบิล จำกัด และ บริษัท ควอลิตี้คอปฟ์โปรดักส์ จำกัด
 - รวมเวลาไฟดับ 8 นาที
 - สาเหตุรถเครนทะเบียน 84-1771 ของ บริษัทรุ่งเรือง ยกเสาตะเตสายส่งระบบ 115 kV เฟส C ห่างจากสถานี คลองใหม่ ประมาณ 20 เมตร (สภาพอากาศปกติ) สามารถจ่ายไฟได้ปกติ
 - ศสฟ. ได้แจ้ง ฝปค.(ก.2) ให้ตรวจสอบสายส่งระบบ 115 kV ของ กฟภ. ใหม่และให้ประชาสัมพันธ์ในเรื่องอุบัติเหตุและความปลอดภัยในการปฏิบัติงานใกล้แนวสายส่งระบบ 115 kV ของ กฟภ. ใหม่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่ตรวจจับได้ที่สถานีไฟฟ้าคลองใหม่ตัวอย่างที่ 3

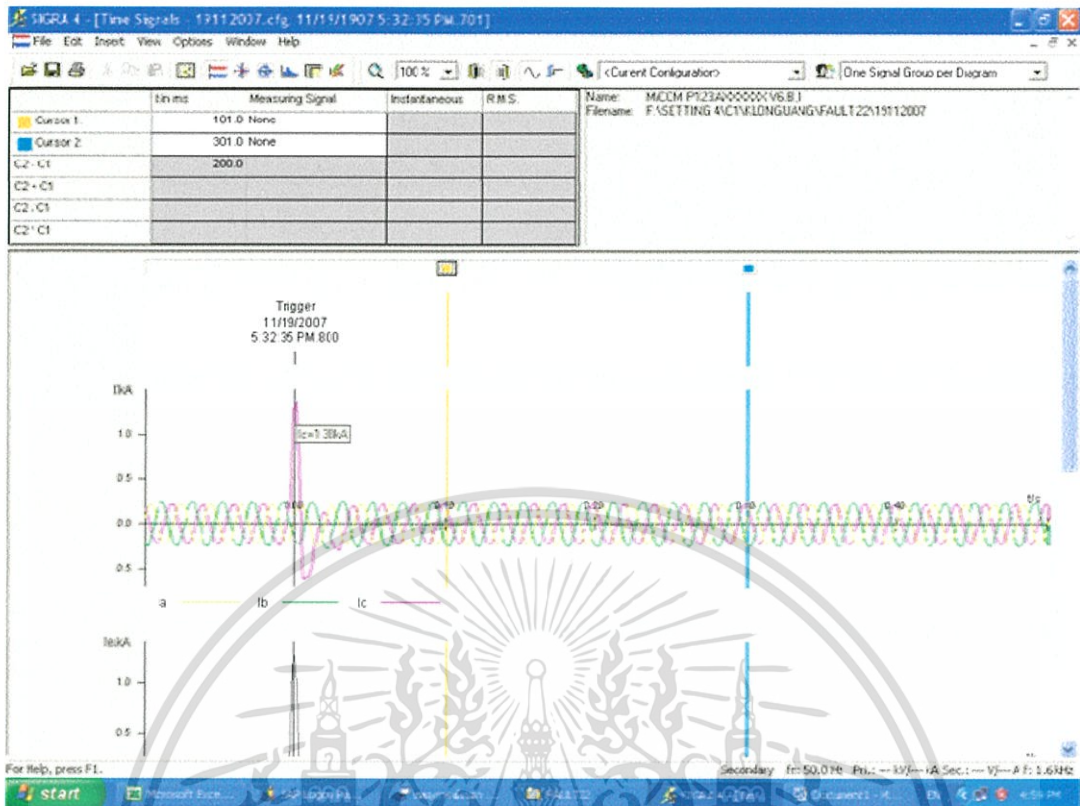
รายงานเหตุความผิดปกติ

- วันพฤหัสบดีที่ 24 เม.ย. 2551 เวลา 17.36 น. เบรกเกอร์ระบบ 115 kV ของ กฟภ. ที่ สฟ.คลองใหม่ รหัส KOA4YB-01, KOA-4YB-02 ป้องกันสายส่งระบบ 115 kV ช่วง สฟ.คลองใหม่ - สฟ.บางบัว - สฟ.บางสมัคร 2 - สฟ.บางสมัคร 1 และผู้ใช้ไฟระบบ 115 kV จำนวน 4 ราย Trip Reclose & Trip Lockout

- Distance Relay Show Phase A, Ground Zone 1
 - โหลดหาย 72.0 MW บริเวณทั้ง สฟ.บางบัว, สฟ.บางสมัคร 2 และ สฟ.บางสมัคร 1 ของ กฟภ. และผู้ใช้ไฟระบบ 115 kV ได้แก่ บริษัท ไทยอิตาชิ ลวดออบน้ำยา จำกัด , บริษัท สหยูเนี่ยน จำกัด , บริษัท ไทยนำศิริ อินเดอเท็กส์ จำกัด และบริษัท วาย เอส ภัณฑ์ จำกัด

- รวมเวลาไฟดับ 2 นาที
 - สาเหตุเจ้าหน้าที่ กฟภ. ตรวจสอบแล้วไม่ทราบสาเหตุ (สภาพอากาศฝนตกฟ้าคะนอง) สามารถจ่ายไฟได้ปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่ตรวจจับได้ที่สถานีไฟฟ้าคลองใหม่ตัวอย่างที่ 4

รายงานเหตุความผิดปกติ

- วันพฤหัสบดีที่ 18 ม.ค. 2550 เวลา 14.46 น. เบรกเกอร์ระบบ 115 kV ของ กฟภ. ที่ สฟ. คลองใหม่ รหัส KOA3YB-02, KOA-3YB-03 ป้องกันสายส่งระบบ 115 kV ช่วง สฟ. คลองใหม่ - สฟ. บางคล้า - สฟ. หัวสำโรง - สฟ. พนัสนิคม - สฟ. เกาะโพธิ์ - สฟ. ชลบุรี 5 และผู้ใช้ไฟระบบ 115 kV จำนวน 4 ราย Trip Lockout

- Distance Relay Show Phase C Ground Zone 3 (Line fault factor = 53 km.)

- ขณะเดียวกันเบรกเกอร์ระบบ 115 kV ของ กฟภ. ที่ สฟ. พนัสนิคม รหัส PSA1YB-01 ป้องกันสายส่งระบบ 115 kV ช่วง สฟ. พนัสนิคม - สฟ. ชลบุรี 5 และผู้ใช้ไฟระบบ 115 kV จำนวน 3 ราย Trip Lockout

- Distance Relay Show Phase C Ground Zone 3

- โหลดหาย 125 MW บริเวณทั้ง สฟ. พนัสนิคม , สฟ. เกาะโพธิ์ และ สฟ. ชลบุรี 5 ของ กฟภ. และผู้ใช้ไฟระบบ 115 kV ได้แก่ บริษัท ไทยแอร์โร จำกัด , บริษัท เชียงใต้ จำกัด , บริษัท สยามเดน โช จำกัด , บริษัท โตโยต้า จำกัด

- รวมเวลาไฟดับ 6 นาที

- สาเหตุเจ้าหน้าที่ กฟภ. ตรวจสอบไม่พบสาเหตุ (สภาพอากาศปกติ)

- ศสฟ. ได้แจ้ง ฝปค.(ก.2) ให้ตรวจสอบสายส่งระบบ 115 kV ของ กฟภ. ใหม่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Flexible Composite Materials

Poly Ester Series

Part No.	Thickness (um)	Tensile Strength (kgt/15mm)	Nominal Yield (in2/lb)	Elongation at Break			Thermal Shrinkage			Normal Operating Voltage (kv)
				TD	MD	TD	MD	TD		
				MPa	%	%	%	%		
1P130	75	244	6,696	243	1.3	0.6	1.3	0.6	1	
1P700	100	240	5,022	230	1.3	0.6	1.3	0.6		
1P701	125	236	4,018	226	1.1	0.4	1.1	0.4		
1P717	188	188	2,671	194	1.0	0.6	1.0	0.6	2	
1P751	210	190	2,391	194	1.0	0.7	1.0	0.7		
1P800	250	189	2,009	189	1.1	0.6	1.1	0.6		
1P801	300	177	1,674	178	0.9	0.6	0.9	0.6	4	
1P802	350	175	1,435	173	0.9	0.5	0.9	0.5		
1P808	500	133	1,004	139	0.9	0.4	0.9	0.4		

Remark : The above value, which has been determined by careful tests, provide only general information. P. Leo has implemented several programs to assure the highest quality and reliability of this product. However, no responsibility is assumed for its use.





Flexible Composite Materials

DMD Series

Part No.	Heat Resistance (°C)	Thickness (um)	Width (mm)	Length (m)	Tensile Strength (kgt/15mm)	Normal Operating Voltage (kv)
DMD-222	155	180	980	100	>13	1
DMD-252	155	250	980	100	>15	
DMD-272	155	300	980	100	>18	2
DMD-333	155	250	980	100	>21	
DMD-353	155	300	980	100	>25	4
DMD-373	155	350	980	100	>30	

Remark : The above value, which has been determined by careful tests, provide only general information. P. Leo has implemented several programs to assure the highest quality and reliability of this product. However, no responsibility is assumed for its use.





Flexible Composite Materials

Craft Paper Series

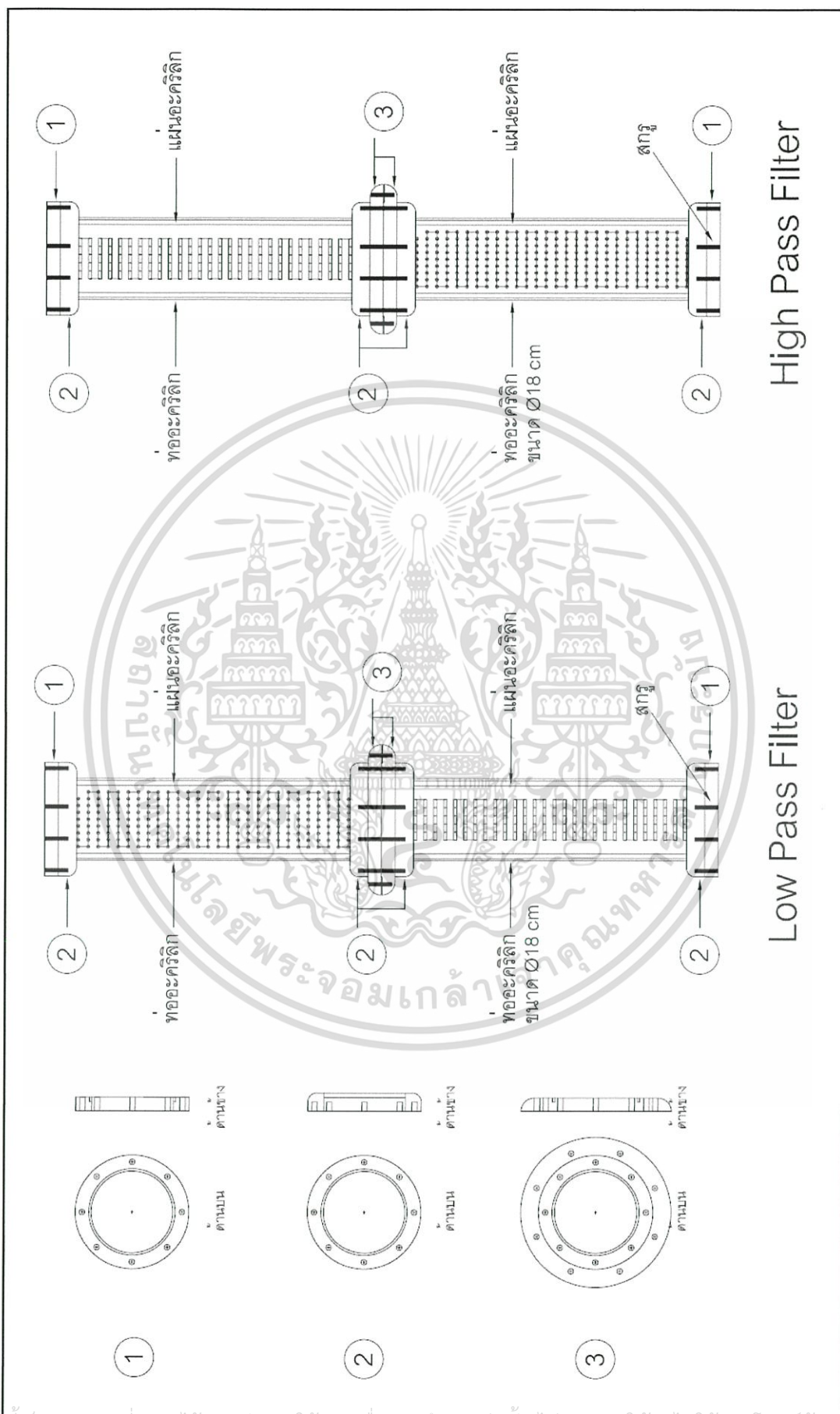
Part No.	Tear Resistance (kgf/20mm)	Thickness (um)	Width (mm)	Length (m)	Tensile Strength (kgt/15mm)	Normal Operating Voltage (kv)
TK-5008	>19	140	1000	200	>14	1
TK-5013	>20	190	1000	200	>18	
TP-2513	>9	170	1000	200	>15	2
TP-2518	>10	210	1000	200	>16	
TP-2525	>10	280	1000	200	>25	4
TP-5025	>12	350	1000	200	>26	

Remark : The above value, which has been determined by careful tests, provide only general information. P. Leo has implemented several programs to assure the highest quality and reliability of this product. However, no responsibility is assumed for its use.

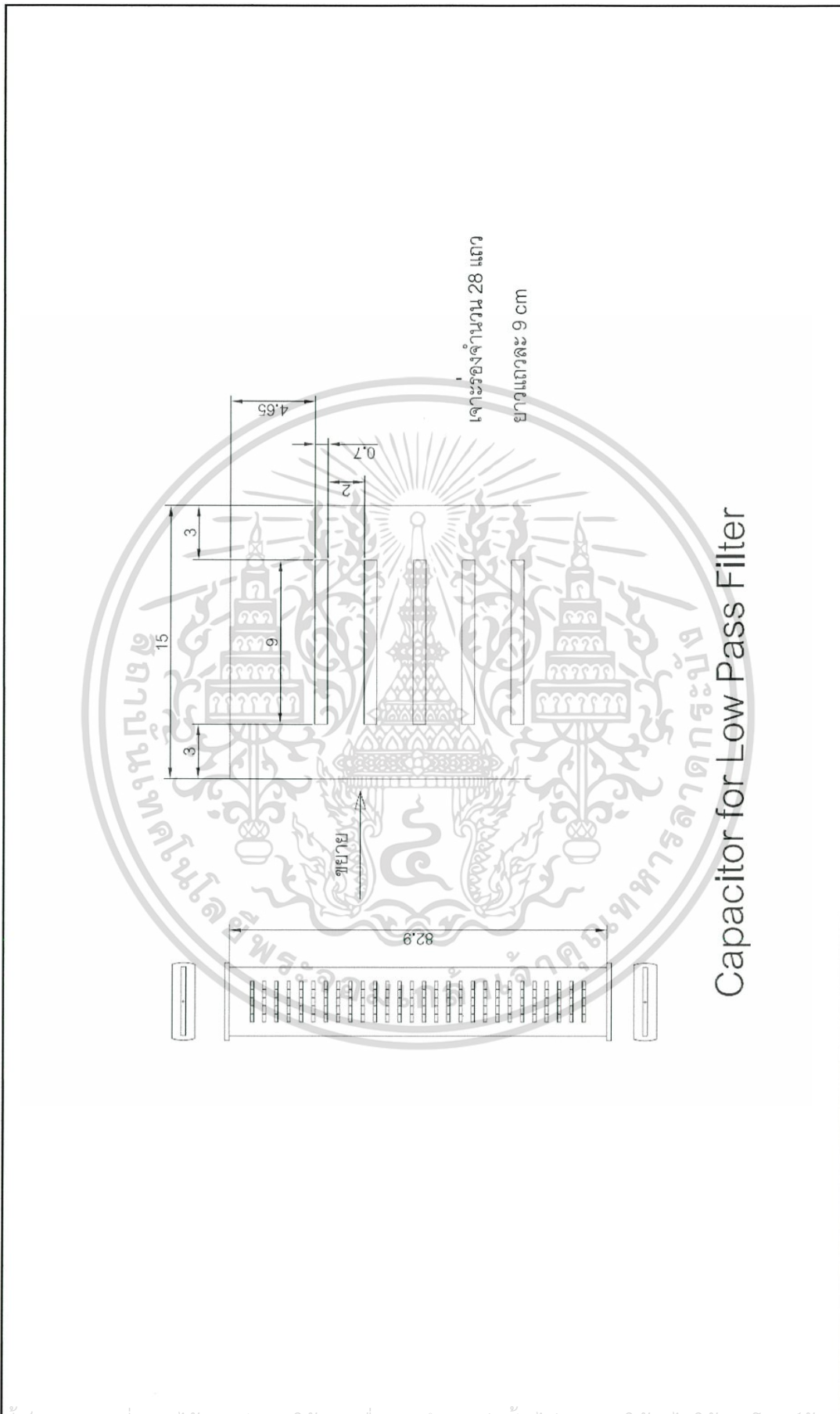




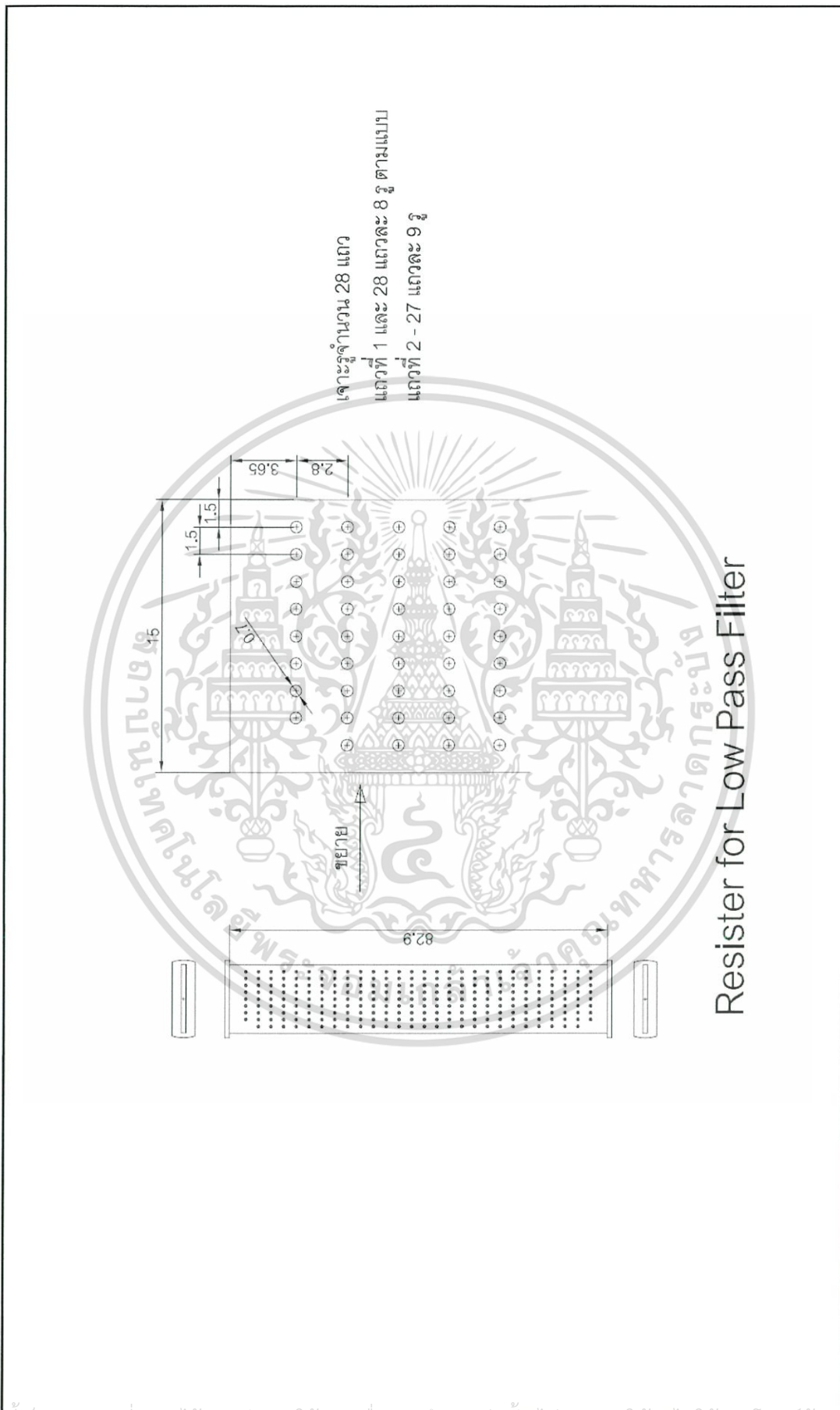
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



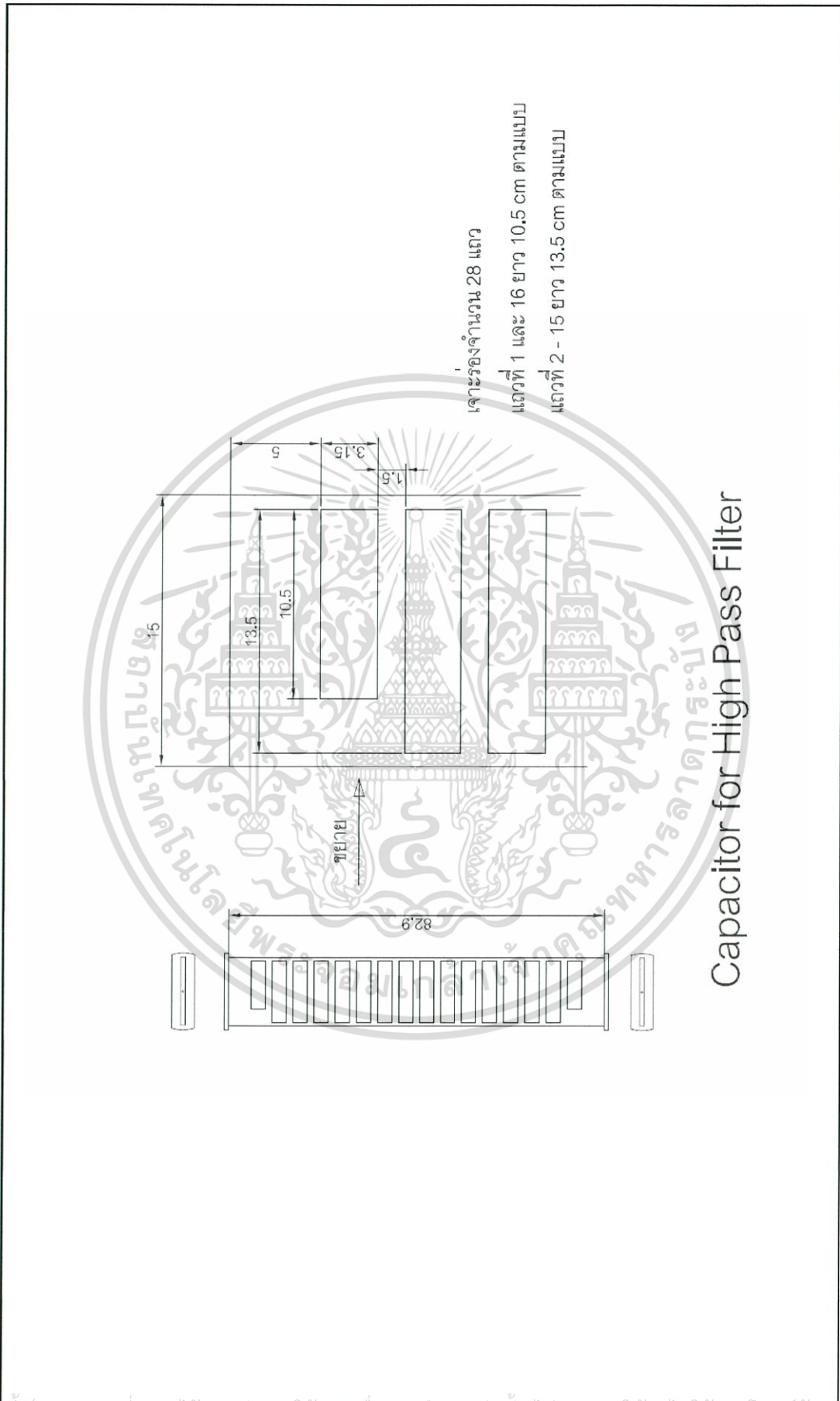
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Capacitor for Low Pass Filter

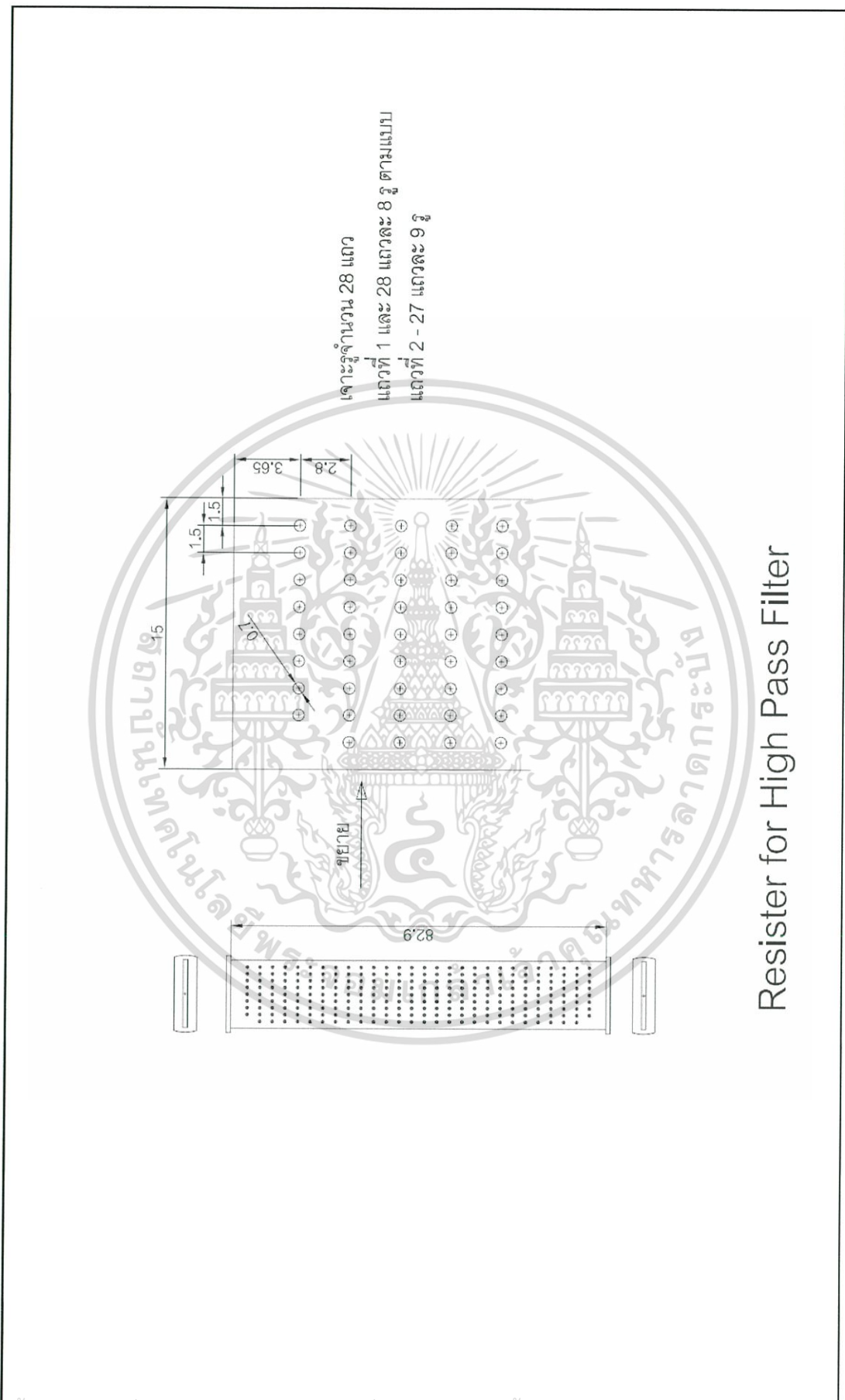


Resister for Low Pass Filter



Capacitor for High Pass Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Resister for High Pass Filter



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ภูษิต บุญโท , นรเศรษฐ พัฒนเดช , พีรวุฒิ ยุทธโกวิท และ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์, “การศึกษาการจำลองวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรม PSpice เปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรม Matlab และ Electronics Workbench” การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยบูรพา หน้า 224, 13-14 มีนาคม 2551.

2. ภูษิต บุญโท , นรเศรษฐ พัฒนเดช , พีรวุฒิ ยุทธโกวิท และ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์, “การศึกษาคุณลักษณะสมบัติของฉนวนภายหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒและมหาวิทยาลัยศรีปทุม, หน้า 161 – 164, 29-31 ตุลาคม 2551.

3. ภูษิต บุญโท , นรเศรษฐ พัฒนเดช และ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์, “การประกอบสร้างวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมโดยใช้วงจรป้องกันแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านและตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน” การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 47 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 702-709, 17-20 มีนาคม 2552.



P-055**THE STUDY OF COMPOSITE VOLTAGE GENERATING SIMULATION USING PSpice PROGRAM COMPAIRED WITH MATLAB AND ELECTRONICS WORKBENCH****Poochit Boontho , Norasege Pathanadej , Pearawut Yutthagovit , Mothol Leelachindaileak**Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkuit Institute of Technology Ladkrabang,
Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

This paper presents the study of the effects of components in composite voltage circuit on composite waveform using PSpice , Matlab and Electronics Workbench. The test result is used as a guide before doing the experiment. It is found that the capacitance of high pass filter, the resistance of low pass filter and the capacitance of test object has more effect than other components on composite voltage circuit wave shape. Besides, the simulation results from the study programs; PSpice , Matlab and Electronics Workbench are relatively similar.

Keywords:
Superimposed/ Composite voltage/ Simulation

การประชุมเสวนา@งานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 วันที่ 14-15 มีนาคม 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

การศึกษาการจำลองวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรม PSpice เปรียบเทียบกับการใช้
โปรแกรม MATLAB และ ELECTRONICS WORKBENCH
THE STUDY OF COMPOSITE VOLTAGE GENERATING SIMULATION USING PSPICE
PROGRAM COMPAIED WITH MATLAB AND ELECTRONICS WORKBENCH

ภูชิต บุญโท¹, นรเศรษฐ พัฒนเดช², พีรวุฒิ ยุทธโกวิท³ และมณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์⁴

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: pooh_engineer_pea@hotmail.com¹ kpnorras@kmitl.ac.th² pearawut@yahoo.com³ klmontho@kmitl.ac.th⁴

Poochit Boontho, Norasege Pathanadej, Pearawut Yutthagovit and Mothol Leelachindakaileak

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkuit Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ ผลการศึกษาการจำลองวิเคราะห์วงจรกำเนิดแรงดันรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSpice, Matlab และ Electronics Workbench เพื่อศึกษาผลของค่าองค์ประกอบวงจรที่มีผลต่อแรงดันรูปคลื่นผสมที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบ ก่อนที่จะดำเนินการประกอบวงจรเพื่อใช้ทดสอบจริง จากการจำลองวิเคราะห์พบว่าค่าองค์ประกอบวงจรที่ส่งผลกระทบต่อแรงดันรูปคลื่นผสมที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบมากที่สุดคือ ความจุไฟฟ้าของวงจรรองความถี่สูงผ่าน, ความต้านทานของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านและความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ ผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 โปรแกรมให้ผลใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: ทับซ้อน/ แรงดันรูปคลื่นผสม/ จำลองวิเคราะห์

บทนำ

ก่อนหน้านี การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ด้วยแรงดันอิมพัลส์และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะทดสอบแยกออกจากกัน ซึ่งการทดสอบดังกล่าวไม่สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากนัก เพราะในขณะที่มีการใช้งานอุปกรณ์อยู่นั้น หากเกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าเข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลัง แรงดันดังกล่าวจะทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่อุปกรณ์นั้นรองรับอยู่ ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจได้ว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จะนำไปใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถมีความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ จึงต้องมีการศึกษาการทดสอบอุปกรณ์ด้วยแรงดันรูปคลื่นผสม ซึ่งในปัจจุบันนี้ ผู้ใช้งานต่าง ๆ เริ่มตระหนักเห็นความสำคัญของการทดสอบด้วยแรงดันรูปคลื่นผสมก่อนนำไปใช้งานแล้ว

ก่อนที่จะดำเนินการประกอบสร้างชุดทดสอบนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องวิเคราะห์วงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อน เพื่อยืนยันผลการคำนวณค่าองค์ประกอบวงจรว่าสามารถสร้างแรงดันทดสอบได้ถูกต้องและลดค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้าง ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการจำลองวิเคราะห์นั้น มีหลากหลายโปรแกรม บทความนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบการจำลองวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันรูปคลื่นผสมโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อใช้ในการวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

9th National Grad Research Conference 14-15 March 2008, Graduate School, Burapha University

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้โปรแกรม PSpice , Matlab และ Electronics Workbench ซึ่งจะมีประโยชน์ในการนำไปประกอบสร้างชุดทดสอบจริงต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าองค์ประกอบวงจรในวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อแรงดันรูปคลื่นผสมที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบ โดยใช้การจำลองวิเคราะห์เปรียบเทียบกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำนวน 3 โปรแกรม คือ PSpice, Matlab และ Electronics Workbench

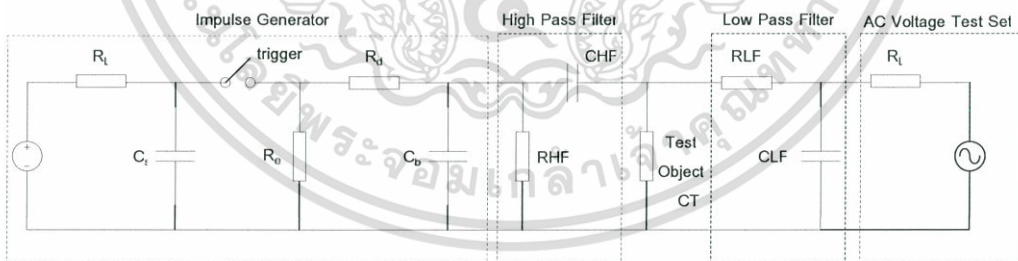
วิธีวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การศึกษาวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม, การจำลองวิเคราะห์การสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการศึกษาผลกระทบของค่าองค์ประกอบวงจรในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อแรงดันรูปคลื่นผสม โดยใช้การเปรียบเทียบผลการจำลองวิเคราะห์จาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. การสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมจะประกอบด้วยวงจรย่อย 2 ส่วน คือ วงจรแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและวงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz เงื่อนไขที่สำคัญของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม คือ เมื่อนำวงจรย่อยมาประกอบเป็นวงจรใหญ่ วงจรย่อยเหล่านี้จะต้องไม่ส่งแรงดันรบกัน และจะต้องจ่ายแรงดันตกคร่อมเฉพาะวัสดุทดสอบเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องติดตั้งวงจรรองเพื่อป้องกันเหตุการณ์ดังกล่าวที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน ออกแบบวงจรแบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ มีข้อพิจารณา ดังสมการที่ 1-3 ส่วนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ออกแบบวงจรแบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ โดยมีข้อพิจารณา ดังสมการที่ 1, 4 และ 5 ดังนี้

$$f_c = 1/2\pi RC \quad (1)$$

$$A_{VHF} = 1/\sqrt{(1+(f_c/f)^2)} \quad (2) \quad A_{VLF} = 1/\sqrt{(1+(f/f_c)^2)} \quad (4)$$

$$\phi_{HF} = \tan^{-1}(f_c/f) \quad (3) \quad \phi_{LF} = -\tan^{-1}(f/f_c) \quad (5)$$

เมื่อ f_c คือ ความถี่ข้ามผ่าน, A_{VHF} คือ อัตราขยายแรงดันของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน, ϕ_{HF} คือ มุมเฟสไหลเลื่อนของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน, A_{VLF} คือ อัตราขยายแรงดันของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน, ϕ_{LF} คือ มุมเฟสไหลเลื่อนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ทั้งนี้การเลือกค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุจะต้องมีความเหมาะสม หากเลือกค่าความต้านทานสูงเกินไป จะส่งผลให้ตัวต้านทานกลายเป็น โหลดของวงจร ทำให้ไม่สามารถปรับค่าแรงดันที่วัสดุทดสอบได้ตามที่กำหนด สำหรับวงจรกรองความถี่สูงผ่านนั้น ในการประกอบสร้างวงจร มักแทนที่ด้วยช่องว่างเก็บ เนื่องจากมีความสะดวกในการประกอบสร้างและลดปัญหาจากการเลือกใช้ค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ซึ่งค่าดังกล่าวส่งผลต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบ แต่การใช้ช่องว่างเก็บก็มีข้อเสียคือ ต้องปรับระยะห่างของช่องว่างให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดการสปาร์กข้ามผ่านได้ตรงตามมุมที่กำหนด และป้องกันการสปาร์กย้อนกลับที่อาจทำให้เครื่องกำเนิดอิมพัลส์เสียหายได้ (Huang, Allen, & Greaves, 1999) แต่สำหรับการจำลองวิเคราะห์นั้น เพื่อให้เกิดความสะดวกในการเลือกใช้อุปกรณ์จึงใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่าน เนื่องจากไม่สามารถจำลองวิเคราะห์ห้ช่องว่างเก็บในโปรแกรมได้ และหากไม่ใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่าน จะไม่ทำให้เกิดการทับซ้อนของแรงดันอิมพัลส์และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

2. การจำลองวิเคราะห์ห้วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองวิเคราะห์ห้วงจรจะใช้วงจรหลักตามภาพที่ 1 ซึ่งมีค่าองค์ประกอบของวงจรสำหรับวงจรแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า, วงจรกรองความถี่สูงผ่าน, วัสดุทดสอบ, วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน, วงจรสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

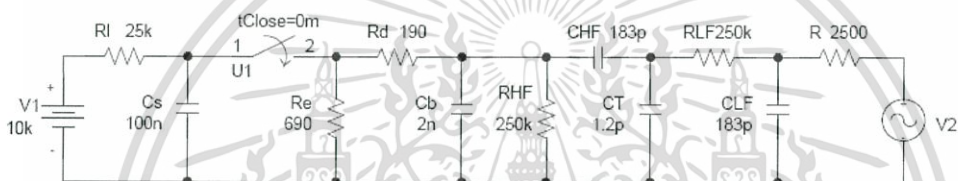
วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์			วงจรกรองความถี่สูงผ่าน		
แรงดันอิมพัลส์: V_{dc}	10*	kV	ความต้านทานวงจรกรองความถี่สูงผ่าน; R_{HF}	250	k Ω
ความต้านทานอิมพัลส์; R_L	25*	k Ω	ความจุไฟฟ้าวงจรกรองความถี่สูงผ่าน; C_{HF}	183	pF
ความจุไฟฟ้าเก็บประจุอิมพัลส์; C_s	100*	nF	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน		
ความจุไฟฟ้าโหลด; C_b	2*	nF	ความต้านทานวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน; R_{LF}	250	k Ω
ความต้านทานหน่วง; R_d	190*	Ω	ความจุไฟฟ้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน; C_{LF}	183	pF
ความต้านทานปล่อยประจุ; R_e	690*	Ω	วงจรสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ		
วัสดุทดสอบ			ความต้านทานจำกัดกระแสขีดพร้อม; R	2,500	Ω
ความจุไฟฟ้าวัสดุทดสอบ; CT	1.2	pF	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ; V_{ac}	5	kV

* อ้างอิงตามพิกัดเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ของห้องทดสอบ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

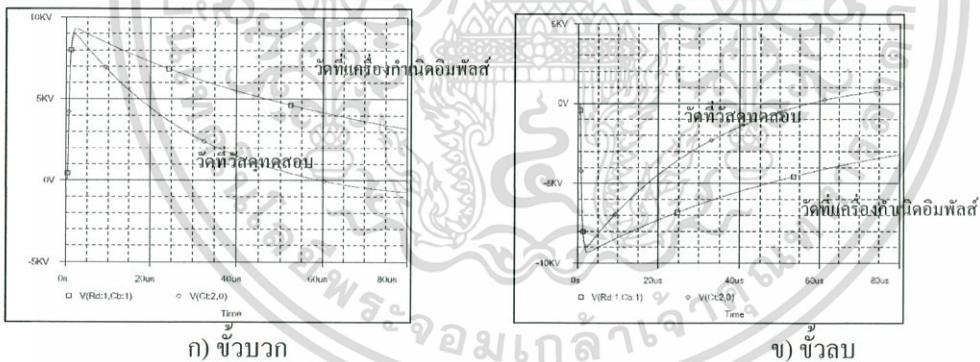
จากตารางที่ 1 สามารถสรุปลักษณะของแต่ละวงจรได้ดังนี้ วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.1/50.14 μsec มีประสิทธิภาพวงจรที่ 98% วงจรกรองความถี่สูงผ่านสามารถกรองความถี่ที่ต่ำกว่า 3,478 Hz มีอัตราขยายแรงดัน 0.99 เท่า และมีมุมเฟสไหลเลื่อน 0.82 องศา วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถกรองความถี่ที่สูงกว่า 3,478 Hz มีอัตราขยายแรงดัน 0.99 เท่า และมีมุมเฟสไหลเลื่อน -0.82 องศา จากนั้นจึงใช้ค่าองค์ประกอบตามตารางที่ 1 ในการจำลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังนี้

2.1 โปรแกรม PSpice

ทำการจำลองวิเคราะห์ห้วงวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมโดยจัดวงจรตามภาพที่ 2 โดยเลือกใช้สวิตช์ที่มีอยู่ในโปรแกรมแทนชุดทรานซิสเตอร์ในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (โกสินทร์ คล่องเชิงสาร, อานันท์วัฒน์ คุณากร, พิรุณ ฤทธิ์โกวิท และนเรศรชู พัฒนเดช, 2550) จากนั้นจึงวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และที่ตักคร่อมวัสดุทดสอบ ซึ่งได้ผลการวัดตามภาพที่ 3



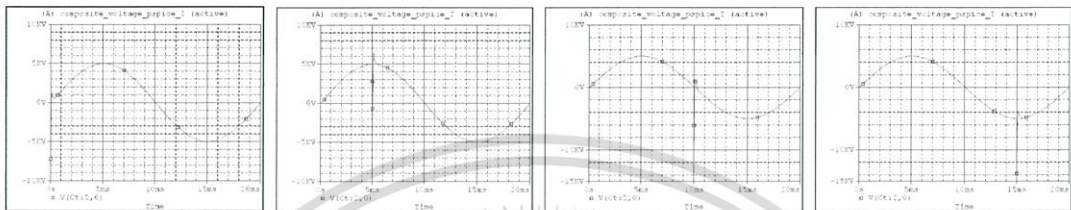
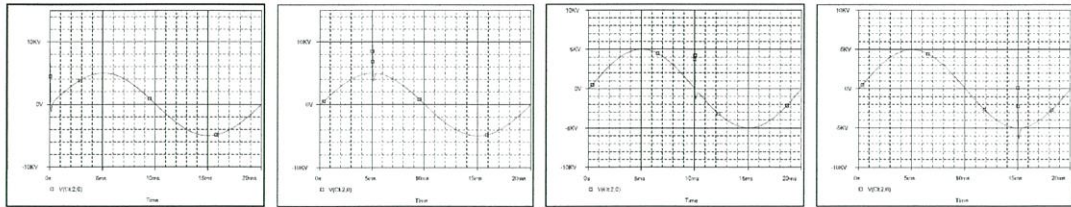
ภาพที่ 2 วงจรจำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม PSpice



ภาพที่ 3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่จำลองวิเคราะห์ได้จากวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม โดยใช้โปรแกรม PSpice

จากภาพที่ 3 ผลการจำลองวิเคราะห์ได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวกและชั่วลบ วัดที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 9.29 kV 1.15/52.05 μsec โดยแรงดันอิมพัลส์ที่ตักคร่อมวัสดุทดสอบ 8.99 kV 1.06/19.84 μsec

ทำการจำลองวิเคราะห์แรงดันรูปคลื่นผสม โดยจำลองวิเคราะห์ให้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ และ 270° ชั่วบวกและชั่วลบ ซึ่งได้ผลการจำลองวิเคราะห์ตามภาพที่ 4

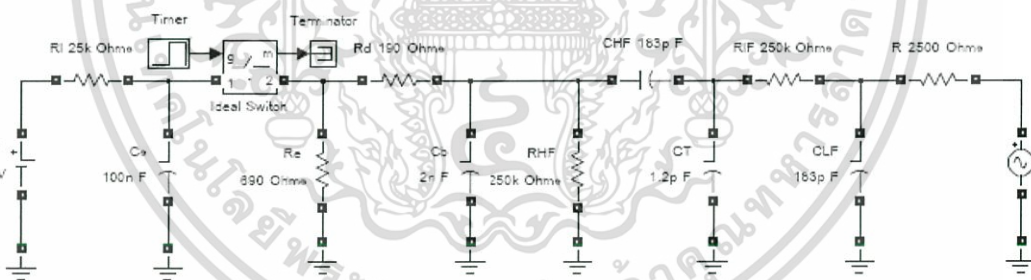


ก) มุม 0° (5 kV/div) ข) มุม 90° (5 kV/div) ค) มุม 180° (10 kV/div) ง) มุม 270° (10 kV/div)

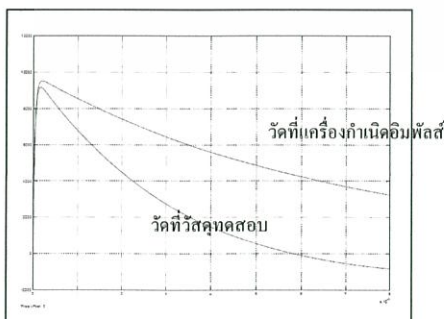
ภาพที่ 4 ผลการจำลองวิเคราะห์แรงดันอิมพัลส์ขาบวกและขั้วลบที่หับช้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มุมต่างๆ ตกคร่อมวัสดุทดสอบ โดยใช้ โปรแกรม PSpice

2.2 โปรแกรม Matlab

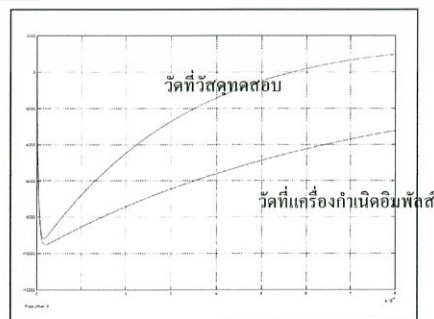
ทำการจำลองวิเคราะห์วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมโดยจัดวงจรตามภาพที่ 5 โดยเลือกใช้ Ideal switch แทนชุดทรานซิสเตอร์ในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า (Mardiana, 2006) วัสดุคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบ ซึ่ง ได้ผลการวัดตามภาพที่ 6



ภาพที่ 5 วงจรจำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Matlab



ก) ขั้วบวก

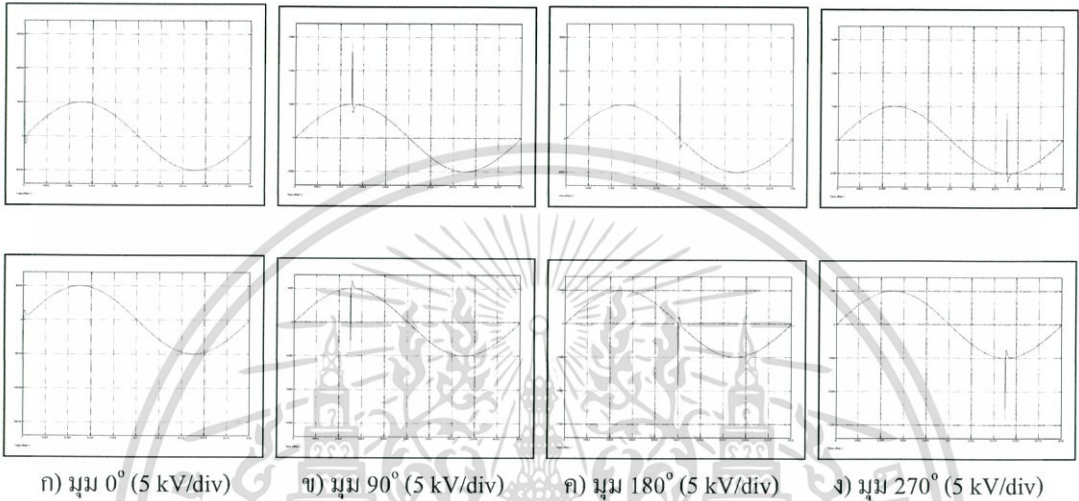


ข) ขั้วลบ

ภาพที่ 6 แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่จำลองวิเคราะห์ได้จากวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม โดยใช้โปรแกรม Matlab

จากภาพที่ 6 ผลการจำลองวิเคราะห์ได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวและชั่วพล วัตที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 9.30 kV 1.16/51.05 μ sec โดยแรงดันอิมพัลส์ที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบ 9.00 kV 1.06/19.73 μ sec

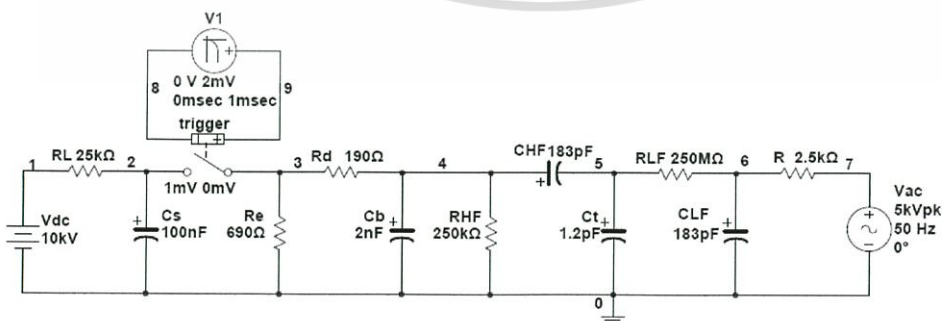
ทำการจำลองวิเคราะห์แรงดันรูปคลื่นผสม โดยจำลองวิเคราะห์ให้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 0°, 90°, 180° และ 270° ชั่วพลและลบ ซึ่งได้ผลการจำลองวิเคราะห์ตามภาพที่ 7



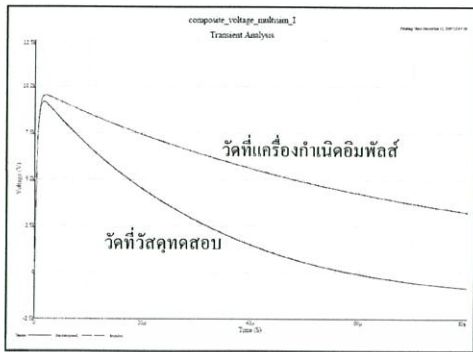
ภาพที่ 7 ผลการจำลองวิเคราะห์แรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวและชั่วพลที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุมต่าง ๆ ตกคร่อมวัสดุทดสอบ โดยใช้โปรแกรม Matlab

2.3 โปรแกรม Electronics Workbench

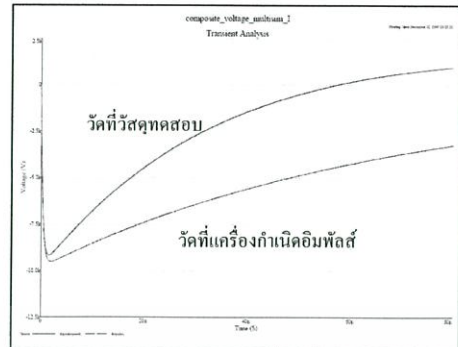
ทำการจำลองวิเคราะห์ห้วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมโดยจัดวงจรตามภาพที่ 8 โดยเลือกใช้ Voltage Trigger แทนชุดทรานซิสเตอร์ในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (ชวชัย สิมมา, สรวุฒิ คดีสุวรรณ และสมพร สิริสำราญนุกูล, 2550) จากนั้นจึงวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบ ซึ่งได้ผลการวัดตามภาพที่ 9



ภาพที่ 8 วงจรจำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Electronics Workbench



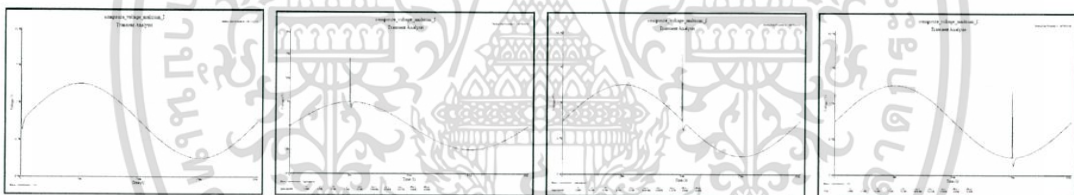
ก) ขั้วบวก



ข) ขั้วลบ

ภาพที่ 9 แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่จำลองวิเคราะห์ได้จากวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม โดยใช้โปรแกรม Electronics Workbench

จากภาพที่ 9 ผลการจำลองวิเคราะห์ ได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ วัดที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 9.52 kV 1.11/51.67 μ sec โดยแรงดันอิมพัลส์ที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบ 9.17 kV 1.03/19.39 μ sec ทำการจำลองวิเคราะห์แรงดันรูปคลื่นผสม โดยจำลองวิเคราะห์ให้แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าทับซ้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 0°, 90°, 180° และ 270° ขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งได้ผลการจำลองวิเคราะห์ตามภาพที่ 10

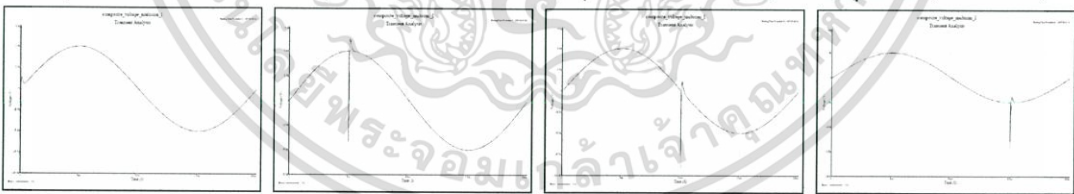


ก) มุม 0° (2.5 kV/div)

ข) มุม 90° (5 kV/div)

ค) มุม 180° (2.5 kV/div)

ง) มุม 270° (2.5 kV/div)



ก) มุม 0° (2.5 kV/div)

ข) มุม 90° (2.5 kV/div)

ค) มุม 180° (2.5 kV/div)

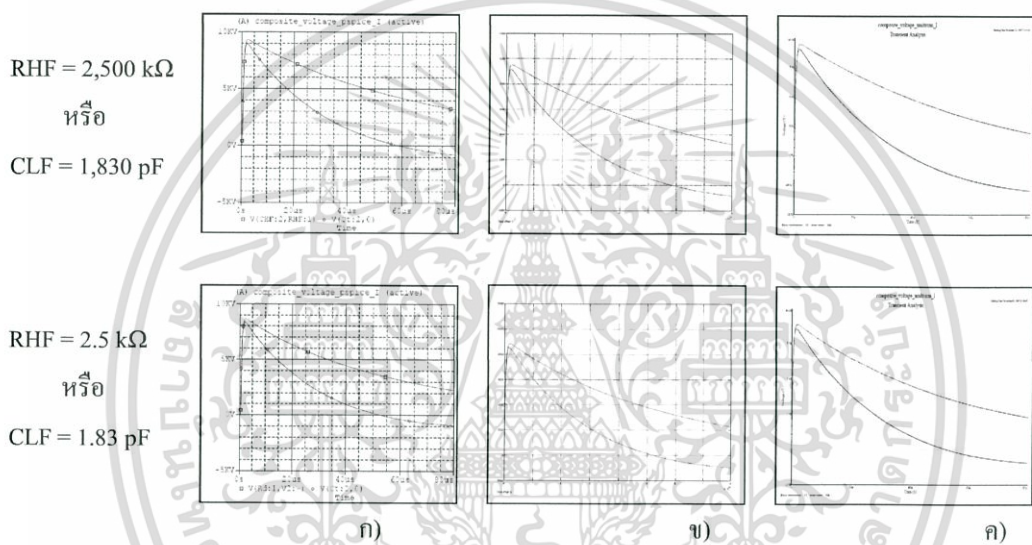
ง) มุม 270° (5 kV/div)

ภาพที่ 10 ผลการจำลองวิเคราะห์แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุมต่าง ๆ ตกคร่อมวัสดุทดสอบ โดยใช้ โปรแกรม Electronics Workbench

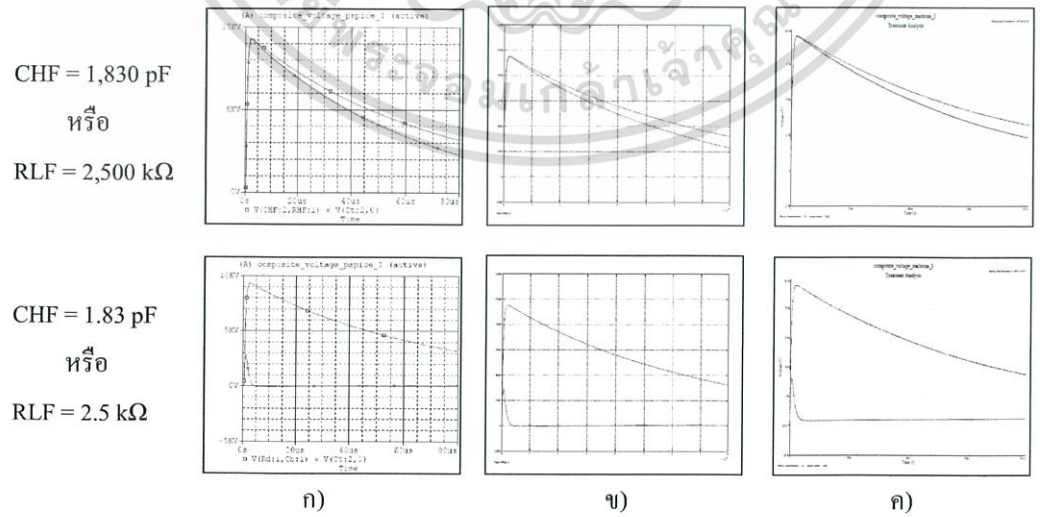
จากผลการจำลองทั้งสาม โปรแกรมพบว่า ค่าองค์ประกอบวงจรตามตารางที่ 1 สามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีการทับซ้อนกันที่มุมต่าง ๆ ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ แต่มีสิ่งที่น่าสนใจเกิดจากทั้งสาม โปรแกรม ซึ่งต่างให้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อนำวงจรย่อยแต่ละวงจรมาประกอบเป็นวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมนั้น รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบ มีลักษณะที่แตกต่าง ไปจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน นั่นแสดงว่าค่าองค์ประกอบแต่ละวงจรย่อยมีผลกระทบต่อแรงดันทดสอบ จึงได้จำลองวิเคราะห์เพื่อศึกษาผลกระทบดังกล่าวในข้อที่ 4.3

3. การจำลองวิเคราะห์ผลของค่าองค์ประกอบวงจรที่มีต่อแรงดันรูปคลื่นผสม

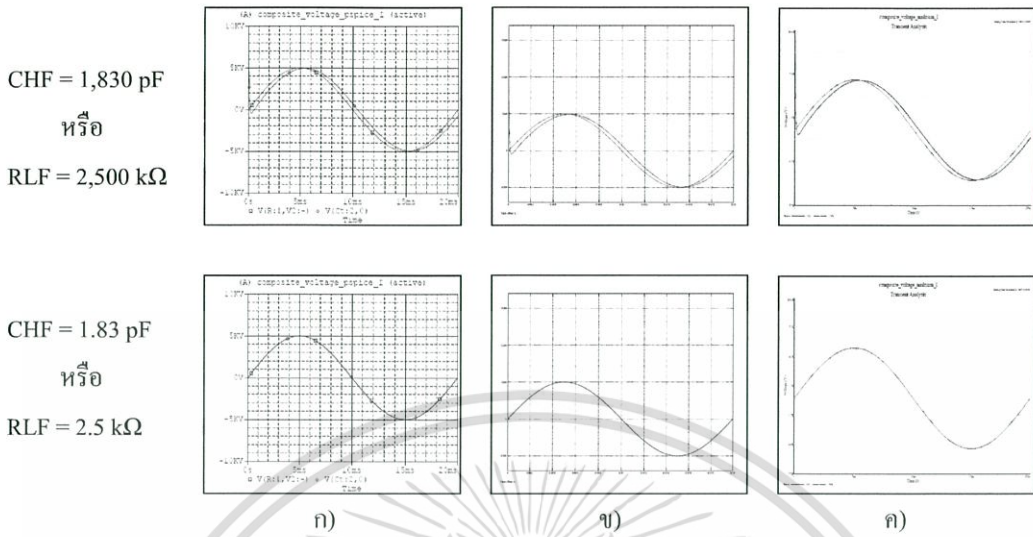
การศึกษาผลของค่าองค์ประกอบวงจรร้อยย ที่มีผลต่อแรงดันรูปคลื่นผสมจำนวน 5 ส่วน คือ ความต้านทานของวงจรรองความถี่สูงผ่าน; RHF, ความจุไฟฟ้าของวงจรรองความถี่สูงผ่าน; CHF, ความต้านทานของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน; RLF, ความจุไฟฟ้าของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน; CLF และความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ; CT โดยกำหนดให้ค่าองค์ประกอบอื่น ๆ เป็นตามตารางที่ 1 จำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม PSpice, Matlab และ Electronics Workbench ซึ่งมีผลการจำลองวิเคราะห์ตามภาพที่ 11 - 14 โดยรูป ก) แสดงผลการจำลองวิเคราะห์ด้วย PSpice รูป ข) แสดงผลการจำลองวิเคราะห์ด้วย Matlab และรูป ค) แสดงผลการจำลองวิเคราะห์ด้วย Electronics Workbench และสามารถสรุปผลการจำลองวิเคราะห์ได้ตามตารางที่ 2



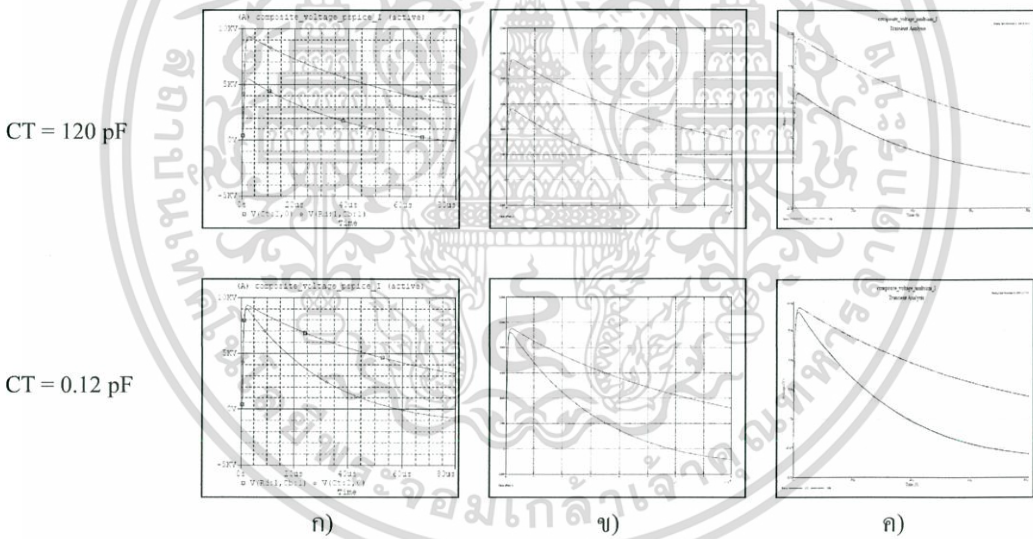
ภาพที่ 11 รูปคลื่นแรงดันอินพุตไฟฟ้าผ่านเมื่อมีการปรับค่า RHF หรือ CLF



ภาพที่ 12 รูปคลื่นแรงดันอินพุตไฟฟ้าผ่านเมื่อมีการปรับค่า CHF หรือ RLF



ภาพที่ 13 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อมีการปรับค่า CHF, RLF



ภาพที่ 14 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าเมื่อมีการปรับค่า CT

จากภาพที่ 11 - 14 ผลการจำลองวิเคราะห์จากทั้งสามโปรแกรมต่างให้ผลไปในทางเดียวกันและมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ค่าที่ระบุในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นค่าที่วัดได้จากการจำลองวิเคราะห์แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่วัดทดสอบ เมื่อมีการปรับเพิ่ม - ลด ค่าองค์ประกอบของวงจรกับค่าตามตารางที่ 1 โดยเปรียบเทียบกันระหว่างโปรแกรม PSpice, Matlab และ Electronics Workbench

ตารางที่ 2 ผลการจำลองวิเคราะห์ผลกระทบของค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อรูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสม (วัดค่าที่วัสดุทดสอบ)

แรงดันอิมพัลส์									
ค่าองค์ประกอบวงจร	PSpice			Matlab			Electronics Workbench		
	V_p kV	T_1 μ sec	T_2 μ sec	V_p kV	T_1 μ sec	T_2 μ sec	V_p kV	T_1 μ sec	T_2 μ sec
วงจรตามตารางที่ 1	8.99	1.06	19.84	9.00	1.06	19.73	9.17	1.03	19.44
RHF; 2,500 k Ω	8.99	1.05	19.83	9.10	1.05	19.50	9.17	1.03	19.46
RHF; 2.5 k Ω	8.36	0.99	18.03	8.43	0.98	17.30	8.54	0.96	16.68
CHF; 1,830 pF	9.26	1.14	43.12	9.35	1.12	42.88	9.48	1.10	42.75
CHF; 1.83 pF	2.88	*	*	2.90	*	*	2.97	*	*
RLF; 2,500 k Ω	9.21	1.12	43.18	9.30	1.10	42.95	9.43	1.10	42.68
RLF; 2.5 k Ω	4.33	*	*	4.35	*	*	4.45	*	*
CLF; 1,830 pF	8.99	1.05	19.79	9.00	1.03	19.50	9.17	1.03	19.42
CLF; 1.83 pF	8.99	1.05	19.82	9.00	1.03	19.48	9.17	1.03	19.44
CT; 120 pF	5.51	*	*	5.50	*	*	5.53	*	*
CT; 0.12 pF	9.03	1.02	19.80	9.15	1.03	19.55	9.22	1.03	19.38
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ									
ค่าองค์ประกอบวงจร	PSpice		Matlab		Electronics Workbench				
	V_p kV	ϕ deg ree	V_p kV	ϕ deg ree	V_p kV	ϕ deg ree			
วงจรตามตารางที่ 1	4.99	0.85	5.00	0.85	5.00	0.85			
RHF; 2,500 k Ω	4.99	0.85	4.99	0.85	4.99	0.85			
RHF; 2.5 k Ω	4.94	0.85	4.99	0.85	5.00	0.85			
CHF; 1,830 pF	4.96	8.28	4.95	8.25	4.95	8.24			
CHF; 1.83 pF	4.99	0.03	5.00	0.03	5.00	0.04			
RLF; 2,500 k Ω	4.95	8.26	4.95	8.30	4.95	8.30			
RLF; 2.5 k Ω	5.00	0.02	5.00	0.02	5.00	0.02			
CLF; 1,830 pF	4.99	0.94	5.00	0.94	5.00	0.92			
CLF; 1.83 pF	5.00	0.85	5.00	0.85	5.00	0.83			
CT; 120 pF	4.99	1.39	5.00	1.40	5.00	1.39			
CT; 0.12 pF	4.99	0.85	5.00	0.85	5.00	0.85			

* รูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐานมาก จึงไม่พิจารณา

สรุปผลการวิจัย

จากการจำลองวิเคราะห์ พบว่าโปรแกรม PSpice, Matlab และ Electronics Workbench ใช้ระยะเวลาในการจำลองวิเคราะห์ที่ไม่มากนัก อีกทั้งให้ผลการจำลองวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกัน และมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นผู้ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อตรวจสอบเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

9th National Grad Research Conference 14-15 March 2008, Graduate School, Burapha University ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบจึงสามารถเลือกใช้งานโปรแกรม PSpice, Matlab หรือ Electronics Workbench ในการจำลองวิเคราะห์วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมได้

จากผลการจำลองวิเคราะห์ตามตารางที่ 2 สามารถสรุปได้ดังนี้

ความจุไฟฟ้าของวงจรกรองความถี่สูงผ่านและความต้านทานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่งผลต่อรูปคลื่นของแรงดันรูปคลื่นผสมเช่นเดียวกันคือ เมื่อปรับค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้น จะทำให้ช่วงเวลาหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่วัสดุทดสอบเกิดมุมเฟสไหลเลื่อนไปจากแหล่งจ่ายมาก หากลดค่าลง จะทำให้แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าเกิดความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐานมาก

ความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบส่งผลต่อรูปคลื่นของแรงดันรูปคลื่นผสม คือ เมื่อปรับค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับลดลง หากลดค่าลง จะทำให้ช่วงเวลาหลังคลื่น ไม่แตกต่างไปจากวงจรตามตารางที่ 1 มากนัก

ความต้านทานของวงจรกรองความถี่สูงผ่านและความจุไฟฟ้าของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านส่งผลต่อรูปคลื่นของแรงดันรูปคลื่นผสมน้อยมาก

ดังนั้นหากต้องการให้แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ทับซ้อนบน ไฟกระแสสลับเป็นไปตามมาตรฐานของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ อาจทำได้ด้วยการปรับค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองความถี่สูงผ่านเพิ่มขึ้น แต่ต้องพิจารณาการทรักของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ให้มีระยะเวลาเลื่อนไปตามมุมเฟสไหลเลื่อนที่เกิดขึ้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วย

เอกสารอ้างอิง

โกสินทร์ คล่องเชิงสาร, อานันท์วัฒน์ คุณากร, พีรวิทย์ ยุทธโกวิท และนรเศรษฐ พัฒนเดช. (2550). วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์. ใน *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30* (หน้า 189-192). ม.ป.ท.

ธวัชชัย สิมมา, สราวุฒิ คลี่สุวรรณ, และสมพร สิริดำรงกุล. (2550). การออกแบบและการสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมสำหรับการทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ระหว่างมุม 0° - 360° สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ. ใน *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30* (หน้า 205-208). ม.ป.ท.

Huang, C. F., Allen, N. L., & Greaves, D. A. (1999). High voltage circuits for application of composite voltages to test gaps. *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.*, 146(2), 64-69.

Mardiana, R. (2006). Simulation of high voltage generation for laboratory practices. In *13th Asian Conference on Electrical Discharge* (pp. O-10, 1-4). n.p.

การศึกษาคุณลักษณะสมบัติของฉนวนภายหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม

The Study of Electrical Insulation Property after Receive Composite Voltage

ภูษิต บุญโท นรเศรษฐ พัฒนเดช พิรุณดิ ยูทรโกวิท มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ : 0-2326-9902 E-mail: pooh_engineer_pea@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประกอบสร้างวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมซึ่งประกอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz เพื่อนำไปทดสอบฉนวนทางไฟฟ้าจำนวน 3 ชนิด คือ โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม, กระดาษเคลือบโพลีเอสเตอร์และ DMD (โพลีเอสเตอร์ไฟเบอร์ (คาร์บอน), โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม (ไมลาร์), โพลีเอสเตอร์ไฟเบอร์ (คาร์บอน)) จากผลการทดสอบพบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมทำให้ฉนวนไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด มีค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียโคอีเล็กทริก ($\tan \delta$) สูงขึ้น 9.93% , 35.58% และ 26.71% ตามลำดับ นอกจากนี้แรงดันรูปคลื่นผสมยังส่งผลให้มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าลดลง 11% , 17% และ 16% ตามลำดับ และมีความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามูลค่าลดลง 15%, 19% และ 15% ตามลำดับ

คำสำคัญ: แรงดันรูปคลื่นผสม, ทับซ้อน, ฉนวนไฟฟ้า

Abstract

This paper presents the construction of composite voltage circuit ; lightning impulse voltage superimposed on AC voltage 50 Hz, for electrical insulation test. The insulator under test consist of polyester film, kraft paper and DMD (Polyester Fiber (Darcon), Polyester Film (Milar) , Polyester Fiber (Darcon)). According to experimental test, the results composite test voltage causes increasing of dielectric loss ($\tan \delta$) of such insulators 9.93%, 35.58% and 26.71% respectively. It also reduced the AC voltage dielectric strength of the mentioned insulators 11%, 17% and 16% respectively. Besides, the lightning impulse voltage dielectric strength decreased 15%, 19% and 15% respectively.

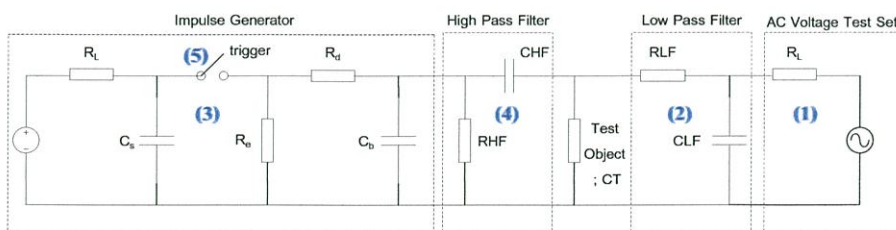
Keywords: composite voltage, superimposed , Electrical Insulation

1. บทนำ

การใช้งานอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าทุกชนิดต่างไม่อาจหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าในขณะที่ใช้งานอยู่ได้ ทั้งความผิดพลาดที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น แรงดันเกินฟ้าผ่าหรือเกิดจากสภาพการใช้งาน เช่น แรงดันเกินสวิตช์ ดังนั้นฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์เหล่านั้น จะต้องสามารถทนทานต่อความผิดพลาดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานอยู่ได้โดยไม่เกิดการชำรุดเสียหาย ซึ่งก่อนหน้านั้น มาตรฐานการทดสอบได้กำหนดให้ทำการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละเงื่อนไขด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์แต่เพียงอย่างเดียว อาจไม่ครอบคลุมถึงสถานะการใช้งานจริงของอุปกรณ์ เนื่องจากขณะที่ใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้ารองรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอยู่แล้ว มีโอกาสที่จะเกิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นมากับฉนวนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับดังกล่าว ฉนวนที่ไม่ผ่านการทดสอบด้วยแรงดันรูปคลื่นผสมอาจจะเกิดความเสียหายเห็นได้จากในปัจจุบันเริ่มมีชื่อเรียกจากผู้ใช้งานอุปกรณ์ให้มีการทดสอบด้วยแรงดันรูปคลื่นผสม เพื่อให้สามารถยืนยันได้ว่าอุปกรณ์เหล่านั้นสามารถทนทานต่อความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจริงในขณะที่ใช้งานได้

2. วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ได้ออกแบบสร้างประกอบด้วยส่วนประกอบวงจรหลัก 5 ส่วน คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz (1), วงจรป้องกันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ(2), แหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า(3), วงจรป้องกันแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า(4)และวงจรกำเนิดสัญญาณเริ่มทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ (5) ตามรูปที่ 1 ส่วนประกอบที่มีความสำคัญมากในวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม คือ วงจรป้องกันทั้ง 2 ชุด โดยวงจรป้องกันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะต้องป้องกันไม่ให้แรงดันอิมพัลส์เข้าไปยังแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและวงจรป้องกันแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะต้องป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปยังแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์



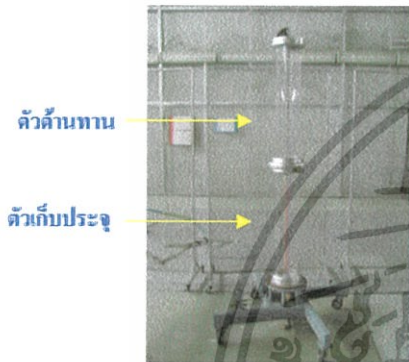
รูปที่ 1 วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันอิมพัลส์กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรป้องกันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ จะใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานขนาด 550 kΩ และตัวเก็บประจุขนาด 157 pF ซึ่งสามารถคำนวณความถี่ตัดข้าม (cut off frequency) ได้จากสมการที่ (1)

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \tag{1}$$

จากสมการข้างต้น สามารถคำนวณความถี่ตัดข้ามได้เท่ากับ 1,843 Hz ซึ่งสามารถป้องกันความถี่ออสซิลเลชันของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าซึ่งมีค่าประมาณ 0.5 MHz [1] ได้ สำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ประกอบสร้างมีรายละเอียดตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ประกอบสร้าง

วงจรป้องกันแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า มีใช้งานอยู่ 2 ชนิด คือ วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (high pass filter) และช่องว่างเก็บ (spere gap) ซึ่งวงจรกรองความถี่สูงผ่านมีข้อดีคือสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้อย่างสม่ำเสมอ แต่มีข้อเสียคืออาจก่อประกายไฟภายในวงจรซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุอาจส่งผลต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ [2] ส่วนช่องว่างเก็บมีข้อดีคือสามารถหาใช้งานได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือจำเป็นต้องมีการปรับระยะช่องว่างเก็บให้เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ (break down) ข้ามผ่านช่องว่างเก็บก่อนที่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะเบรกดาวน์ข้ามผ่านไปยังวัสดุทดสอบ [3] สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ช่องว่างเก็บที่มีใช้งานอยู่ในห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูงเป็นวงจรป้องกันแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์

วงจรถูกกำเนิดสัญญาณเริ่มทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์จะใช้รูปแบบการกำเนิดสัญญาณแบบสุ่ม (random) เนื่องจากในสภาพการใช้งานจริงมีโอกาสเกิดความคิดพร่องได้ในทุก ๆ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

3. ฉนวนไฟฟ้า

ฉนวนไฟฟ้าเป็นสารที่นำไฟฟ้าได้น้อยมากหรือไม่นำไฟฟ้าเลยเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำต่อฉนวน เนื่องจากภายในโมเลกุลไม่มี

อิเล็กตรอนอยู่เลยหรือมีจำนวนน้อย ฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์จริง ๆ เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระเลย เราสามารถแบ่งฉนวนไฟฟ้าได้เป็น 3 ประเภท คือ ฉนวนก๊าซ, ฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง [4]

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ฉนวนแข็งจำนวน 3 ชนิดได้แก่ โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม หนา 188 ไมครอน, กระดาษฉนวน หนา 250 ไมครอน และ DMD หนา 250 ไมครอน ซึ่งมีใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากในเครื่องกลไฟฟ้า เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, มอเตอร์ไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น

4. การทดสอบและประเมินผล

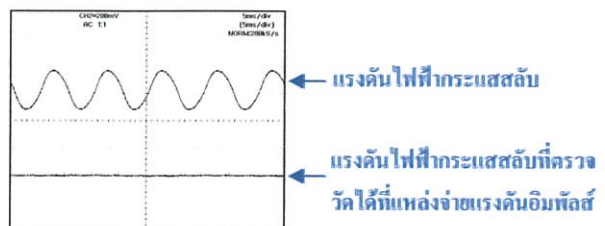
4.1 คุณสมบัติของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

การทดสอบหาคุณสมบัติของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสร้างขึ้นด้วยวิธีการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไปยังวัสดุทดสอบและป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านช่องว่างเก็บไปทับซ้อนกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้ป้อนให้วัสดุทดสอบก่อนหน้านี้ และทำการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันดังนี้

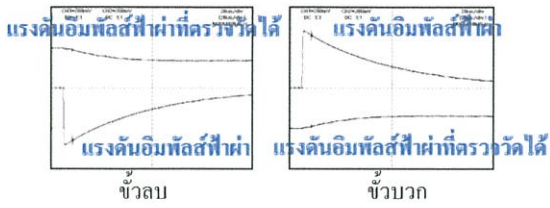
1. รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่แหล่งจ่ายแรงไฟฟ้ากระแสสลับเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกจากช่องว่างเก็บไปยังแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์
2. รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่แหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์เปรียบเทียบกับแรงดันอิมพัลส์ที่ออกจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไปยังแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
3. รูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นผสมที่วัสดุทดสอบ



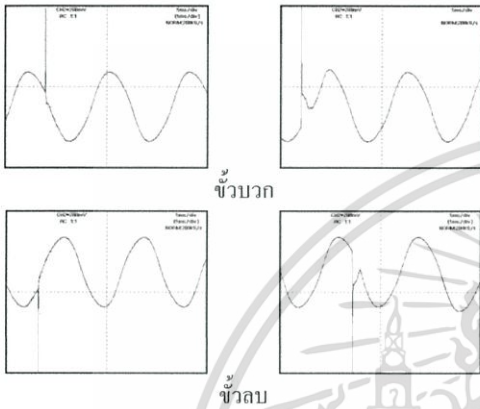
รูปที่ 3 วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสร้าง



รูปที่ 4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตรวจวัดในวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม



รูปที่ 5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

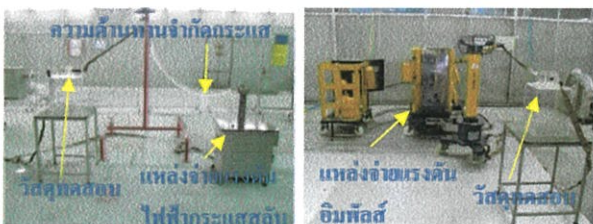


รูปที่ 6 ตัวอย่างลักษณะแรงดันรูปคลื่นผสมที่สร้างได้

ผลการตรวจวัดรูปคลื่นพบว่า ไม่มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับข้ามผ่านช่องว่างแคบไปยังแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์, แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไปยังแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับประมาณ 6.5% ของค่ายอดแรงดันอิมพัลส์และสามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครบวงจรที่วัดทดสอบได้

4.2 ผลของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ, แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าและแรงดันรูปคลื่นผสมต่อคุณลักษณะความเป็นฉนวนของฉนวนที่นำมาศึกษา

ทำการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า โดยมีวงจรทดสอบตามรูปที่ 7 และทำการทดสอบฉนวนแต่ละชนิดจำนวนชนิดละ 10 ชิ้น นำค่าแรงดันที่เกิดการเบรคควาน์นค่าเฉลี่ย โดยมีผลการทดสอบตามตารางที่ 1



รูปที่ 7 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรคควาน์ในฉนวน

	โพลีเอสเตอร์	กระดาษฉนวน	DMD
AC Voltage (kV)	23.10	9.39	18.57
Impulse Voltage (kV)	45.20	15.00	38.34

ทำการทดสอบด้วยแรงดันรูปคลื่นผสมซึ่งมีวงจรทดสอบตามรูปที่ 3 โดยมีระดับแรงดันที่เลือกใช้คือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับใช้แรงดันที่ 50% ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำให้เกิดการเบรคควาน์เป็นระยะเวลาประมาณ 5 นาที, แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าใช้แรงดันที่ 80% ของแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรคควาน์ จำนวน 10 รูปคลื่น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเบรคควาน์จนไม่สามารถนำทดสอบหาค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูงยูเปลาไดอิเล็กตริกได้ ฉนวนที่ใช้ในการทดสอบมีจำนวน ชนิดละ 10 ชิ้น และเก็บข้อมูลจำนวนฉนวนที่เกิดการเบรคควาน์ โดยมีผลการทดลองตามตารางที่ 2 และมีลักษณะฉนวนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม ตามรูปที่ 8



รูปที่ 8 ลักษณะฉนวนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและภายหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม

ตารางที่ 2 จำนวนฉนวนที่เกิดการเบรคควาน์ในแต่ละชนิดจากแรงดันรูปคลื่นผสมที่ระดับแรงดัน AC / Impulse

	โพลีเอสเตอร์	กระดาษฉนวน	DMD
ระดับแรงดัน AC / Impulse (kV)	11.6 / 36.2	4.7 / 12.0	9.3 / 30.7
จำนวนชั้นที่เกิดการเบรคควาน์	0	2	0

การทดสอบหาค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูงยูเปลาไดอิเล็กตริก ซึ่งมีวงจรการทดสอบตามรูปที่ 9 โดยการทดสอบหาค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูงยูเปลาไดอิเล็กตริกนี้ จะทำการเปรียบเทียบใน 3 กรณี คือ

1. ฉนวนที่ได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ 50% ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำให้เกิดการเบรคควาน์ เป็นระยะเวลาประมาณ 5 นาที
2. ฉนวนที่ได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ 80% ของแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรคควาน์ จำนวน 10 รูปคลื่น
3. ฉนวนที่ได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 วงจรทดสอบหาค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กคริก

การทดสอบค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กคริก ดำเนินการก่อนและหลังการทดสอบทั้ง 3 หัวข้อข้างต้น และทดสอบเฉพาะฉนวนที่ไม่เกิดการเบรคความ โดยมีการทดสอบตามตารางที่ 3 และเมื่อการทดสอบหาค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กคริก ของฉนวนภายหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสมแล้วเสร็จ จึงนำฉนวนทั้ง 3 ชนิดมาทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอีกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าก่อนได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม โดยมีผลการทดสอบตามตารางที่ 3 ภายหลังจากการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนภายหลังจากได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม ฉนวนทั้งหมดเกิดการเบรคความและชำรุดเสียหาย

ตารางที่ 3 ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กคริกเฉลี่ย ของฉนวนที่ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ , แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันรูปคลื่นผสม

Voltage	ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กคริก					
	โพลีเอสเตอร์		กระดาษฉนวน		DMD	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
AC	0.414	0.427	0.515	0.570	0.371	0.399
Impulse	0.413	0.439	0.524	0.606	0.370	0.417
Composite	0.413	0.454	0.520	0.705	0.378	0.479

ตารางที่ 4 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรคความในฉนวนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังได้รับแรงดันรูปคลื่นผสม

Voltage (kV)	โพลีเอสเตอร์		กระดาษฉนวน		DMD	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
AC	23.10	20.56	9.39	7.79	18.57	15.60
Impulse	45.20	38.42	15.00	12.15	38.34	32.60

ผลการทดสอบฉนวนทั้ง 3 ชนิด ต่างให้ผลไปในทางเดียวกันคือ แรงดันรูปคลื่นผสมส่งผลให้ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กคริกของโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม, กระดาษฉนวนและ DMD สูงขึ้น 9.93% , 35.58% และ 26.71% ตามลำดับ นอกจากนี้แรงดันรูปคลื่นผสมยังส่งผล

ให้ฉนวนมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าลดลง 11% , 17% และ 16% ตามลำดับ และมีค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์มีค่าลดลง 15% , 19% และ 15% ตามลำดับ

5. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสร้างสำหรับทดสอบฉนวนไฟฟ้าสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับใช้ทดสอบฉนวนไฟฟ้าได้ โดยจากการทดสอบฉนวน 3 ชนิด ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม, กระดาษฉนวนและ DMD พบว่าแรงดันรูปคลื่นผสมส่งผลให้ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กคริกสูงขึ้นและส่งผลให้ฉนวนมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าลดลง

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงพบว่า ในบางครั้งช่องว่างเก็บไม่ทำให้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเกิดการเบรคความเข้ามาผ่านไปที่ทับซ้อนกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่วัสดุทดสอบทำให้อาจใช้เวลาในการทดสอบเป็นระยะเวลานาน ซึ่งอาจทำให้สภาพอากาศในแต่ละช่วงเวลาส่งผลต่อการทดสอบได้ เพื่อลดปัญหาดังกล่าวอาจเลือกใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านแทน ช่องว่างเก็บ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงค่าองค์ประกอบของวงจรคือ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุจะต้องไม่ทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผิดเพี้ยนไปจากค่ามาตรฐาน

การทดสอบเพื่อศึกษาผลของแรงดันรูปคลื่นผสมที่มีต่อฉนวนไฟฟ้าอาจเพิ่มหัวข้อการทดสอบอื่น ๆ เช่น การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน , การตรวจสอบเนื้อฉนวนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM), การตรวจสอบการแตกกิ่งทางไฟฟ้าโดยใช้เมทิลีนบลู เป็นต้น เพื่อยืนยันถึงผลกระทบของแรงดันรูปคลื่นผสมต่อฉนวนไฟฟ้าได้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Dieter Kind, Kurt Feser, "High-Voltage Test Techniques", 2nd Revised and Enlarged Edition, Newnes 1988, p.45.
 [2] ภูชิต บุญโท, นรเศรษฐ พัฒนเดช, พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, มณฑล ลีลาจินควาโรฤกษ์, "การศึกษาการจำลองวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรม PSpice เปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรม Matlab และ Electronics Workbench" การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยบูรพา, หน้า P-055, 2551
 [3] C.F. Huang, N.L. Allen and D.A. Greaves, "High Voltage Circuits for Application of Composite Voltage to Test Gaps", IEE Proceeding online no.19990030, pp64-69, 1999.
 [4] นรเศรษฐ พัฒนเดช, "วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1 : ฉนวนและวัสดุไฟฟ้า", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

การประกอบสร้างวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมโดยใช้วงจรป้องกันแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน และตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

The Construction of Composite Voltage Circuit by Using High Pass Filter and Low Pass Filter to Protect Circuit

ภูชิต บุญโท^{1,2} นรเศรษฐ พัฒนเดช¹ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์¹

Poochit Boontho Norasege Pathanadej Mothol Leelachindaikaileak

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ การประกอบสร้างวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ทับซ้อนอยู่บนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบตามลำดับ โดยทำการจำลองวิเคราะห์วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมก่อนทำการประกอบสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งภายหลังจากการประกอบสร้างและทดสอบในห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูงพบว่า วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสร้างสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่วัสดุทดสอบได้ อีกทั้งวงจรกรองความถี่สูงผ่านสามารถกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถกรองแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบได้เป็นอย่างดีและให้ผลเช่นเดียวกับผลการจำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

Abstract

This paper presents the construction of composite voltage circuit; lightning impulse voltage superimposed on AC Voltage by using high pass filter and low pass filter to protect impulse voltage generator and testing transformer respectively. Before the composite voltage generator construction we use computer program to simulate this circuit. After the construction and testing this composite voltage circuit in high voltage laboratory; the circuit can produce composite voltage between standard lightning impulse voltages superimposed on AC voltage at test object. High pass filter and low pass filter can protect impulse voltage generator and testing transformer from AC voltage and impulse voltage respectively. The testing results are same as simulation result.

Keywords : composite voltage , superimposed voltage , high pass filter , low pass filter

Poochit Boontho : pooh_engineer_pea@hotmail.com

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Department of electrical engineering , Faculty of engineering , King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang

² แผนกจัดการงานวิศวกรรม กองบริการวิศวกรรม ฝ่ายบริการวิศวกรรมและทดสอบ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Engineering Management Section , Engineering Service Division , Engineering Service and Testing Department , Provincial Electricity Authority

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

แรงดันรูปคลื่นผสมเป็นแรงดันที่จำลองสภาพแรงดันที่อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับในระหว่างที่เกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า ซึ่งสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ในขณะที่อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับแรงดันใช้งานปกติและเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบไฟฟ้าทั้งที่เป็นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง (Switching Impulse Voltage) หรือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse Voltage) แรงดันไฟฟ้าที่อุปกรณ์ได้รับไม่ได้มีเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์เพียงอย่างเดียว แต่จะเป็นแรงดันอิมพัลส์ที่ทับซ้อนอยู่บนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเราเรียกแรงดันไฟฟ้านี้ว่าแรงดันทับซ้อน (Superimposed Voltage) หรือแรงดันรูปคลื่นผสม (Composite Voltage) แรงดันรูปคลื่นผสมนี้จะช่วยให้ผู้ใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ทราบถึงความคงทนต่อความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ ซึ่งก่อนหน้านี้อาจทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบจะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์แต่เพียงอย่างเดียว ทำให้การทดสอบดังกล่าวไม่สอดคล้องกับสภาวะการใช้งานอุปกรณ์ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบไฟฟ้า หากทำการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันรูปคลื่นผสมเพิ่มเติมจากการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์แล้ว จะช่วยในการยืนยันถึงคุณสมบัติของสภาพความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งในปัจจุบันนี้ ผู้ใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าเริ่มตระหนักเห็นความสำคัญของการทดสอบด้วยแรงดันรูปคลื่นผสมก่อนนำไปใช้งานแล้ว แต่สำหรับในประเทศไทย วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมยังมีจำนวนไม่มากนักและการศึกษาในเรื่องของการประกอบสร้างยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ทำให้ไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าได้

วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมประกอบด้วยวงจรป้องกันจำนวน 2 ชุด คือวงจรป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และวงจรป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ ซึ่งการเลือกใช้งานอาจเลือกใช้ช่องว่างแก๊ป (Spere Gap) เป็นวงจรป้องกัน [1] เพราะมีข้อดีคือสามารถป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อเสียคือการปรับระยะช่องว่างแก๊ปมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนข้ามผ่าน หากปรับระยะไม่มีความเหมาะสมอาจทำให้แรงดันอิมพัลส์ไม่เบรกดาวนข้ามผ่านไปทับซ้อนกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ [2] หรือหากเกิดการเบรกดาวนขึ้นแรงดันอิมพัลส์ที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะไม่ใช่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (Standard Lightning Impulse Voltage) หรือแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งมาตรฐาน (Standard Switching Impulse Voltage) แต่จะกลายเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด (Chop Wave Impulse Voltage) งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้งานวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) เป็นวงจรป้องกันเพราะมีข้อดีคือสามารถป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบได้ดีในระดับหนึ่งและสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานหรือแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งมาตรฐานทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ทุกครั้ง แต่มีข้อเสียคือจำเป็นต้องมีการคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อไม่ให้ค่าองค์ประกอบของวงจรถูกกล่าวส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในแรงดันอิมพัลส์และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ก่อนที่จะดำเนินการประกอบสร้างวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมโดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกันนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องวิเคราะห์วงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ก่อนเพื่อยืนยันผลการคำนวณค่าองค์ประกอบวงจรว่าสามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมได้ถูกต้องและลดค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้าง ซึ่งภายหลังการประกอบสร้างวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมแล้วเสร็จจะได้นำผล

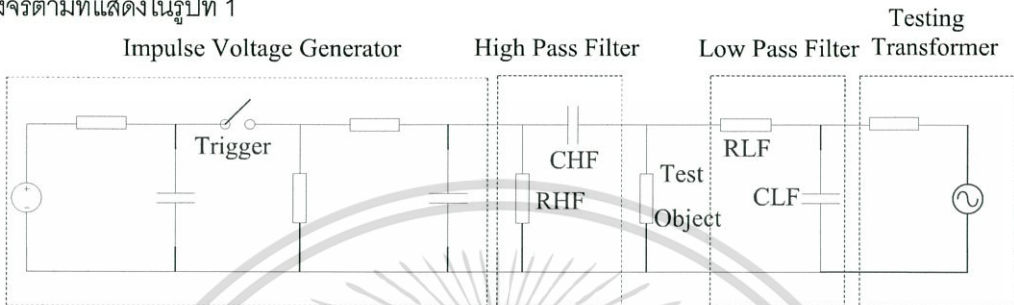
ผลการทดสอบวงจรมาเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองวิเคราะห์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์และวิธีการ

วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมโดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกันจะประกอบด้วยวงจรร้อย 4 ส่วน คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Generator) , วงจรกรองความถี่สูงผ่าน , วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ (Testing Transformer) โดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านเป็นวงจรป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ โดยมีวงจรตามที่แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน ออกแบบวงจรแบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ มีข้อพิจารณา ดังสมการที่ 1 - 3 ส่วนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ออกแบบวงจรแบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ โดยมีข้อพิจารณา ดังสมการที่ 1, 4 และ 5 ดังนี้

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

$$A_{VHF} = \frac{1}{\sqrt{1+(f_c/f)^2}} \quad (2)$$

$$\phi_{HF} = \tan^{-1}(f_c/f) \quad (3)$$

$$A_{VLF} = \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_c)^2}} \quad (4)$$

$$\phi_{LF} = -\tan^{-1}(f/f_c) \quad (5)$$

เมื่อ f_c คือ ความถี่ข้ามผ่าน

A_{VHF} คือ อัตราขยายแรงดันของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

ϕ_{HF} คือ มุมเฟสไหลเลื่อนของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

A_{VLF} คือ อัตราขยายแรงดันของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ϕ_{LF} คือ มุมเฟสไหลเลื่อนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองความถี่สูงผ่านและความต้านทานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่งผลต่อรูปคลื่นของแรงดันรูปคลื่นผสมมากที่สุดคือ เมื่อปรับค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้น จะทำให้ช่วงเวลาหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่วัสดุทดสอบเกิดมุมเฟสไหลเลื่อนไปจากแหล่งจ่ายมาก หากลดค่าลง จะทำให้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเกิดความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานมาก [2] ดังนั้นการเลือกใช้ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานดังกล่าวจะต้องมีความเหมาะสมกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบภายในห้องทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีรายละเอียดขนาดพิกัดดังตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์			วงจรรองความถี่สูงผ่าน		
แรงดันอัดประจุอิมพัลส์	10	kV	ความต้านทานวงจรรองความถี่สูงผ่าน	250**	k Ω
ความต้านทานอัดประจุ	25*	k Ω	ความจุไฟฟ้าวงจรรองความถี่สูงผ่าน	1,571**	pF
ความจุไฟฟ้าเก็บประจุอิมพัลส์	100*	nF	วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน		
ความจุไฟฟ้าไหลด	2*	nF	ความต้านทานวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	550**	k Ω
ความต้านทานหน่วง	190*	Ω	ความจุไฟฟ้าวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	157**	pF
ความต้านทานปล่อยประจุ	690*	Ω	หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ		
วัสดุทดสอบ			ความต้านทานจำกัดกระแสไฟฟร่ง	2.5*	M Ω
ความจุไฟฟ้าวัสดุทดสอบ	1.2	pF	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	100*	kV

* อ้างอิงตามพิกัดของอุปกรณ์ห้องทดสอบทางไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

** ค่าที่ออกแบบ

จากค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านสามารถพิจารณาค่าความถี่ข้ามผ่าน, อัตราขยายแรงดันและมุมเฟสไหลเลื่อนดังตารางที่ 2

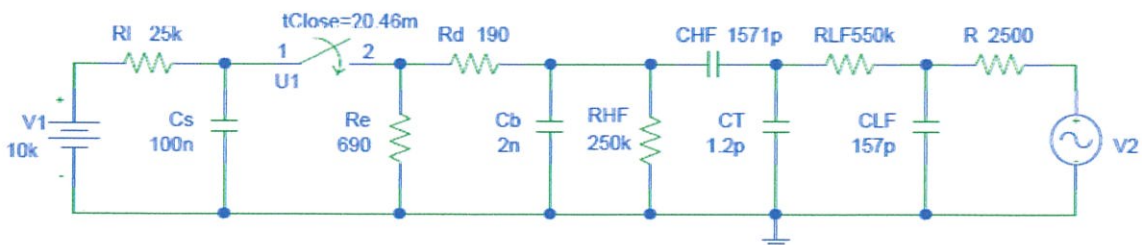
ตารางที่ 2 ผลการคำนวณค่าคุณสมบัติของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

	วงจรรองความถี่สูงผ่าน	วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน
ความถี่ข้ามผ่าน (Hz)	405	1,843
อัตราขยายแรงดัน	0.12	0.99
มุมเฟสไหลเลื่อน (degree)	83.0	-1.6

จากค่าความถี่ข้ามผ่านในตารางที่ 2 พบว่าวงจรรองความถี่สูงผ่านสามารถกรองความถี่ที่มีค่าต่ำกว่า 405 Hz ซึ่งสามารถป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จากไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ได้ และวงจรรองความถี่ต่ำผ่านสามารถกรองความถี่ที่มีค่าสูงกว่า 1,843 Hz ซึ่งสามารถป้องกันความถี่ฮาร์มอนิกของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีค่า 0.5 MHz [3] ได้

การจำลองวิเคราะห์วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เลือกใช้งานคือ โปรแกรม PSpice student edition ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีใช้งานอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า โดยใช้ค่าองค์ประกอบของวงจรในตารางที่ 1 ในการจำลองวิเคราะห์โดยมีวงจรตามรูปที่ 2



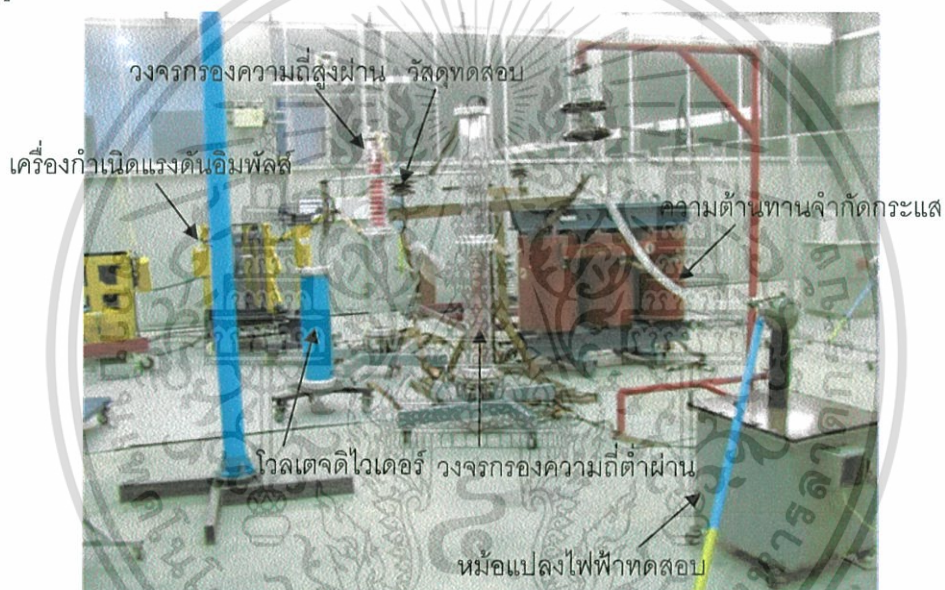
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2 วงจรจำลองวิเคราะห์ที่ใช้โปรแกรม PSpice ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองวิเคราะห์จะพิจารณาในช่วงทรานเซียนต์ (Transient) โดยพิจารณาใน 4 ส่วน คือ

1. รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ผ่านจากวงจรรองความถี่สูงผ่านไปยังเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
2. รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ผ่านจากวงจรรองความถี่ต่ำผ่านไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ
3. รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่วัดชุดทดสอบเมื่อประกอบวงจรทั้งหมดแต่ยังไม่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
4. แรงดันรูปคลื่นผสมที่วัดชุดทดสอบ

การประกอบสร้างวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสม

วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสร้างจะใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบภายในห้องทดสอบทางไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยประกอบสร้างวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านเพิ่มเติมโดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานของวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านตามตารางที่ 1 โดยมีวงจรมองหลังการประกอบสร้างแล้วเสร็จตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสร้าง

การทดสอบเพื่อตรวจสอบวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสร้างขึ้นจะดำเนินการใน 4 ส่วน เช่นเดียวกับการจำลองวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อดำเนินการเปรียบเทียบผลการทดสอบจากวงจรที่ประกอบสร้างจริงกับการจำลองวิเคราะห์หว่าแตกต่างกันเล็กน้อยเพียงใด

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

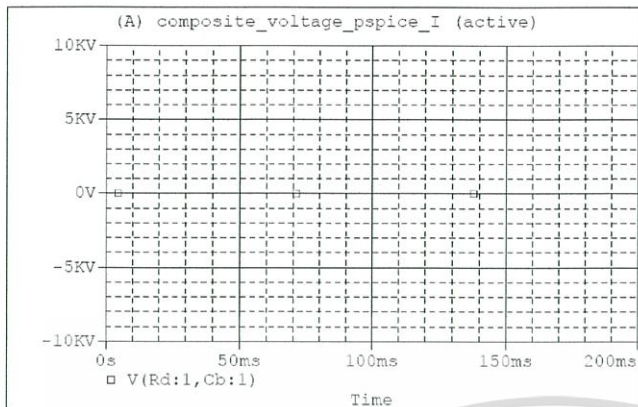
การตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ผ่านจากวงจรรองความถี่สูงผ่านไปยังเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

การตรวจวัดแรงดันนี้เป็นการตรวจสอบว่าวงจรรองความถี่สูงผ่านกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ได้มากน้อยเพียงใด โดยทำการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับระหว่างวงจรรองความถี่สูงผ่านกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยมีผลการจำลองวิเคราะห์และการทดสอบวงจรจริงตามรูปที่ 4

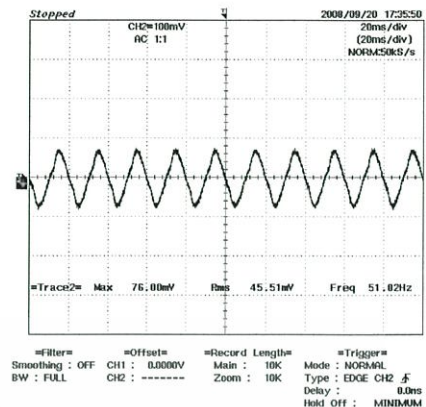
จากการจำลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าไม่มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับข้ามผ่านจากวงจรรองความถี่สูงผ่านไปยังเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ส่วนการทดสอบวงจรจริงพบว่าเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสสลับขนาด 5 kV ภายในวงจรที่ประกอบสร้าง ตรวจพบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 590 V ข้ามผ่านจากวงจรรองความถี่สูงผ่านไปยังเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



ผลจากการจำลองวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



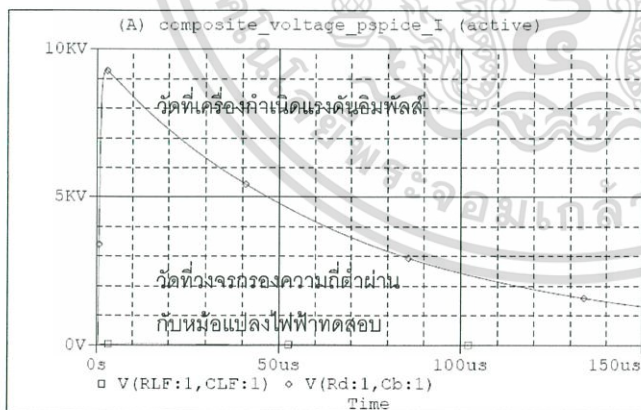
ผลจากวงจรที่ประกอบสร้าง

รูปที่ 4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตรวจวัดได้ระหว่างวงจรรองความถี่สูงผ่านกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

การตรวจวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ผ่านจากวงจรรองความถี่ต่ำผ่านไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ

การตรวจวัดแรงดันนี้เป็นการตรวจสอบว่าวงจรรองความถี่ต่ำผ่านกรองแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้มากน้อยเพียงใด โดยทำการตรวจวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าระหว่างวงจรรองความถี่ต่ำผ่านกับหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ โดยมีผลการจำลองวิเคราะห์และการทดสอบวงจรจริงตามรูปที่ 5

จากการจำลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าไม่มีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าข้ามผ่านจากวงจรรองความถี่ต่ำผ่านไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ ส่วนการทดสอบวงจรจริงพบว่าเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขนาด 10 kV ภายในวงจรที่ประกอบสร้าง ตรวจพบแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1.6 kV ข้ามผ่านจากวงจรรองความถี่ต่ำผ่านไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ



ผลจากการจำลองวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ผลจากวงจรที่ประกอบสร้าง

รูปที่ 5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ตรวจวัดได้ระหว่างวงจรรองความถี่ต่ำผ่านกับหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ

การตรวจวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่วัสดุทดสอบเมื่อประกอบวงจรทั้งหมดแต่ยังไม่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การตรวจวัดแรงดันนี้เป็นการตรวจสอบว่าวงจรที่ประกอบสร้างมีคุณสมบัติในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานหรือไม่ โดยมีผลการจำลองวิเคราะห์และการทดสอบวงจรจริงตามรูปที่ 5 นี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

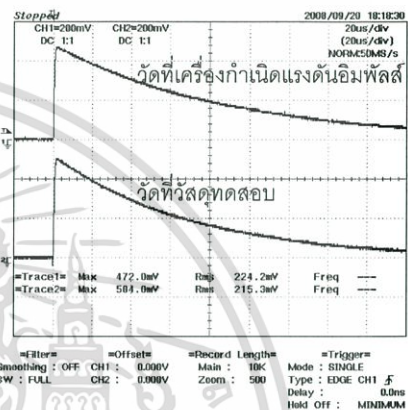
จากการจำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และจากวงจรที่ประกอบสร้างพบว่ามีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีคุณสมบัติดังนี้

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ตรวจวัดในการจำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

- ตรวจวัดที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ $V_{peak} = 9.3 \text{ kV } 1.12/55 \text{ } \mu\text{s}$
- ตรวจวัดที่วัสดุทดสอบ $V_{peak} = 9.2 \text{ kV } 1.29/50 \text{ } \mu\text{s}$

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ตรวจวัดในวงจรที่ประกอบสร้าง

- ตรวจวัดที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ $V_{peak} = 10 \text{ kV } 1.3/59 \text{ } \mu\text{s}$
- ตรวจวัดที่วัสดุทดสอบ $V_{peak} = 9.3 \text{ kV } 1.29/51.8 \text{ } \mu\text{s}$



ผลจากการจำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

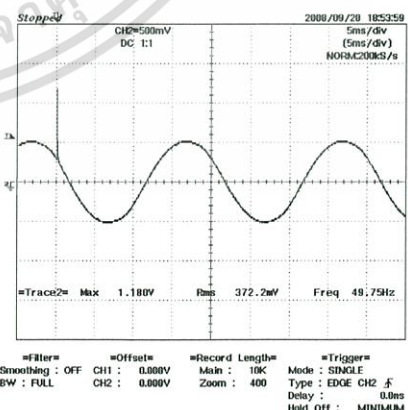
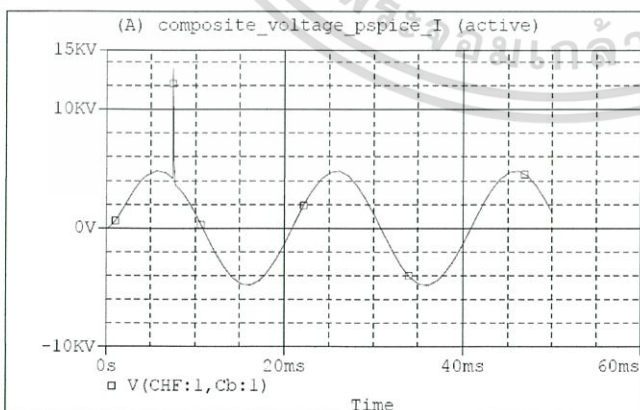
ผลจากวงจรที่ประกอบสร้าง

รูปที่ 6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ตรวจวัดได้ที่วัสดุทดสอบ

การตรวจวัดแรงดันรูปคลื่นผสมที่วัสดุทดสอบ

การตรวจวัดแรงดันนี้เป็นการตรวจสอบว่าวงจรที่ประกอบสร้างมีคุณสมบัติในการสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกทับซ้อนโดยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานที่วัสดุทดสอบได้หรือไม่

ผลจากการจำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และวงจรที่ประกอบสร้างต่างให้ผลไปในทางเดียวกันคือสามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมบนวัสดุทดสอบได้

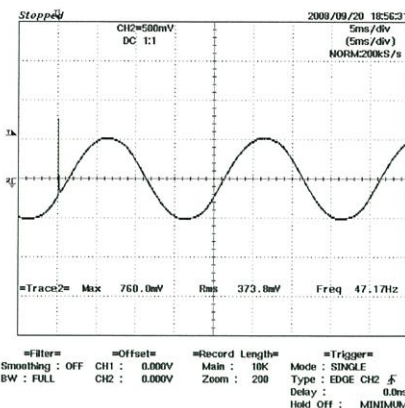
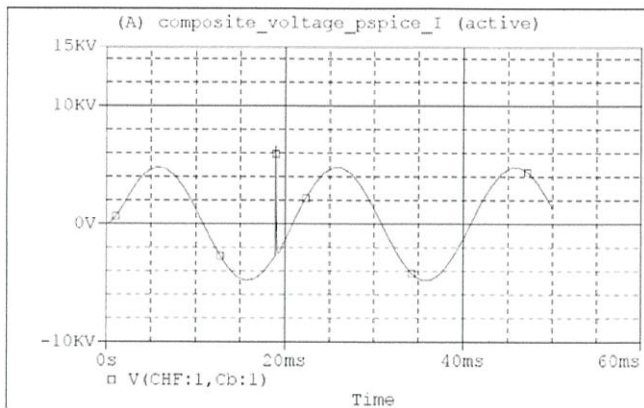


ผลจากการจำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลจากวงจรที่ประกอบสร้าง

รูปที่ 7 แรงดันรูปคลื่นผสมที่ตรวจวัดได้ที่วัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผลจากการจำลองวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลจากวงจรที่ประกอบสร้าง

รูปที่ 7 (ต่อ) แรงดันรูปคลื่นผสมที่ตรวจวัดได้ที่วัสดุทดสอบ

สรุป

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่าวงจรองความถี่สูงผ่านสามารถป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและวงจรองความถี่สูงผ่านสามารถป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ดี และสามารถสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกทับซ้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานสำหรับทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ และเมื่อเปรียบเทียบผลจากวงจรที่ประกอบสร้างกับผลจากการจำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า ผลทดสอบที่ได้ต่างให้ผลไปในทางเดียวกัน

แนวทางในการพัฒนางจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมอาจดำเนินการประกอบสร้างวงจรเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อให้สามารถทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีมูฟเฟสต่าง ๆ ได้ สำหรับทำการศึกษาถึงผลกระทบของมูฟเฟสทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีต่อสภาพความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

C.F.Huang, N.L.Allen and D.A.Greaves. (1999) . High voltage circuits for application of composite voltages to test gaps . *IEE Proc.Sci.Meas.Technol.*, Vol.146, No.2, 64-69.

ภูษิต บุญโท, นรเศรษฐ พัฒนเดช, พิรุฒติ ยุทธโกวิท, มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์. การศึกษาการจำลองวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรม PSpice เปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรม Matlab และ Electronics Workbench. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยบูรพา, หน้า P-055, 2551

Dieter Kind, Kurt Feser. (1988) . High-Voltage Test Techniques. 2nd Revised and Enlarged Edition . Newnes. , p.45.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรีภูษิต บุญโท
วัน เดือน ปีเกิด	14 กุมภาพันธ์ 2526
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 15 หมู่ที่ 7 ตำบลกึ่งตะเภา อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 53000
ประวัติการศึกษา	2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2552 สาธารณสุขศาสตรบัณฑิต เอกอาชีวอนามัยและความปลอดภัย สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) งานบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้า 2) งานก่อสร้างระบบเคเบิลใต้ดิน 22 kV 3) งานก่อสร้างสถานีไฟฟ้า 115/22 kV
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2545-2549	ตำแหน่งพนักงานช่างระดับ 2 กองโรงเรียนช่าง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกรระดับ 4 กองบริการวิศวกรรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้