

การวิเคราะห์รูปคลื่นสำหรับปรับค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดัน
อิมพัลส์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์

ANALYSIS AND ADJUSTMENT OF IMPULSE VOLTAGE GENERATOR
COMPONENTS USING COMPUTER PROGRAMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-020-016

**การวิเคราะห์รูปคลื่นสำหรับปรับค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดัน
อิมพัลส์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์**

**ANALYSIS AND ADJUSTMENT OF IMPULSE VOLTAGE GENERATOR
COMPONENTS USING COMPUTER PROGRAMS**



พานุพงศ์ พินกฤษ
PANUPONG PINGISH

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**79842**
วัน,เดือน,ปี.....**1.8** **ส.ย.** **2551**

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

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา พ.ศ. 2551 ไปใช้หรือแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2008-EN-M-020-016

**ANALYSIS AND ADJUSTMENT OF IMPULSE VOLTAGE GENERATOR
COMPONENTS USING COMPUTER PROGRAMS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2008

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2008-EN-M-020-016



เอกสารนี้ **COPYRIGHT 2008** ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการ **SCHOOL OF GRADUATE STUDIES** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์รูปคลื่นสำหรับปรับค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดัน
อิมพัลส์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

Analysis and Adjustment of Impulse Voltage Generator Components
Using Computer Programs

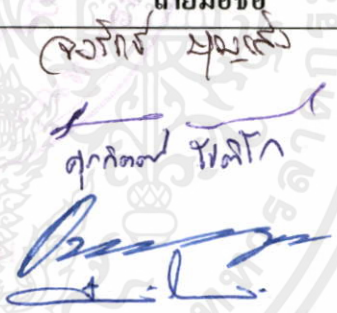
นักศึกษา นายภานุพงศ์ พินกฤษ

รหัสประจำตัว 46060316

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.จรงักษ์	บุญเสียง	
รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
ดร.ศุภกิตติ์	โชติโก	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.ศิริวัฒน์	โทธิเวชกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 19 ธันวาคม 2550 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.รวีวรรณ ชินะตระกูล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา
รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา
วันที่.....13.....เดือน.....ธันวาคม.....พ.ศ.....2551.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์รูปคลื่นสำหรับปรับค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์
นักศึกษา	นายภาณุพงศ์ พินฤช
รหัสประจำตัว	46060316
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล

บทคัดย่อ

การทดสอบแรงดันอิมพัลส์เป็นหัวข้อสำคัญในการศึกษาด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง โดยเป็นการทดสอบสภาพความคงทนของฉนวนในอุปกรณ์ทดสอบ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นอกจากตัวอุปกรณ์ทดสอบแล้วยังมีผลจากค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ประโยชน์ด้านการวัดและวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สำหรับการทดสอบด้านไฟฟ้าแรงสูง โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [10] ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้มีอยู่ 2 โปรแกรมด้วยกัน คือ OrCAD V.9.0 และ LabVIEW V.7.1 กล่าวคือใช้โปรแกรม OrCAD ในการจำลองสร้างแบบตัวอย่างของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับศึกษาและเปรียบเทียบผลขององค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ส่วนโปรแกรม LabVIEW จะนำมาใช้ในการแสดงผลรูปคลื่นและวิเคราะห์ช่วงเวลาของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการตรวจวัด โดยโปรแกรม LabVIEW จะทำการคำนวณหาค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่เหมาะสมเพื่อปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ให้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด โดยตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้กับโปรแกรม OrCAD ก่อนดำเนินการสร้างค่าองค์ประกอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	ANALYSIS AND ADJUSTMENT OF IMPULSE VOLTAGE GENERATOR COMPONENTS USING COMPUTER PROGRAMS
Student	Mr.Panupong Pingish
Student ID.	46060316
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

The impulse voltage testing is an important topic in high voltage engineering in order to test the insulation of test objects. The impulse voltage waveforms can be effected by the test object as well as components in the impulse generator. This research presents the application of a computer program on measurements and analysis of impulse voltage waveforms for high voltage testing. The waveforms are according to the IEC standard 60060-1. The computer program is developed on the basis of OrCAD V.9.0 and LabVIEW V.7.1. The OrCAD program is used in simulations of the impulse voltage generator to study and investigate the component influenced in the impulse voltage waveforms. The LabVIEW is used to monitor of waveforms and analyze the interval time of impulse voltage waveforms that measuring. The LabVIEW can be able to calculate the proper values of the components in the impulse generator so that the standard impulse voltage wave shape can be attained. The parameter can be investigated by OrCAD before components are made.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่มีประโยชน์ยิ่งกับการดำเนินการวิจัย อีกทั้งยังให้โอกาสและความห่วงใยด้วยดีเสมอมาผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านและขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ไชยพร หล่อทองคำและอาจารย์พิรุณ คุทร โกวิท ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือเป็นอย่างสูงเกี่ยวกับการศึกษาวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ น้อง ทั้งที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ในความช่วยเหลือต่างๆ กำลังใจ และความเสียสละ ที่มีให้แก่ผู้วิจัย ซึ่งผู้วิจัยจดจำได้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ พี่สาว ที่ให้โอกาสและสนับสนุนเสมอมา ซึ่งคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ภานุพงศ์ พินกฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 การทดสอบแรงดันอิมพัลส์.....	9
2.3 หลักการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	12
2.3.1 แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง.....	12
2.3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	13
2.3.3 ภาควัดแรงดันอิมพัลส์.....	16
2.3.4 วัสดุทดสอบ.....	16
2.4 การวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	17
2.4.1 สายตัวนำแรงสูง.....	18
2.4.2 ตัวแบ่งแรงดัน.....	18
2.4.3 เคเบิลวัดสัญญาณ.....	21
2.4.4 ออสซิลโลสโคป.....	21
2.5 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	23
2.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและขอแจ้งให้เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	29
3.1 บทนำ.....	29
3.2 โปรแกรมการจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	29
3.3 การจำลองปรับค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	33
3.4 สรุปผลการจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	39
3.5 การวิเคราะห์ผลการจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	39
บทที่ 4 โปรแกรมการทดสอบแรงดันอิมพัลส์.....	41
4.1 บทนำ.....	40
4.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ.....	40
4.2.1 Front Panel.....	41
4.2.2 Block diagram.....	41
4.2.3 Icon และ Connector.....	42
4.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทดสอบแรงดันอิมพัลส์.....	44
4.3.1 การเปิดไฟล์ข้อมูล.....	45
4.3.2 การระบุ Index ของข้อมูลและการจำแนกรูปคลื่น.....	46
4.3.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์.....	49
4.3.4 การคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	50
4.3.5 การบันทึกผลการทดสอบเป็นรูปภาพ.....	51
4.4 การใช้งานโปรแกรมทดสอบแรงดันอิมพัลส์.....	51
4.4.1 การเปิดโปรแกรม.....	52
4.4.2 การป้อนค่าตัวแปรและรายละเอียดของการทดสอบ.....	53
4.4.3 การเปิดไฟล์ข้อมูล.....	53
4.4.4 การ Run โปรแกรม.....	54
4.4.5 การบันทึกและการสั่งพิมพ์.....	54
4.5 การนำโปรแกรมทดสอบแรงดันอิมพัลส์ไปใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์อื่น...	55
4.6 การทดสอบวัดค่าจากโปรแกรม LabVIEW.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	62
5.1 บทนำ.....	62
5.2 ผลการทดสอบการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากโปรแกรม OrCAD..	63
5.3 ขั้นตอนในการใช้งานของโปรแกรม.....	66
5.4 ผลการทดสอบวัดค่าและคำนวณค่าองค์ประกอบจากโปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage.....	67
5.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	73
บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	76
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
6.2 สรุปขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม.....	80
6.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	81
เอกสารอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการจัดทำวิทยานิพนธ์.....	8
2.1 ตารางค่าเวลาคงตัวของรูปคลื่น.....	27
2.2 ตารางค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	28
3.1 ผลเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเดิมกับการจำลองจากโปรแกรม OrCAD เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV.	31
3.2 ผลเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์กับการจำลองจากโปรแกรม OrCAD เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV.	31
3.3 ผลเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเดิมกับการจำลองจากโปรแกรม OrCAD เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV.	33
3.4 ผลการปรับเปลี่ยนรูปคลื่นเมื่อโหลดเป็นความต้านทาน.....	34
3.5 ผลการปรับเปลี่ยนรูปคลื่นเมื่อโหลดเป็นความเหนี่ยวนำ.....	35
3.6 ผลการปรับเปลี่ยนรูปคลื่นเมื่อโหลดเป็นความจุไฟฟ้า.....	35
3.7 การเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นจากการปรับค่า R_f และ R_o	36
3.8 การเปลี่ยนแปลงหางคลื่นจากการปรับค่า R_i	37
4.1 ตารางความคลาดเคลื่อนผลวัดด้วยโปรแกรมของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วบวก...	58
4.2 ตารางความคลาดเคลื่อนผลวัดด้วยโปรแกรมของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วลบ.....	58
4.3 ตารางความคลาดเคลื่อนผลวัดด้วยโปรแกรมของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตซ์ขั้วบวก...	59
4.4 ตารางความคลาดเคลื่อนผลวัดด้วยโปรแกรมของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตซ์ขั้วลบ.....	60
4.5 ตารางความคลาดเคลื่อนผลวัดด้วยโปรแกรมของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด.....	61
5.1 ตารางความคลาดเคลื่อนผลการจำลองแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วบวก.....	64
5.2 ตารางความคลาดเคลื่อนผลการจำลองแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วลบ.....	64
5.3 ตารางความคลาดเคลื่อนผลการจำลองแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตซ์ขั้วบวก.....	65
5.4 ตารางความคลาดเคลื่อนผลการจำลองแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตซ์ขั้วลบ.....	66
5.5 ตารางความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกับ Haefely Test AG.....	70
5.6 ตารางความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการเปลี่ยนค่าองค์ประกอบ.....	73
5.7 ตารางการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วบวก.....	74
5.8 ตารางการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วลบ.....	75
5.9 ตารางการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตซ์ขั้วบวก.....	76
5.10 ตารางการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตซ์ขั้วลบ.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงของเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 รูปคลื่นมาตรฐานแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม.....	10
2.2 รูปคลื่นมาตรฐานแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นคัต.....	11
2.3 รูปคลื่นมาตรฐานแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง.....	11
2.4 วงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์วงจร A	13
2.5 วงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์วงจร B	13
2.6 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 10 ชั้น.....	15
2.7 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2 ชั้น.....	16
2.8 วงจรการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	17
2.9 การวัดแรงดันด้วยโวลต์เตจดีไวเซอร์.....	18
2.10 การต่อระบบวัดโวลต์เตจดีไวเซอร์แบบความต้านทาน.....	20
2.11 การต่อระบบวัดโวลต์เตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ.....	20
2.12 การต่อระบบวัดโวลต์เตจดีไวเซอร์แบบผสม.....	20
2.13 รูปอธิบายอัตราการสุมตัวอย่าง.....	22
2.14 ความแตกต่างของอัตราการสุมตัวอย่าง.....	22
2.15 ความแตกต่างของย่านความถี่ที่วัดได้.....	23
2.16 ลักษณะของข้อมูลที่บันทึกจากออกสซิลโลสโคป.....	24
2.17 ลาปลาซทรานสฟอร์มของวงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์วงจร B	25
2.18 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเทอมของเอ็กซ์โปเนนเชียล 2 เทอม.....	27
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_f และ R_s ต่อ C_b ที่ส่งผลต่อรูปคลื่น.....	28
3.1 วงจรสมมูลจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 200 kV.	30
3.2 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 200 kV. 5 kJ. 2 stage แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มชั่ววอก.....	30
3.3 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 200 kV. 5 kJ. 2 stage แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มชั่ววอก.....	30
3.4 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 200 kV. 5 kJ. 2 stage แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงชั่ววอก.....	31
3.5 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 200 kV. 5 kJ. 2 stage แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงชั่ววอก.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 วงจรสมมูลจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 400 kV.	32
3.7 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 400 kV. 14 kJ. 4 stage แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มชั่ววอก.....	32
3.8 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 400 kV. 14 kJ. 4 stage แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มชั่ววอก.....	32
3.9 ผลจำลองการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงชั่ววอก.....	34
3.10 ผลจำลองลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่แตกต่างกันตามวัสดุทดสอบ.....	34
3.11 ผลจำลองลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการแกว่งบริเวณขดลวด.....	36
3.12 ผลจำลองปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์กรณีหน้าคลื่น ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน.....	36
3.13 ผลจำลองปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์กรณีหางคลื่น ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน.....	37
3.14 ผลจำลองปรับค่าความต้านทานสมมูลกันกรณีเปลี่ยนค่าความต้านทาน.....	38
3.15 ผลจำลองปรับค่าความต้านทานสมมูลกันกรณีเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง.....	38
4.1 ลักษณะของ Front panel.....	41
4.2 ลักษณะของ Block diagram.....	42
4.3 ลักษณะของ Icon และ Connector.....	42
4.4 รูปแบบของ Array 1 มิติ (1D).....	43
4.5 รูปแบบของ Array 2 มิติ (2D).....	43
4.6 รูปแบบของ Array 2 มิติแบบหลาย Waveforms.....	44
4.7 แผนภาพลำดับขั้นตอนการเปิดไฟล์ข้อมูล.....	46
4.8 แผนภาพการระบุค่า Index ต่างๆ.....	47
4.9 แผนภาพการจำแนกรูปคลื่นและคำนวณค่าพารามิเตอร์.....	48
4.10 แผนภาพการคำนวณค่าองค์ประกอบ.....	51
4.11 ลักษณะของหน้าจอ (Front panel).....	52
4.12 ตัวอย่างการเลือกเปิดไฟล์.....	54
4.13 โปรแกรมย่อยสำหรับบันทึกไฟล์.....	55
4.14 โฟลเดอร์ที่ทำการบันทึกไฟล์.....	56
4.15 ภายในโฟลเดอร์ที่บันทึกไฟล์รวมทั้ง Application file	56
4.16 ลักษณะของหน้าจอ (Front panel) ที่ได้บันทึกมาจาก Executable file	57
4.17 ผลการทดสอบรูปคลื่นอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มชั่ววอก.....	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลการทดสอบรูปคลื่นอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วลบ.....	58
4.19 ผลการทดสอบรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์ขั้วบวก.....	59
4.20 ผลการทดสอบรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์ขั้วลบ.....	59
4.21 ผลการทดสอบรูปคลื่นอิมพัลส์รูปคลื่นตัดขั้วบวก.....	60
4.22 ผลการทดสอบรูปคลื่นอิมพัลส์รูปคลื่นตัดขั้วลบ.....	60
5.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์.....	63
5.2 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มขั้วบวกระหว่างผลการวัดจริงและผลการจำลอง.....	63
5.3 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มขั้วลบระหว่างผลการวัดจริงและผลการจำลอง	64
5.4 รูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์ขั้วบวกระหว่างผลการวัดจริงและผลการจำลอง	65
5.5 รูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์ขั้วลบระหว่างผลการวัดจริงและผลการจำลอง.....	65
5.6 ผลการทดสอบเปิดไฟลัรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ (ข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ)	68
5.7 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มขั้วบวกของผลการทดสอบกับชุด Haefely Test AG ...	68
5.8 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มขั้วลบของผลการทดสอบกับชุด Haefely Test AG	69
5.9 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดขั้วบวกของผลการทดสอบกับชุด Haefely Test AG ครั้งที่ 1.....	69
5.10 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดขั้วลบของผลการทดสอบกับชุด Haefely Test AG ครั้งที่ 2.....	69
5.11 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดขั้วลบของผลการทดสอบกับชุด Haefely Test AG ครั้งที่ 3.....	70
5.12 หลักการพันความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ.....	71
5.13 ความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ.....	71
5.14 การต่อความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	71
5.15 ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วบวกกรณีรูปคลื่นไม่เป็นไปตามมาตรฐาน...	72
5.16 ผลการทดสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วบวกเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานทาง คลื่นเป็น 133 Ω ทั้ง 2 ตัว.....	72
5.17 รูปขยายการแสดงผลก่อนและหลังการเปลี่ยนความต้านทานทางคลื่น.....	72
5.18 ผลการจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วบวก ก่อนและหลังการเปลี่ยนค่าความ ต้านทานทางคลื่นเป็น 133 Ω ทั้ง 2 ตัว.....	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19 การเปรียบเทียบ T_1 ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเดิม.....	75
5.20 การเปรียบเทียบ T_2 ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเดิม.....	75
5.21 การเปรียบเทียบ $T_{\text{ร}}$ ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิง.....	76
5.22 การเปรียบเทียบ T_2 ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิง.....	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูง จำเป็นต้องมีระบบส่งจ่ายที่มีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือสูง ส่วนสำคัญที่ทำให้ได้ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ดีคืออุปกรณ์ที่นำมาติดตั้งใช้งานในระบบส่งจ่ายต้องมีคุณภาพที่ดีทั้งทางไฟฟ้าและทางกล กล่าวคือทางด้านไฟฟ้าอุปกรณ์จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะทั้งสาเหตุจากภายในและภายนอกระบบ ส่วนทางด้านกลนั้นอุปกรณ์จะต้องมีความทนทานต่อสภาวะอากาศในทุกรูปแบบ มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน อีกทั้งยังต้องไม่เป็นสาเหตุให้ระบบเกิดความผิดพลาด จากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นจึงนำมาสู่การกำหนดมาตรฐานต่างๆ สำหรับทดสอบอุปกรณ์ที่จะนำมาติดตั้งในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง

การทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงดันสูงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive test)
2. การทดสอบแบบทำลาย (Destructive test)

การทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ผลของอุปกรณ์ทดสอบว่ามีคุณสมบัติตามที่ต้องการหรือไม่ โดยการทดสอบประเภทนี้ยังแบ่งออกเป็นอีก 2 แบบ คือ การทดสอบความทนทาน (Endurance test) ซึ่งเป็นการทดสอบในแง่ของอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ทดสอบโดยการป้อนแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำเท่ากับแรงดันสูงสุดในระบบของอุปกรณ์ ทดสอบเพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และระดับแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิดหรือการเกิดคิสซาร์จบางส่วน ลำดับต่อมาคือการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand voltage test) เป็นการทดสอบสภาพฉนวนของอุปกรณ์ทดสอบเพื่อดูว่าฉนวนสามารถทนต่อแรงดันเกินได้หรือไม่ ซึ่งระดับแรงดันเกินที่ใช้ที่ใช้สำหรับการทดสอบแบบนี้มีวัตถุประสงค์ 2 แบบ คือ ทดสอบความคงทนอยู่ได้ระยะสั้นความถี่ต่ำโดยป้อนระดับแรงดันที่สูงกว่าระดับแรงดันใช้งานของอุปกรณ์ทดสอบเป็นเวลา 1 นาที อีกแบบหนึ่งคือการทดสอบความคงทนอยู่ได้ด้วยแรงดันอิมพัลส์ โดยการป้อนแรงดันอิมพัลส์ไปที่อุปกรณ์ทดสอบเพื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นภายหลังจากอุปกรณ์ได้รับแรงดันอิมพัลส์ ส่วนการทดสอบอีกประเภทหนึ่งคือการทดสอบแบบทำลาย เป็นการทดสอบเพื่อดูการเสียหายของอุปกรณ์ทดสอบเพื่อจะทราบว่าอุปกรณ์นั้นสามารถทนการทดสอบได้สูงสุดมีค่าเท่าใด โดยวิเคราะห์ผลของอุปกรณ์ทดสอบทั้งในส่วนที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ [1]

ด้วยเหตุที่มาตรฐานในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายมาตรฐาน ดังนั้นในทางปฏิบัติการทดสอบใดๆ ควรมีมาตรฐานอ้างอิงสำหรับการดำเนินการตามวิธีการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ เพื่อให้มีเกณฑ์การตัดสินที่ถูกต้อง โดยแต่ละมาตรฐานมักแตกต่างกันในรายละเอียด

เงื่อนไข และวิธีที่ใช้ในการทดสอบ ในทางปฏิบัติมาตรฐานที่เลือกใช้ในการทดสอบมักขึ้นอยู่กับผู้ผลิตอุปกรณ์หรือห้องปฏิบัติการ ซึ่งมาตรฐานอ้างอิงที่นิยมใช้ทั้งในประเทศไทยและในระดับสากล ดังตัวอย่างเช่น IEC (International Electrotechnical Commission), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), ANSI (American National Standard Institute), BS (British Standard), VDE (Verband Deutscher Electrotechniker), JIS (Japanese Industrial Standard) หรือ TIS (Thai Industrial Standard)

จากที่กล่าวมาแล้วทำให้ทราบว่าการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์เป็นหนึ่งในหัวข้อการทดสอบอุปกรณ์ด้านไฟฟ้าแรงสูงก่อนนำไปติดตั้งใช้งานจริงในระบบส่งจ่าย เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เหล่านั้นมีโอกาสจะได้รับแรงดันสูงอิมพัลส์ซึ่งอาจเกิดจากเหตุการณ์ทางธรรมชาติเช่น ฟ้าผ่า หรือเกิดจากการทำงานของสวิตช์ตัดคอนในระบบ โดยแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินเสิร์จทรานเซียนต์จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มักสร้างจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage Generator) โดยอาศัยหลักการของวงจรทรานเซียนต์ RC ในการออกแบบ [2] ซึ่งผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อตัดสินผลการทดสอบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวผ่านการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของกระบวนการวัดและวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการทดสอบ เนื่องจากผลการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์จำเป็นต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานที่มีประสบการณ์ความชำนาญสูงในการวัดและวิเคราะห์ผลการทดสอบ หากผู้ปฏิบัติงานขาดความเข้าใจอย่างลึกซึ้งอาจทำให้การตีความผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไม่ตรงตามมาตรฐานหรือการวิเคราะห์ผลของรูปคลื่นผิดพลาด อีกทั้งวิธีในการแก้ปัญหาในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่สอดคล้องกับมาตรฐานที่กำหนดซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะการใช้การปรับค่าองค์ประกอบภายในของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เนื่องจากในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อรูปคลื่นดังกล่าวมีอยู่ 2 ประการคือ ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุที่ได้รับการทดสอบ และ ผลขององค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของวัสดุที่ทำการทดสอบมีความยากลำบากและเป็นไปได้ยาก ซึ่งวิธีแก้ไขที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหานี้คือการปรับค่าองค์ประกอบภายในของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เป็นไปตามมาตรฐาน หากผู้ปฏิบัติงานขาดทักษะความรู้ ความระมัดระวัง ความรอบรอบ มีความเป็นไปได้อีกสูงว่าผลที่ได้จากการคำนวณหาองค์ประกอบที่เหมาะสมจะมีความผิดพลาด อีกทั้งค่าตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้ในการคำนวณโดยทั่วไปมักเป็นค่าที่ได้จากการประมาณเท่านั้นเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการแก้สมการที่ซับซ้อนทำให้การคำนวณมีความสะดวกขึ้นแต่ก็ทำให้ค่าองค์ประกอบที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนเช่นกัน ดังนั้นวิธีในการลดข้อผิดพลาดซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นคือการนำเอาข้อดีของคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้งานเพื่อทำให้การวัดวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

พัลส์มีความน่าเชื่อถือสูง สะดวกรวดเร็ว ถูกต้อง ทันสมัย [3,4,5,6] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวัดรูปคลื่น วิเคราะห์รูปคลื่น และตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับกรณีรูปคลื่นไม่สอดคล้องตามมาตรฐานที่กำหนด โดยการทำงานทั้งหมดจะกระทำในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้เขียนโปรแกรมขึ้นมาใหม่ โดยเน้นไปในด้านการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาผ่านกระบวนการทางคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบภายในวงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์สำหรับการศึกษาวิจัยและรองรับการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ในภาคอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต โดยการนำเอาระบบคอมพิวเตอร์มาใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์เริ่มจากปี 1990 ได้มีตั้งคณะทำงานระหว่าง IEC และ IEEE เพื่อศึกษาการกำหนดมาตรฐานการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ขึ้น [17] โดยเริ่มมีการนำเสนอการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์โดยใช้เทคนิคของ Curve fitting [18,19] ต่อมาในปี 1996 ได้มีการนำเสนอการควบคุมระบบการทดสอบแรงดันอิมพัลส์เพื่อการปฏิบัติงานทดสอบที่สะดวกขึ้น [20] และได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับมาตรฐานการหาค่าพารามิเตอร์โดยเฉพาะในกรณีที่รูปคลื่นเกิด Oscillations และ Overshoot [21] รวมทั้งการจำลองสร้างโมเดลเกี่ยวกับการวัดแรงดันอิมพัลส์ [22] ในปี 1999 ได้มีการนำเสนอวิธีการใหม่ในการวิเคราะห์และปัญหาเกี่ยวกับการหาค่าพารามิเตอร์เนื่องจากการปรับปรุงมาตรฐานเป็น IEC 60060 [23,24] ต่อมาในปี 2000 ได้มีการนำเสนอโปรแกรมการทดสอบแรงดันอิมพัลส์โดยเปรียบเทียบกับ IEC-TDG (Test Data Generator) [25] หลังจากนั้นต่อมาได้มีการพัฒนาการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ผ่านทางระบบคอมพิวเตอร์อย่างกว้างขวาง [26,27]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องจากการทดสอบแรงดันอิมพัลส์มีความละเอียดและค่อนข้างซับซ้อนในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งการวัดค่าแรงดันอิมพัลส์ในปัจจุบันมักวัดได้จากออสซิลโลสโคปโดยผู้วัดจะต้องปรับ Curser เพื่อตรวจสอบว่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆเป็นเท่าใด ถึงแม้ว่าจะมีการระบุตำแหน่งในการวัดรูปคลื่นตามมาตรฐานแล้วก็ตาม แต่ยังมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องอย่างแท้จริงของการทดสอบแรงดันอิมพัลส์คือทักษะความเข้าใจและความละเอียดของผู้ปฏิบัติงานทดสอบ ซึ่งสิ่งต่างๆเหล่านี้ล้วนเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงอันอาจเป็นสาเหตุให้การวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีความคลาดเคลื่อน อีกทั้งการคำนวณหาค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีความซับซ้อน ยากลำบาก จำเป็นต้องใช้ผู้มีความรู้และประสบการณ์สูงในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบที่เหมาะสม ดังนั้นจากหลักการที่กล่าวมาแล้วข้างต้นหากนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รวมถึงใช้ในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบที่เหมาะสมสำหรับการปรับค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ทำให้

การวัดและวิเคราะห์รูปคลื่นจากการทดสอบแรงดันอิมพัลส์มีความแม่นยำ ถูกต้อง และสะดวกยิ่งขึ้น ลดความผิดพลาดอันอาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ มีความยืดหยุ่นสูง อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความสามารถตามที่ต้องการในอนาคตได้โดยง่ายจากการพัฒนาซอฟต์แวร์ ซึ่งวัตถุประสงค์ในการศึกษาวิจัยมีดังต่อไปนี้

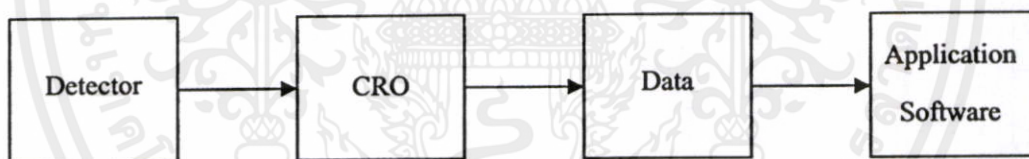
1. พัฒนาศักยภาพของห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อรองรับความสามารถการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ในภาคอุตสาหกรรม
2. สามารถสร้างระบบการวัดแรงดันสูงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การทดสอบอุปกรณ์และสามารถใช้งานได้ง่าย สะดวก ลดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ
3. ได้โปรแกรมที่ช่วยในการแก้ปัญหาในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60060
4. ได้โปรแกรมสำหรับใช้เป็นการเรียนการสอนในวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีความละเอียดอ่อนและไวต่อการถูกรบกวนจากสัญญาณภายนอกซึ่งเป็นปัญหาทำให้ระบบการวัดมีความคลาดเคลื่อนอีกทั้งปัจจัยในการคำนวณค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนทำให้การคำนวณเกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้โดยง่าย ด้วยเหตุที่เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์สมัยใหม่ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว อีกทั้งความก้าวหน้าของออสซิลโลสโคปในปัจจุบันซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งการแสดงผล รูปแบบในการบันทึก รวมถึงการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงก็ได้้นำดิจิตอลออสซิลโลสโคปมาใช้งานในห้องปฏิบัติการอย่างแพร่หลาย กล่าวคือสามารถนำมาใช้ในระบบการวัดและวิเคราะห์สัญญาณทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงเพื่อได้มาซึ่งข้อมูลจริงในการวิจัยหรือทดสอบต่างๆ เช่น การตรวจสอบสัญญาณรบกวน การดิสชาร์จบางส่วน หรือการวัดแรงดันอิมพัลส์ เป็นต้น ดังนั้นหน้าที่หลักของดิจิตอลออสซิลโลสโคปแบบกว้างๆ นอกเหนือจากการใช้ในการแสดงผลแล้วยังมีความสามารถในการเปลี่ยนสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอลเพื่อใช้ในการบันทึกข้อมูล โดยรูปแบบในการบันทึกมักจะบันทึกในลักษณะของรูปภาพเพื่อเก็บไว้อ้างอิงต่อไป แต่สิ่งที่มักถูกมองข้ามจากการใช้งานดิจิตอลออสซิลโลสโคปก็คือความสามารถในการบันทึกเป็นข้อมูลในลักษณะของชุดข้อมูลซึ่งเป็นการเก็บความสามารถที่โดดเด่นอีกอย่างหนึ่งของดิจิตอลออสซิลโลสโคป ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวคิดว่าควรดึงเอาความสามารถของออสซิลโลสโคปในส่วนนี้มาใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์ โดยผ่านทางชุดข้อมูล ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในส่วนนี้ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการแสดงผล

ติดต่อสื่อสาร และวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด สำหรับสาเหตุที่เลือกใช้ โปรแกรม LabVIEW ในการพัฒนาโปรแกรมของวิทยานิพนธ์นี้เนื่องมาจากเป็นโปรแกรมที่ ออกแบบสำหรับระบบวัดโดยตรงทำให้มีความยืดหยุ่นสูง มีฟังก์ชันการใช้งานมาก สะดวกในการ สื่อสารกับอุปกรณ์ต่างๆ อีกทั้งยังเป็น โปรแกรมที่คาดว่าจะเข้ามามีบทบาทสำคัญทั้งใน ภาควิทยาศาสตร์และการศึกษาวิจัยในอนาคต ขณะเดียวกันก็จะใช้โปรแกรม OrCAD ในการ จำลองการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เพื่อหาโมเดลเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใกล้เคียงกับ ความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งโมเดลนี้มีประโยชน์สำหรับการศึกษาองค์ประกอบของเครื่องกำเนิด แรงดันอิมพัลส์และผลของค่าพารามิเตอร์ที่มีต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

โดยรวมแล้ววิทยานิพนธ์นี้ใช้การตรวจจับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบซึ่งในที่นี้คือ โวลต์เดจิติไวเซอร์ แล้วแปลงสัญญาณที่ได้เข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่านซอฟต์แวร์ประยุกต์ที่พัฒนา ตามคุณลักษณะที่กำหนดเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประกอบการศึกษา อ้างอิงการทดสอบ หรือ วิเคราะห์ผลค่าตัวแปรต่างๆ สำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งในที่สุดแล้วจะเป็น การนำเอาฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์มาใช้ร่วมกันกับระบบ Digital recorders ให้สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC 61083-2 [11] โดยนำระบบ Computer-based Measurement มาใช้ในการปฏิบัติงานโดยสามารถ นำไปใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องใดก็ได้



Detector หมายถึงโวลต์เดจิติไวเซอร์ซึ่งนำแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้จากการทดสอบมาใช้งาน
CRO หมายถึงDigital Oscilloscope ที่สามารถบันทึกรูปคลื่นในลักษณะชุดข้อมูลได้
Data หมายถึงข้อมูลที่บันทึกได้จากฮาร์ดแวร์

Application software หมายถึงโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผล รายละเอียดต่างๆ รวมถึง วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ LabVIEW ในการพัฒนาโปรแกรม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารทดสอบแรงดันอิมพัลส์นั้นมีลักษณะของรูปคลื่นที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบอยู่ 3 ประเภท คือ รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (Full lightning impulse) , รูปคลื่นอิมพัลส์สวิตช์ (Switching impulse) และรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าดับ (Chopped lightning impulse) ซึ่งจะอธิบาย

รายละเอียดต่อไป โดยการทดสอบแรงดันอิมพัลส์นี้ประเด็นสำคัญคือต้องการทราบผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลา ซึ่งต้องใช้ตัวแบ่งแรงดันหรือโวลต์เตจดิไวเดอร์ประกอบเข้ากับออสซิลโลสโคปเพื่อแสดงผลของรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบ ดังนั้นปัจจัยสำคัญในการทดสอบคือการเลือกใช้ออสซิลโลสโคปซึ่งต้องมีลักษณะสมบัติพิเศษ เพื่อที่จะสามารถบันทึกแรงดันที่รูปคลื่นไม่ซ้ำเดิม (Single non-repetitive wave) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้นมากๆ เช่นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้เป็นอย่างดี

มาตรฐานสากลของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันอิมพัลส์ ทั้ง IEC 60083 และ IEEE 1122 ได้ระบุในมาตรฐานว่า

$$\text{Sampling rate} > \frac{30}{T_x} \quad (1.1)$$

เมื่อ Sampling rate : อัตราการสุ่มตัวอย่างของอุปกรณ์วัด

T_x : ระยะเวลาที่ใช้ในการวัด = $0.6 T_1$

T_1 : ระยะเวลาหน้าคลื่น

ตัวอย่างเช่นการหาอัตราการสุ่มตัวอย่างของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs ซึ่งในมาตรฐานการทดสอบกำหนดว่า $T_1 \pm 30\%$ ดังนั้นค่ามาตรฐานของ T_1 คือ 0.84 – 1.56 μs ซึ่งค่าของ T_x ที่น้อยที่สุดและอยู่ในมาตรฐานคือ $0.6 \times 0.84 \mu\text{s} = 504 \text{ ns}$ ดังนั้นเมื่อแทนค่าในสมการเพื่อหาค่าอัตราการสุ่มตัวอย่างจะได้

$$\text{Sampling rate} > \frac{30}{504 \text{ ns}} > 60 \text{ MS/s} \quad (1.2)$$

ในทางทฤษฎีของไนควิสต์ (Nyquist Theorem) กล่าวว่า Sampling rate จะต้องมีค่าสูงกว่าความถี่สูงสุดของสัญญาณวัดอย่างน้อย 2.5 เท่า เพื่อความถูกต้องที่ทำให้สัญญาณที่วัดได้ใกล้เคียงกับสัญญาณอินพุตมากที่สุด โดยที่อัตราการสุ่มตัวอย่างของออสซิลโลสโคปหมายถึงจำนวนของจุดที่ดึงสัญญาณออกมาเมื่อเทียบกับเวลา หากอัตราการสุ่มตัวอย่างไม่มากพอจะทำให้ข้อมูลที่ได้รับความผิดพลาด ดังนั้นทางปฏิบัติมักใช้ออสซิลโลสโคปที่มีค่า Sampling rate ที่มากกว่า 150 MS/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารอีกปัจจัยหนึ่งในการเลือกใช้ออสซิลโลสโคปคือย่านความถี่ที่สามารถวัดได้ (Bandwidth) การถ้า

ไม่จำกัดเช่นกรณีของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs พบว่าสเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นมีค่าประมาณ 5 – 10 MHz และการแกว่ง (Oscillation) ของรูปคลื่นแรงดันทรานเซียนต์จะมีความถี่อยู่ระหว่าง 30 kHz

ถึง 100 MHz ดังนั้นย่านความถี่ของอุปกรณ์สำหรับการวัดต้องมีช่วงกว้างมาก โดยทั่วไปย่านความถี่ของอุปกรณ์ในระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ต้องมีย่านความถี่ที่มากกว่า 100 MHz ขึ้นไป

สำหรับโปรแกรมในการวัดและวิเคราะห์การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์สามารถดำเนินการได้ด้วยการใช้ซอฟต์แวร์สร้าง Virtual Instrument ขึ้นในคอมพิวเตอร์เพื่อทำหน้าที่ในการวัดและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ โดยโปรแกรมที่ใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) โดยการเขียนโปรแกรมสำหรับการวัดและวิเคราะห์การทดสอบแรงดันอิมพัลส์นี้แบ่งหน้าที่ในส่วนต่างๆของโปรแกรมโดยเริ่มจากการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นในการทดสอบ การรับข้อมูล การแยกชนิดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ การวัดค่าที่ได้จากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ และการคำนวณองค์ประกอบที่เหมาะสมสำหรับการปรับค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

โดยผู้ใช้งานสามารถทราบผลหรือดำเนินการตามที่โปรแกรมในส่วนการแสดงผลและติดต่อกับผู้ใช้ (User Interface) ซึ่งในที่นี้ใช้ในการแสดงผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์และวิเคราะห์ผลการทดสอบ ทั้งในส่วนของการฟิสิกส์รูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบและค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องตามที่มาตรฐานระบุไว้และ ในกรณีที่รูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐานและต้องการปรับรูปคลื่นให้ได้มาตรฐาน โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับรูปคลื่นการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามามีใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ ทั้งนี้เพื่อลดความผิดพลาดอันอาจเกิดจากการวัดและการคำนวณด้วยวิธีเดิม โดยเริ่มจากการสร้างโมเดลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้น ซึ่งในที่นี้ใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์คือ Impulse Generator ของ Passoni & Villa รุ่น GTU 200 kV.- 5 kJ เพื่อนำโมเดลที่ได้ไปใช้ประกอบการทำงานกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [7] ซึ่งออกแบบสำหรับใช้แสดงผลการวัดค่าต่างๆตามที่ระบุไว้ในมาตรฐานและคำนวณหาองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่สอดคล้องตามมาตรฐานที่กำหนดโดยเลือกการคำนวณตามโมเดลที่ดำเนินการทดสอบ เมื่อได้ค่าองค์ประกอบจากโปรแกรมแล้วจะทำการสร้างองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ตามที่โปรแกรมคำนวณออกมาได้ สำหรับนำไปทดสอบกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จริง เพื่อพิสูจน์ว่าค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่โปรแกรมคำนวณออกมาสามารถทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบได้มาตรฐานหรือไม่

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

การจัดทำวิทยานิพนธ์นี้มีการวางแผนขั้นตอนการดำเนินการเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่สมบูรณ์ ถูกต้องให้มากที่สุด โดยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎีเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และการวัดด้านไฟฟ้าแรงสูง
2. ศึกษาโปรแกรม OrCAD สำหรับจัดทำโมเดลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
3. ทดสอบโมเดลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
4. ศึกษาโปรแกรม LabVIEW สำหรับใช้ในการวัดแรงดันอิมพัลส์และคำนวณค่าองค์ประกอบ
5. ออกแบบการทำงานของโปรแกรม LabVIEW
6. ติดตั้งและทดสอบการใช้งานโปรแกรม LabVIEW
7. แก้ไขข้อบกพร่องและเก็บผลการทดสอบจากการใช้โปรแกรม LabVIEW
8. วิเคราะห์ผลการทดสอบจากการวัดและคำนวณด้วยโปรแกรม LabVIEW
9. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ
10. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการจัดทำวิทยานิพนธ์

เดือน/ปี ลำดับ	ธ.ค. 48	ม.ค. 49	ก.พ. 49	มี.ค. 49	เม.ย. 49	พ.ค. 49	มิ.ย. 49	ก.ค. 49	ส.ค. 49	ก.ย. 49	ต.ค. 49	พ.ย. 49	ธ.ค. 49	ม.ค. 50	ก.พ. 50	มี.ค. 50	เม.ย. 50	พ.ค. 50	มิ.ย. 50	ก.ค. 50	ส.ค. 50	ก.ย. 50
1																						
2																						
3																						
4																						
5																						
6																						
7																						
8																						
9																						
10																						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

อุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูงมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันทรานเซียนต์ขึ้นในขณะใช้งาน ซึ่งแรงดันทรานเซียนต์นั้นหมายถึงขนาดของแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น (ไม่เกิน 5 ms) ผลจากการเกิดแรงดันทรานเซียนต์ขึ้นในระบบไฟฟ้าจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงมากแก่การฉนวนของอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในระบบ ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดความผิดปกติ (Fault) หรือ การเสื่อมสภาพของอุปกรณ์นั้นๆ สำหรับสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้านั้นมีสาเหตุสำคัญอยู่ 2 ประการ คือ สาเหตุแรกเกิดจากฟ้าผ่า เรียกว่าแรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning overvoltage) และอีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ตัดต่อวงจรในระบบไฟฟ้า เรียกว่าแรงดันเกินสวิตช์ (Switching overvoltage) ดังนั้นอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งจะต้องมีความน่าเชื่อถือสูง และไม่เป็สาเหตุทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหาย จึงนำมาสู่การกำหนดมาตรฐานสำหรับทดสอบอุปกรณ์ที่จะนำมาติดตั้งในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อความเชื่อมั่นในการนำไปติดตั้งใช้งานจริงว่าอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถทนได้แม้ว่าจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันเกินในขณะใช้งานก็ตาม

2.2 การทดสอบแรงดันอิมพัลส์

การทดสอบ Basic Impulse Insulation Level (BIL) เป็นการทดสอบความทนอยู่ได้ของการฉนวนของอุปกรณ์ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวเป็นการเลียนแบบหรือจำลองลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเกินฟ้าผ่าหรือแรงดันเกินสวิตช์ที่อาจเกิดขึ้นได้ในการติดตั้งใช้งานอุปกรณ์ เรียกโดยทั่วไปว่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ เพื่อนำไปทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าก่อนที่จะนำไปติดตั้งใช้งาน เนื่องจากลักษณะของรูปคลื่นดังกล่าวมีใช้ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันสูงสุดเท่านั้นแต่ยังขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลาด้วย ดังนั้นเพื่อความสะดวกและเป็นมาตรฐานเดียวกันจึงได้มีการกำหนดคุณลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานขึ้น โดยรูปลักษณะของคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจกำหนดด้วย [12,13]

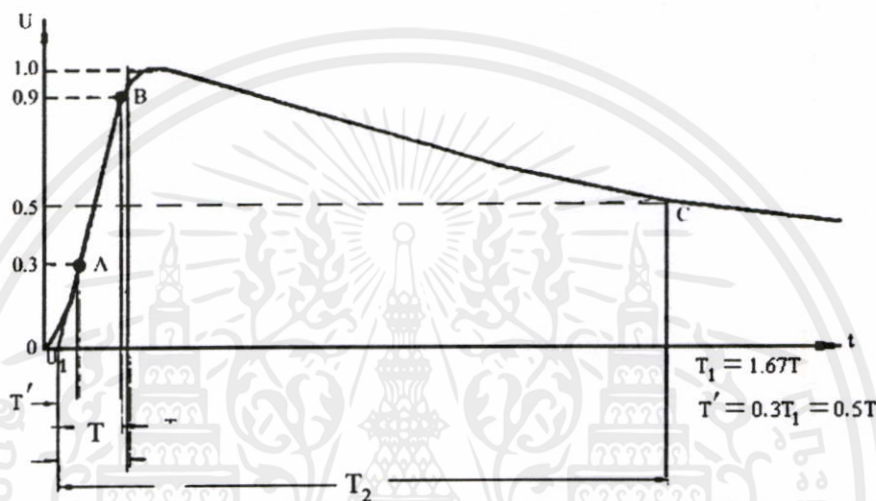
1. ขนาดของแรงดันโดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดันในกรณีที่มีคลื่นระลอกซ้อน ซึ่งเกิดจากออสซิลเลชันในลวด ขอบรูปคลื่นให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
2. ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
3. เวลาช่วงหน้าคลื่น หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เวลาช่วงหลังคลื่น หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด
5. เวลาช่วงคลื่นสับ หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงจุดตัดที่รูปคลื่นลดลงอย่างรวดเร็ว

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน โดยทั่วไปมีรูปแบบของรูปคลื่นที่กำหนดไว้ในมาตรฐานอยู่ 3 รูปแบบ คือ รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (Full lightning impulse), รูปคลื่นอิมพัลส์สวิตชิง (Switching impulse) และรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ (Chopped lightning impulse)



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นมาตรฐานแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม

- จุด A : จุดที่ 30 % ของค่ายอด
 จุด B : จุดที่ 90% ของค่ายอดขาขึ้น
 จุด C : จุดที่ 50% ของค่ายอดขาลง
 จุด O_1 : จุดที่เส้นตรง AB ตัดกับแกน t (จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นอิมพัลส์)
 T_1 : เวลาช่วงหน้าคลื่น (Front time)
 T_2 : เวลาช่วงหางคลื่น (Tail time)

การสร้างแรงดันอิมพัลส์สำหรับทดสอบอุปกรณ์ ในบางกรณีเป็นการยากที่จะปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ให้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากในวงจรทดสอบแต่ละวงจรหรือแต่ละห้องปฏิบัติการจะมีค่าความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ที่แตกต่างกัน ซึ่งมักทำให้เกิดการแกว่ง (Oscillation) หรือเกิดความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นมาตรฐานโดยทั่วไปจึงกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

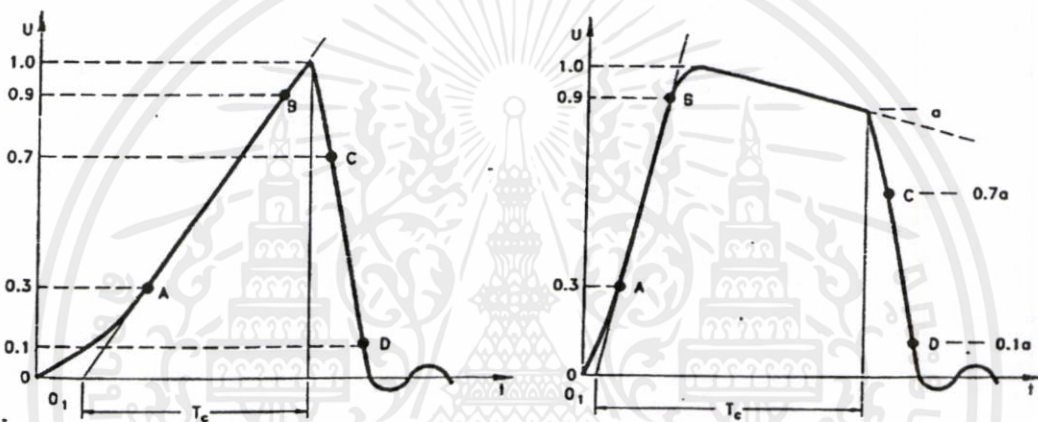
รูปคลื่นมาตรฐานแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60069-1 คือ แรงดันอิมพัลส์ที่ช่วงเวลา T_1/T_2 เป็น $1.2/50 \mu s$ โดยมีความคลาดเคลื่อน ดังนี้

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30\% (0.84 - 1.56 \mu\text{s})$

เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20\% (40 - 60 \mu\text{s})$

ค่ายอดแรงดันทดสอบ $U_m \pm 3\%$

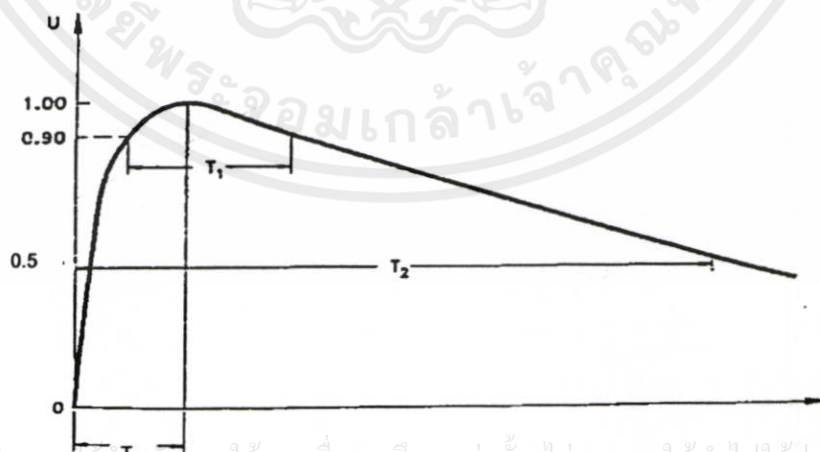
แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดเป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อีกประเภทหนึ่งที่กำหนดไว้ในมาตรฐานต่างๆ โดยรูปคลื่นแบบนี้จะเลียนแบบลักษณะการเกิดคิซาร์จแบบทำลายในระบบไฟฟ้า ซึ่งระดับแรงดันจะตกลงสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว อีกทั้งลักษณะการตกลงสู่ค่าศูนย์นี้อาจเกิดขึ้นในส่วนของหน้าคลื่นหรือส่วนของหางคลื่นก็ได้ ดังรูปที่ 2.2 โดยแรงดันขณะที่ถูกตัด (Voltage at instant of chopped) หมายถึงแรงดันเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในรูปคลื่นนั้น ซึ่งเวลาช่วงคลื่นตัด T_c (Chopped time) คือช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงช่วงคลื่นตัด



ก) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดหน้าคลื่น

ข) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดหางคลื่น

รูปที่ 2.2 รูปคลื่นมาตรฐานแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 รูปคลื่นมาตรฐานแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

กรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งข้อกำหนดจะแตกต่างตามมาตรฐานจะแตกต่างจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มเล็กน้อย กล่าวคือช่วงเวลาหางคลื่น T_2 จะมีนิยามที่เหมือนกันกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม แต่ช่วงเวลานำคลื่นจะกำหนดเป็น T_{cr} ซึ่งหมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มจากศูนย์ไปจนถึงเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด โดยรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งมาตรฐานจะกำหนดด้วย T_{cr}/T_2 เป็น 250/2500 μs โดยมีความคลาดเคลื่อน

$$\text{เวลาช่วงนำคลื่น } T_{cr} = 250 \mu s \pm 20 \% (200 - 300 \mu s)$$

$$\text{เวลาช่วงหางคลื่น } T_2 = 2500 \mu s \pm 60 \% (1000 - 4000 \mu s)$$

2.3 หลักการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

รูปคลื่นมาตรฐานที่ใช้ทำการทดสอบ BIL โดยทั่วไปมักสร้างจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage Generator) ซึ่งอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุภายในวงจรแล้วปล่อยให้คายประจุผ่านวงจรที่ประกอบด้วยความต้านทาน และ ตัวเก็บประจุ เรียกโดยทั่วไปว่า วงจรทรานเซียนต์ RC โดยสามารถปรับค่าองค์ประกอบเพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามที่ต้องการ อีกทั้งในกรณีต้องการแรงดันอิมพัลส์สำหรับการทดสอบสูงๆ สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้โดยการใช้วงจรพื้นฐานมาต่อซ้อนกันหลายๆชั้น ตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ (Marx' multiple circuit , 1924) ซึ่งประโยชน์ที่ได้รับจากการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อนำไปศึกษาวิจัยหรือนำมาทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนมาใช้งานจริง [14] ทั้งนี้ส่วนประกอบในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน คือ แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ภาคการวัดแรงดันอิมพัลส์ และ วัสดุทดสอบ

2.3.1 แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง

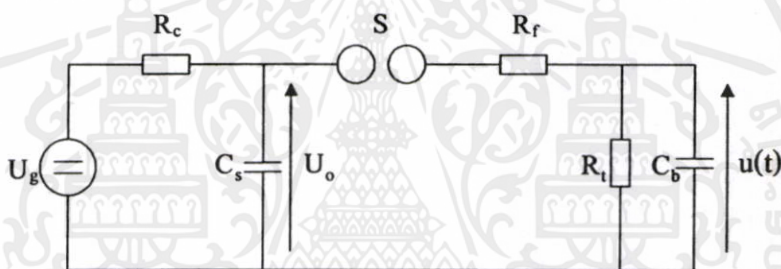
การสร้างแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงในทางปฏิบัติสามารถสร้างได้ 2 วิธี คือ

1. เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic generator) ใช้หลักการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยสนามไฟฟ้าเก็บประจุไฟฟ้าไว้บนพื้นที่ของโลหะที่ขีดยึดไว้กับฉนวน ซึ่งมีหลายวิธี เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิตแบบ Van de Graaff หรือแบบ Trammel เป็นต้น
2. การเปลี่ยนแรงดันกระแสสลับเป็นแรงดันกระแสตรงด้วยการใช้วงจรเรียงกระแส (Rectifier) ซึ่งมีทั้งแบบครึ่งคลื่น (Half wave) และ แบบเต็มคลื่น (Full wave) โดยมีตัวเก็บประจุกรองกระแส (Capacitor filter) เพื่อให้ได้กระแสตรงที่เรียบยิ่งขึ้น แต่

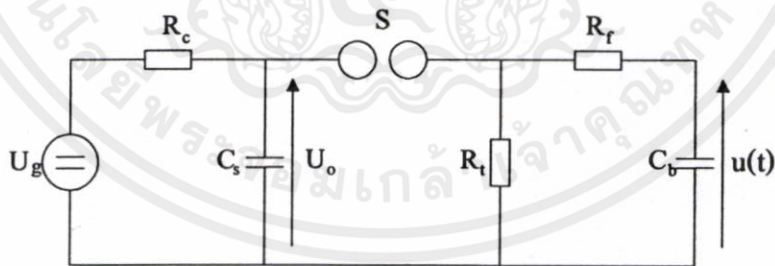
เนื่องจากข้อจำกัดของสารกึ่งตัวนำที่สร้างไดโอดทำให้ได้แรงดันกระแสตรงที่มีระดับแรงดันไม่สูงมาจากวงจรพื้นฐาน ซึ่งสามารถเพิ่มระดับแรงดันกระแสตรงได้โดยการใช้วงจร Voltage doubler circuit , Cascade circuit หรือ Deltatron circuit เป็นต้น

2.3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยทั่วไปมักสร้างจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Generator) โดยการอัดประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุจนกระทั่งได้ค่าแรงดันที่ต้องการ แล้วจึงคายประจุผ่านสปาร์กแกปเพื่อสื่อสารประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าเวลาคงตัวเพื่อให้มีรูปคลื่นตามที่ต้องการได้ ส่วนในกรณีที่ต้องการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขนาดสูงๆอาจสร้างด้วยการนำวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์มาต่อกันหลายชั้นตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่งการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มักสร้างจากวงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ที่พบโดยทั่วไปมีอยู่ 2 วงจร คือ วงจร A และ วงจร B



รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร A



รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B

โดยที่ U_g : แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง U_o : แรงดันอัดประจุกระแสตรง

ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก $U(t)$: แรงดันอิมพัลส์ที่แปรตามเวลา

C_s : ตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์

- C_b : ตัวเก็บประจุซึ่งรวมทั้งโหลดและอุปกรณ์วัดแรงดัน
 R_c : ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
 R_f : ความต้านทานหน่วง สำหรับปรับหน้าคลื่น
 R_t : ความต้านทานคายประจุ สำหรับปรับหางคลื่น
 G : สปรักเกป

การทำงานของวงจรเริ่มจากแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง (U_0) ป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์ (C_s) จนถึงค่าแรงดันอัดประจุ (U_0) โดยเวลาที่ใช้อัดประจุจะขึ้นอยู่กับความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_c) ทั้งนี้ค่าแรงดันอัดประจุจะขึ้นอยู่กับระยะห่างของสปรักเกปเพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้มากน้อยตามต้องการ นอกจากนี้สปรักเกปยังทำหน้าที่คล้ายกับเป็นสวิตช์สำหรับคายประจุให้กับตัวเก็บประจุรวม (C_b) ภายหลังจากเกิดการสปรักที่เกป (G) แรงดันอัดประจุจะตกคร่อมที่ความต้านทานหน่วง (R_f) และตัวเก็บประจุรวม (C_b) ซึ่งช่วงเวลาในการคายประจุหรืออีกนัยหนึ่งคือช่วงเวลาหน้าคลื่นจะขึ้นอยู่กับความต้านทานหน่วงและตัวเก็บประจุรวม สุดท้ายเมื่อตัวเก็บประจุรวมได้รับการถ่ายประจุจากตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์แล้วก็จะปล่อยประจุผ่านความต้านทานคายประจุ (R_t) ลงสู่กราวด์ของระบบซึ่งก็คือช่วงเวลาหางคลื่นนั่นเอง ดังนั้นช่วงเวลาหางคลื่นจึงขึ้นอยู่กับความต้านทานคายประจุและตัวเก็บประจุรวม

สำหรับความแตกต่างของวงจร A และ วงจร B คืออัตราส่วนระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมโหลดกับแรงดันอัดประจุกระแสตรง ซึ่งมีความแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาจากวงจรโดยไม่คิดผลของความเหนี่ยวนำและภายใต้เงื่อนไขที่ว่า $C_s \gg C_b$ รวมทั้ง $R_c \gg R_f$ พบว่าแรงดันอิมพัลส์ที่ตกคร่อม R_t ระหว่างการคายประจุเมื่อคิดในรูปทั่วไป

$$U(t) = U_0 \frac{C_b}{C_s + C_b} \frac{R_f}{R_t} \quad (2.1)$$

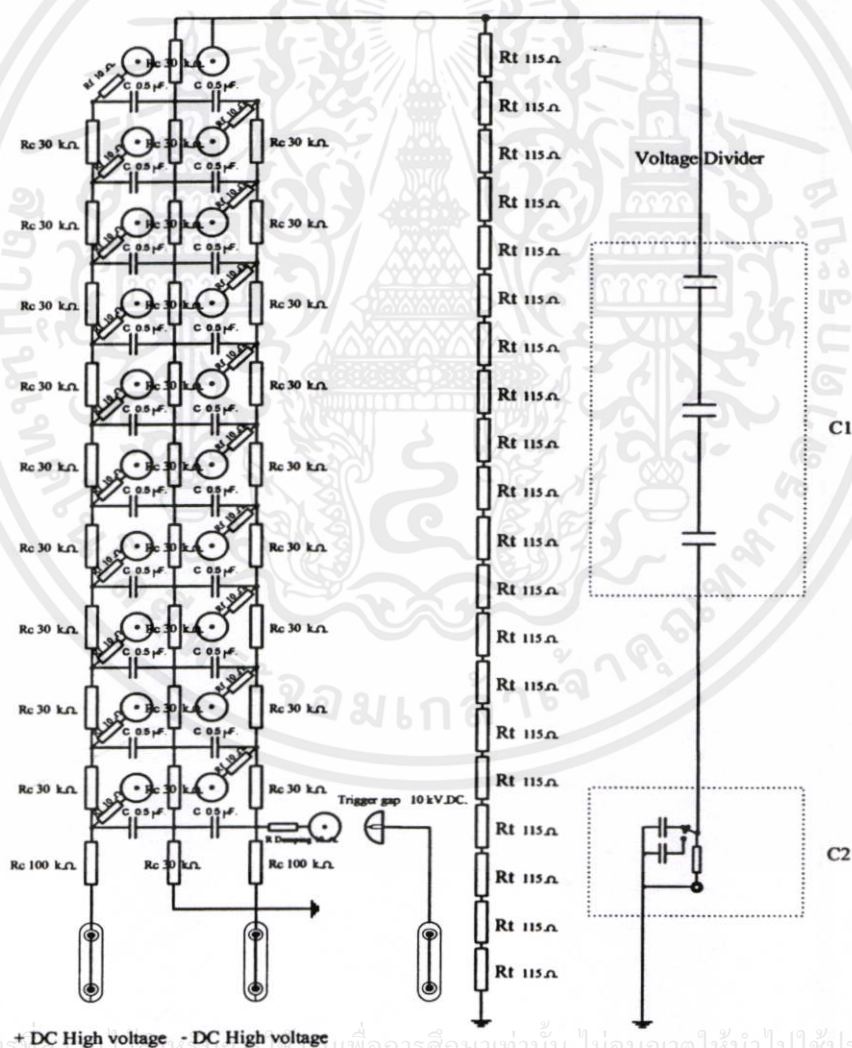
แรงดันอิมพัลส์ที่แปรตามเวลาไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของตัวเก็บประจุเท่านั้นแต่ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความต้านทานด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาโดยประมาณจากวงจรทั้ง 2 วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

วงจร A จะได้ $U(t) = U_0 \frac{C_b}{C_s + C_b} 0.95$ (2.2)

และ วงจร B จะได้
$$U(t) = U_0 \frac{C_b}{C_s + C_b} \quad (2.3)$$

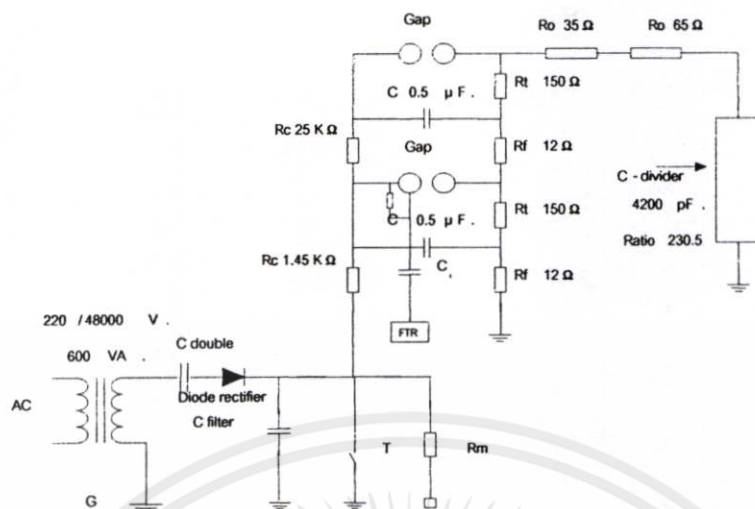
โดยทั่วไปวงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารถออกแบบสร้างระดับแรงดันอิมพัลส์ได้ประมาณ 200 kV ซึ่งระดับแรงดันไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นวิธีที่ใช้ในการสร้างระดับแรงดันอิมพัลส์ให้ได้ระดับแรงดันที่สูงขึ้นคือการนำวงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มาต่อซ้อนกันหลายชั้น โดยใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์หลายๆชุดมาต่อขนานกันเพื่ออัดประจุตามรูปที่ 2.6 เมื่อได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการแล้วตัวเก็บประจุเหล่านั้นคายประจุผ่านสปาร์กแกปซึ่งสามารถปรับระยะได้ ในช่วงเวลานี้ตัวเก็บประจุที่อัดประจุไว้จะต่อกันแบบอนุกรม จึงได้แรงดันเพิ่มเป็นทวีคูณ โดยมีเงื่อนไขว่าต้องปรับตั้งให้สปาร์กแกปชุดล่างมีระยะน้อยกว่าที่สุดเพื่อจะให้เริ่มเกิดสปาร์กก่อนและระยะสปาร์กแกปถัดไปจะเพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดการสปาร์กตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 10 ชั้น



รูปที่ 2.7 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2 ชั้นวงจร B [40]

2.3.3 ภาคการวัดแรงดันอิมพัลส์

การวัดแรงดันสูงอิมพัลส์โดยทั่วไปไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้นการวัดค่าแรงดันอิมพัลส์จึงมีวิธีการวัดค่าที่แตกต่างจากการวัดแรงดันประเภทอื่น ซึ่งวิธีในการวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้โดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธี [15] คือ

1. วัดด้วยช่องว่างทรงกลม (Sphere gap) โดยทั่วไปใช้สำหรับเป็นตัวแทนเปรียบเทียบค่ากับเครื่องวัดชนิดอื่นเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในระบบวัด ซึ่งการวัดใช้การดูผลของการเกิดเบรคดาวนระหว่างทรงกลมว่าเกิดเบรคดาวนหรือไม่ เป็นค่าแรงดันเบรคดาวนสถิติ (Statistic breakdown voltage) โดยค่าที่ได้จะเป็นค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์เท่านั้น
2. วัดด้วยตัวแบ่งแรงดัน (Voltage divider) ตัวแบ่งแรงดันจะทำหน้าที่ในการลดระดับแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด เพื่อป้อนแรงดันระดับต่ำให้แก่เครื่องวัดชนิดต่างๆ ซึ่งตัวแบ่งแรงดันอาจเป็นชนิดความต้านทาน ตัวเก็บประจุ หรือผสมกันทั้งความต้านทานและตัวเก็บประจุ

2.3.4 วัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ซึ่งส่งผลในหลายด้านของการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ โดยการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ระดับแรงดันที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดจริงจะน้อยกว่าระดับแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เนื่องจากประจุไฟฟ้าจะกระจายให้กับตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์และตัวเก็บ

ประจุของโหลดหรือวัสดุทดสอบซึ่งรวมกับอุปกรณ์วัดแรงดันอีกด้วย ดังนั้นอัตราส่วนนี้คือประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (η)

$$\eta = \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (2.4)$$

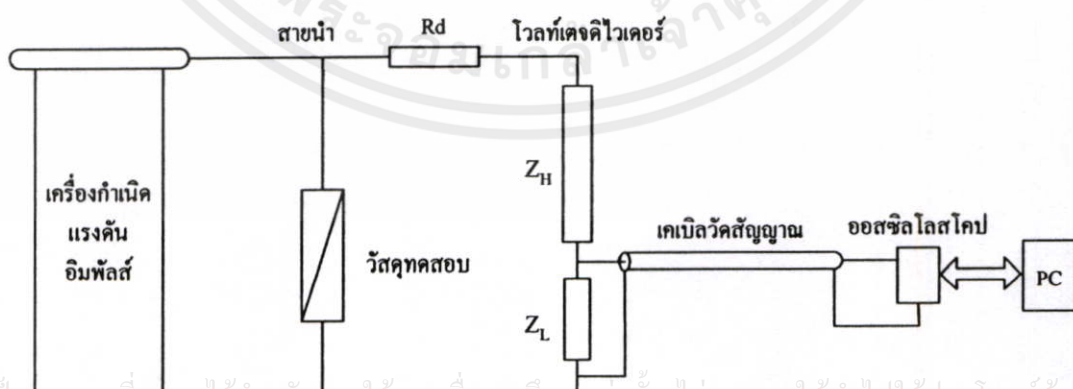
ดังนั้นในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ หากต้องการให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีค่าสูงๆ จะต้องใช้ตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์ (C_s) ให้มีค่ามากกว่าตัวเก็บประจุของโหลดหรือวัสดุทดสอบ (C_b) จากการศึกษาพบว่า C_s ควรจะมากกว่า C_b อย่างน้อย 10 เท่า

อีกทั้งระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์จะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ใช้งานของวัสดุทดสอบ ตามแต่ละมาตรฐาน ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (W_c)

$$W_c = \frac{1}{2} C_s U_o^2 \quad (2.5)$$

2.4 การวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

จากที่กล่าวไปแล้วว่าการวัดแรงดันอิมพัลส์สามารถวัดได้ 2 วิธี คือ วัดด้วยช่องว่างทรงกลม และ วัดด้วยตัวแบ่งแรงดัน เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ใช้การวัดด้วยตัวแบ่งแรงดันดังนั้นจึงขอกล่าวถึงการวัดด้วยวิธีนี้เท่านั้น การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยตัวแบ่งแรงดันประกอบเข้ากับออสซิลโลสโคปจะประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกัน [16] คือ สายตัวนำแรงสูง ตัวแบ่งแรงดัน เทปเบิลวัดสัญญาณ และ ออสซิลโลสโคป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

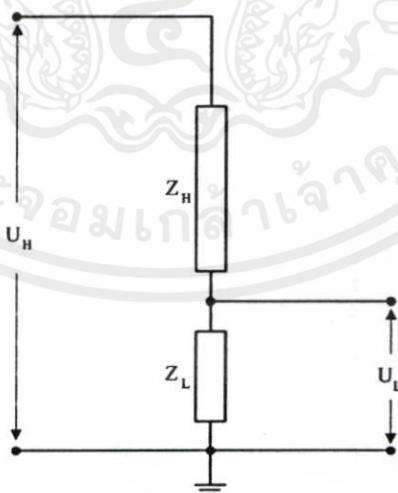
รูปที่ 2.8 วงจรการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

2.4.1 สายตัวนำแรงสูง

สายตัวนำแรงสูงสำหรับการทดสอบแรงดันอิมพัลส์มีปัจจัยที่ควรคำนึงอยู่ 2 อย่าง คือ ความยาวของสายตัวนำจะต้องยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของตัวแบ่งแรงดันเพื่อลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าแต่ต้องไม่ยาวจนเกินไปเนื่องจากจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่สายตัวนำซึ่งผลที่วัดได้จะเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นแรงดันอย่างรวดเร็ว เช่น เกิดเบรคดาวน์ที่วัสดุทดสอบจะทำให้เกิดคลื่นจร (Traveling wave) ขึ้นบนสายตัวนำซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบการทดสอบแรงดันอิมพัลส์โดยบางห้องปฏิบัติการจะมีการต่อความต้านทานหน่วง (Damping resistor ; R_d) อนุกรมกับสายตัวนำ อีกปัจจัยหนึ่งของสายตัวนำแรงสูงคือลักษณะของสาย ซึ่งควรหลีกเลี่ยงการใช้สายที่มีองค์ประกอบของความเหนียวซึ่งทำให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นและต้องมีขนาดที่โตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนาซึ่งจะเป็นคลื่นรบกวนในระบบวัดในทางปฏิบัติทั่วไปมักใช้สายทองแดงแผ่นแบนในการทดสอบ

2.4.2 ตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider)

ตัวแบ่งแรงดันหรือเรียกโดยทั่วไปว่าโวลต์เตจดีไวเซอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดแรงดัน โดยทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงให้เป็นส่วนแรงดันต่ำเพื่อนำมาใช้กับเครื่องมือวัดในระดับแรงดันต่ำได้ ซึ่งตามหลักการคือใช้อิมพีแดนซ์แรงสูงต่อเข้ากับต่อเข้ากับแรงดันที่ต้องการวัดแล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แรงต่ำมาทำการวัดโดยเครื่องมือวัดแรงดันต่ำซึ่งต้องมีอิมพีแดนซ์ทางเข้าที่สูงมากๆ เพื่อให้การวัดมีความเที่ยงตรงที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.9 การวัดแรงดันด้วยโวลต์เตจดีไวเซอร์
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

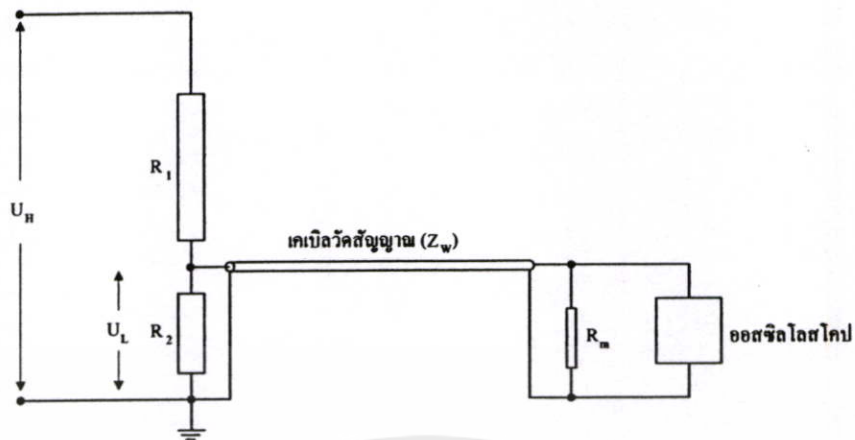
โดยที่ U_H : ระดับแรงดันสูง
 U_L : ระดับแรงดันต่ำ
 Z_H : อิมพีแดนซ์ด้านแรงดันสูง
 Z_L : อิมพีแดนซ์ด้านแรงดันต่ำ

ด้วยเหตุที่โวลต์เตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันโดยการใช้ อิมพีแดนซ์แรงสูงต่อร่วมกับอิมพีแดนซ์แรงต่ำ ดังรูปที่ 2.9 ดังนั้นขนาดแรงดันสูงที่ทำการวัดจริงจึง เป็นสัดส่วนกับขนาดของแรงดันต่ำที่วัดได้กล่าวคือ

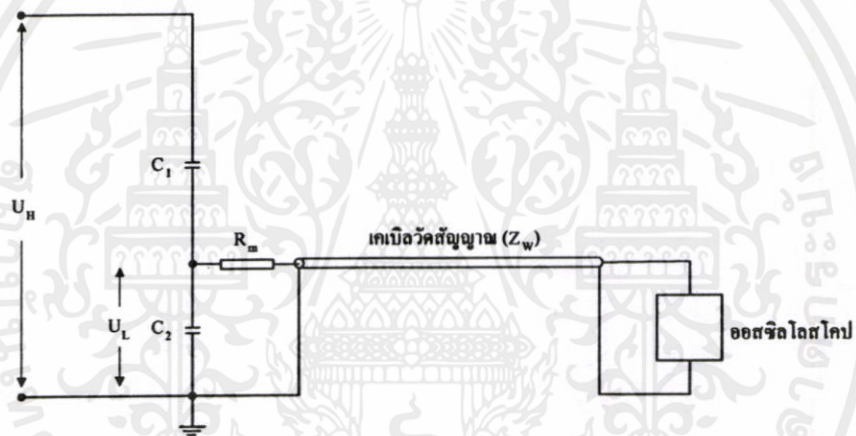
$$U_H = \left(\frac{Z_H + Z_L}{Z_L} \right) U_L \quad (2.6)$$

โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่มีใช้อยู่ทั่วไปสามารถจำแนกประเภทได้จากอิมพีแดนซ์ที่นำมาใช้ สร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์ โดยมีอยู่ 3 แบบด้วยกัน คือ แบบความต้านทาน แบบตัวเก็บประจุ และ แบบผสมหรือแบบตัวเก็บประจุแบบมีความต้านทานหน่วงกระจาย ซึ่งแต่ละแบบมีคุณสมบัติการ คอบสนองการวัดที่แตกต่างกันและในการใช้งานจริงจะมีการแก้ปัญหาการเกิดคลื่นสะท้อนที่ แตกต่างกันไป

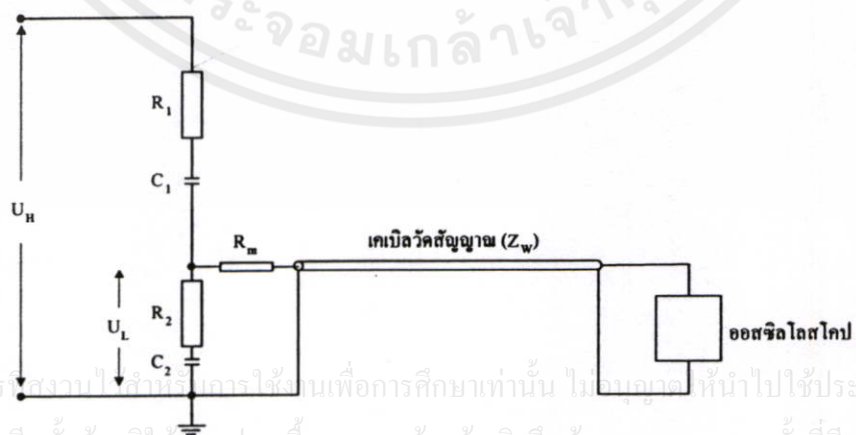
การวัดและการบันทึกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทางด้านภาคแรงต่ำของโวลต์เตจดีไวเดอร์สิ่ง สำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือการเกิดคลื่นสะท้อนระหว่างโวลต์เตจดีไวเดอร์กับออสซิลโลสโคป ซึ่งเป็น เหตุให้การวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เกิดความผิดพลาด เนื่องจากในกรณีการวัดสัญญาณที่มีการ เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น สัญญาณที่วัดได้จากแรงดันอิมพัลส์ เคเบิลวัดสัญญาณจะต้อง พิจารณาคิดสัญญาณเป็นแบบคลื่นจร เมื่อคลื่นจรเข้ามาที่ด้านสายเคเบิลจะมองเห็นเคเบิลเป็นความ ต้านทานบริสุทธิ์เท่ากับค่าเสถียรอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล (Z_w) ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับโหลดที่ปลายสาย เคเบิลว่าเปิดหรือลัดวงจรและมีโหลดอื่นใดต่ออยู่หรือไม่ โดยที่ปลายทางจะไม่มีผลถึงสัญญาณค้น ทางจนกว่าจะถึงเวลาที่ เป็น 2 เท่าของเวลากลับเดินทาง (Transit time) ดังนั้นการวัดแรงดันอิมพัลส์ ด้วยโวลต์เตจดีไวเดอร์ประกอบกับออสซิลโลสโคปนั้นจะส่งสัญญาณที่วัดได้จากโวลต์เตจดีไว เอร์ไปยังออสซิลโลสโคปโดยเคเบิลวัดสัญญาณ เพื่อป้องกันมิให้เกิดปัญหาการเกิดคลื่นสะท้อน จึงต้องใส่ค่าความต้านทานสมคู่กัน (Matching resistor) ระหว่างโวลต์เตจดีไวเดอร์กับ ออสซิลโลสโคปมีค่าเท่ากับค่าเสถียรอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลวัดสัญญาณ โดยโวลต์เตจดีไวเดอร์แต่ ละแบบมีการต่อความต้านทานสมคู่กันที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.10 การต่อระบบวัดโวลต์เตจคิไวเคอร์แบบความต้านทาน



รูปที่ 2.11 การต่อระบบวัดโวลต์เตจคิไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.12 การต่อระบบวัดโวลต์เตจคิไวเคอร์แบบผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติที่สำคัญของโวลต์เตจดีไวเซอร์ที่ทำให้สามารถวัดค่าออกมาได้อย่างถูกต้อง นอกจากสเกลแฟกเตอร์ซึ่งหมายถึงค่าตัวคูณของภาคแรงดันต่ำเพื่อสำหรับคำนวณหาค่าแรงดันสูงที่ป้อนเข้ามาแล้วยังต้องคำนึงถึงย่านความถี่ที่ทำการวัดได้หรือแบนด์วิดท์ และ เวลาตอบสนอง (Response time) โดยทั้ง 2 ค่านี้สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$f_b = \frac{1.46}{R C_e} \quad (2.7)$$

$$T = \frac{R C_e}{6} \quad (2.8)$$

- โดยที่ f_b : แบนด์วิดท์ของโวลต์เตจดีไวเซอร์
 T : เวลาตอบสนองของโวลต์เตจดีไวเซอร์
 R : ความต้านทานของโวลต์เตจดีไวเซอร์
 C_e : ค่าความจุสเตรย์ลงดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงของโวลต์เตจดีไวเซอร์โดยมีค่าประมาณ 10 – 15 pF/m

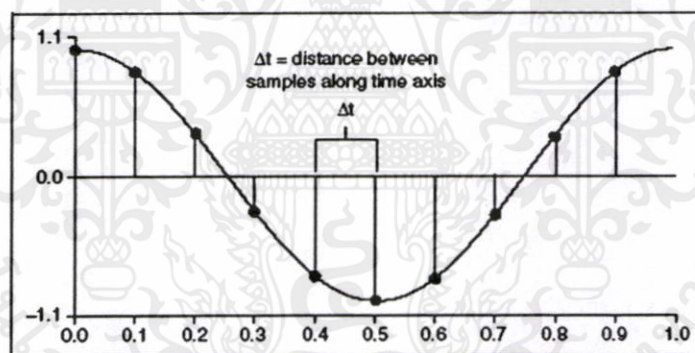
2.4.3 เคเบิลวัดสัญญาณ

สายเคเบิลวัดสัญญาณต้องมีการป้องกันการเกิดคลื่นรบกวนซึ่งเป็นเหตุให้การวัดสัญญาณผิดพลาด โดยทั่วไปเป็นแบบแกนร่วม (Coaxial cable) เพื่อลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และควรต้องมีการชิลด์ 2 ชั้นเพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในชั้นชิลด์ อีกปัจจัยหนึ่งที่ควรคำนึงถึงในส่วนของการวัดสัญญาณคือความยาวของสายเคเบิลซึ่งอาจมีผลต่อการวัดสัญญาณได้ กล่าวคือหากสายเคเบิลมีความยาวมากเกินไปทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่สายเคเบิลทำให้ค่าของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้คลาดเคลื่อน โดยทั่วไปสายเคเบิลวัดสัญญาณที่ใช้วัดสัญญาณควรวาวไม่เกิน 10 เมตร เนื่องจากความยาวสายเคเบิลไม่เกิน 10 เมตรนั้นสามารถละทิ้งผลกระทบจากแรงดันตกคร่อมสายเคเบิลได้

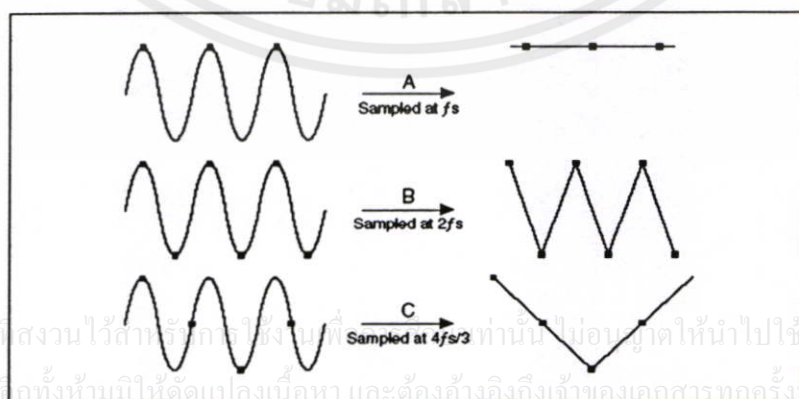
2.4.4 ออสซิลโลสโคป

การทดสอบแรงดันอิมพัลส์นั้นมีลักษณะของรูปคลื่นที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบอยู่ 3 ประเภท คือ รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (Full lightning impulse) รูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์ (Switching impulse) และรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ (Chopped lightning impulse) โดยการทดสอบแรงดันอิมพัลส์นี้ประเด็นสำคัญคือต้องการทราบผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลา ซึ่งต้องใช้ตัวแบ่งแรงดันหรือโวลต์เตจดีไวเซอร์ประกอบเข้ากับออสซิลโลสโคปเพื่อแสดงผลของรูปคลื่นที่ได้

จากการทดสอบ ดังนั้นปัจจัยสำคัญในการทดสอบคือการเลือกใช้ออสซิลโลสโคปซึ่งต้องมีลักษณะสมบัติพิเศษ เพื่อที่จะสามารถบันทึกแรงดันที่รูปคลื่นไม่ซ้ำเดิม (Single non-repetitive wave) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้นมากๆ เช่นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้อย่างถูกต้อง รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เป็นรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วและเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นมาก ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ซึ่งในที่นี้คือออสซิลโลสโคปที่ใช้ในระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ กล่าวคือมีอิมพีแดนซ์ป้อนเข้าสูงเพื่อมิให้เป็นโหลดของวงจรที่เจดดิไวเซอร์ มีการทำงานบันทึกภาพที่รวดเร็วหรือเวลาตอบสนองน้อย พิกัดแรงดันป้อนเข้าสูง อีกทั้งแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการบันทึกเมื่อวิเคราะห์ออกมาในรูปของสเปกตรัมพบว่ามีความถี่ที่กว้างมาก ดังนั้นออสซิลโลสโคปจึงต้องมีย่านการวัดหรือแบนด์วิดท์ที่กว้างมากพอที่จะบันทึกรูปคลื่นดังกล่าวได้อย่างถูกต้อง ด้วยเหตุที่เทคโนโลยีการผลิตออสซิลโลสโคปในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วทำให้สามารถนำคุณสมบัติของออสซิลโลสโคปซึ่งเป็น Digital recorders มาใช้ในลักษณะ DAQ มาใช้ร่วมกับกับระบบ Computer-based Measurement มาใช้ในการปฏิบัติงาน ดังนั้นสิ่งสำคัญในการพิจารณาใช้ออสซิลโลสโคปสำหรับการวัดและบันทึกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นั้นมีสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงอยู่ 2 ประการ คือ อัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling rate) และ ย่านความถี่ที่สามารถวัดได้ (Bandwidth)



รูปที่ 2.13 รูปอธิบายอัตราการสุ่มตัวอย่าง

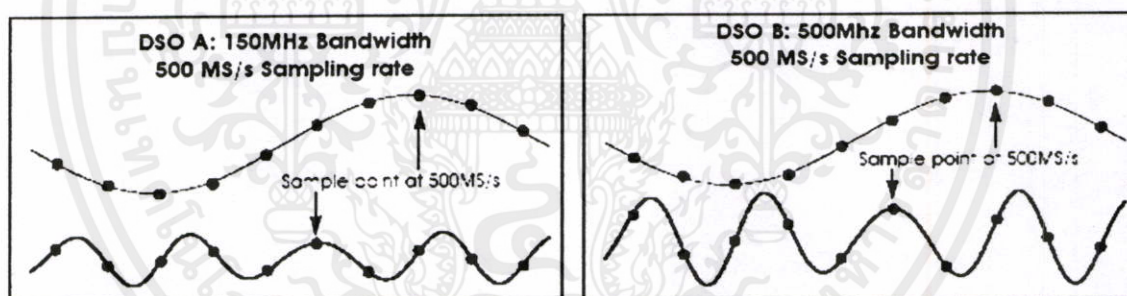


รูปที่ 2.14 ความแตกต่างของอัตราการสุ่มตัวอย่าง

อีกปัจจัยหนึ่งในการเลือกใช้ออสซิลโลสโคปคือย่านความถี่ที่สามารถวัดได้ (Bandwidth) เช่นกรณีของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μ s พบว่าสเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นมีค่าประมาณ 5 – 10 MHz และการแกว่ง (Oscillation) ของรูปคลื่นแรงดันทรานเซียนต์จะมีความถี่อยู่ระหว่าง 30 kHz ถึง 100 MHz ดังนั้นย่านความถี่ของอุปกรณ์สำหรับการวัดควรมีช่วงกว้างมาก หากออสซิลโลสโคปที่นำมาใช้ในการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีย่านความถี่ที่ไม่สูงพอจะทำให้ความถี่และขนาดของสัญญาณที่ทำการวัดสูญหายคือไม่สามารถจับสัญญาณได้หรือถ้าจับสัญญาณได้สัญญาณดังกล่าวก็มีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณจริง ดังนั้นสามารถคำนวณหาแบนด์วิดท์ (BW) ได้จากสมการ

$$BW = \frac{\text{sampling rate}}{2.5} \quad (2.9)$$

ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าแม้อัตราการสุ่มตัวอย่างจะเท่ากันแต่แบนด์วิดท์ที่มีความแตกต่างกันจะมีผลทำให้รูปคลื่นผิดเพี้ยนไปกล่าวคือในกรณีความถี่ของรูปคลื่นน้อยจะไม่เห็นผลของความแตกต่างนี้แต่ในความถี่ที่สูงจะพบว่ารูปคลื่นที่ได้มีความคลาดเคลื่อนกัน อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปย่านความถี่ของออสซิลโลสโคปในระบบวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ควรมีย่านความถี่ที่มากกว่า 100 MHz ขึ้นไป



รูปที่ 2.15 ความแตกต่างของย่านความถี่ที่วัดได้

2.5 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ข้อมูลที่ได้จากการบันทึกด้วยออสซิลโลสโคปนั้นโดยทั่วไปเป็นข้อมูลในลักษณะรหัส ASCII (American Standard Code for Information Interchange) แบบ 8 bit ส่วนใหญ่จะจัดเก็บมาในลักษณะของ dat file (Data file) หรือ ไฟล์ที่มีนามสกุลจุด dat ซึ่งในการบันทึกแต่ละครั้งนั้นข้อมูลจะถูกสร้างมา 2 ส่วน คือ ส่วนของ Header file และ ส่วนของ Waveform data file โดยในส่วนของ Header file นั้นเป็นส่วนต้นหรือส่วนหัวของการบันทึกจะมีการบ่งบอกรายละเอียดของ

ข้อมูลเกี่ยวกับรุ่นของออสซิลโลสโคป ปริมาณของข้อมูลที่บันทึก จำนวนจุดข้อมูลที่เริ่มการจด
 ผนวน ค่าของอัตราการสุ่มตัวอย่าง วันเวลาที่ทำการบันทึก หรือรายละเอียดอื่นๆ ตามการออกแบบ
 ของออสซิลโลสโคปนั้นๆ เพื่อใช้ในการแสดงรายการสรุปและรายละเอียดของข้อมูลที่ได้นับที่
 และในส่วนของ Waveform data file นั้นจะเป็นจำนวนข้อมูลที่แสดงปริมาณในแต่ละจุดตำแหน่ง
 ของข้อมูลที่ได้อ่านการบันทึกที่รูปคลื่นจากออสซิลโลสโคป หากมองในภาพรวมเมื่อนำจุดในแต่ละ
 ตำแหน่งมาต่อกันก็จะได้เป็นรูปคลื่นเหมือนกับที่แสดงจากออสซิลโลสโคป ซึ่งการคำนวณและ
 การแสดงผลจะใช้ข้อมูลจากส่วนนี้ในการดำเนินการ ด้วยเหตุที่ข้อมูลที่ถูกรับบันทึกจาก
 ออสซิลโลสโคปนั้นจะถูกจัดเรียงไว้ในลักษณะของคอลัมน์เรียงไปจนถึงข้อมูลสุดท้ายเรียกว่า
 EOL (End Of Line) และการบันทึกถูกจัดเก็บในลักษณะของ Text file โดยใช้ Tab ในการจัดแบ่ง
 ข้อมูล ดังนั้นจึงสามารถเปิดดูข้อมูลที่ถูกรับบันทึกได้จากโปรแกรมจำพวก Spreadsheet ทั่วไป เช่น
 Microsoft Excel เป็นต้น

	A	B	C	D	E
1	Model	DL1520			
2	BlockSize	10032			
3	BlockNumber	1			
4	DisplayPointNo.	6			
5	DisplayBlockSize	10020			
6	TriggerPointNo.	1000			
7	Date	"07/05/09"			
8	Time	"23:45:02"			
9	SampleRate	100 MHz			
10	TraceName	"Ch1"			
11	Unit	"V"			
12					
13		-2.00E+00			
14		-2.00E+00			
15		-2.00E+00			
16		0.00E+00			
17		-2.00E+00			
18		0.00E+00			
19		0.00E+00			
20		0.00E+00			
21		0.00E+00			
22		0.00E+00			
23		-2.00E+00			
24		-2.00E+00			
25		0.00E+00			
26		-2.00E+00			
27		-2.00E+00			
28		0.00E+00			
29		-2.00E+00			
30		0.00E+00			
31		0.00E+00			

	A	B	C	D
1	Trigger Time:	22:59:16		
2	Name	CH1		
3	Trace Type	YT		
4	Time of First sample wrt trigger (s)	-5.04E-06		
5	Time per sample (s)	2.00E-08		
6	Units	V		
7	Number of Samples	1000		
8	DATA START			
9		143.984375		
10		-37.890625		
11		83.359375		
12		22.734375		
13		-37.890625		
14		-37.890625		
15		22.734375		
16		22.734375		
17		-37.890625		
18		-98.515625		
19		-98.515625		
20		-37.890625		
21		-37.890625		
22		-37.890625		
23		-37.890625		
24		22.734375		
25		22.734375		
26		-37.890625		
27		22.734375		
28		83.359375		
29		22.734375		
30		83.359375		
31		22.734375		

รูปที่ 2.16 ลักษณะของข้อมูลที่บันทึกจากออสซิลโลสโคป

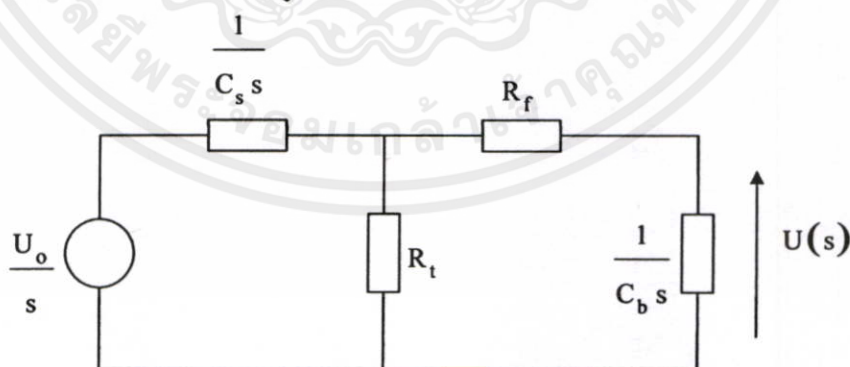
ในส่วนของโปรแกรม LabVIEW ก็เช่นเดียวกับภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมอื่นๆ เช่น
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ภาษา C เป็นต้น กล่าวคือมีการแบ่งประเภทของข้อมูลออกเป็นแบบต่างๆ โดยลักษณะของข้อมูลใน
 โปรแกรม LabVIEW นั้นแบ่งออกเป็น 4 ประเภทด้วยกัน คือ Numeric Boolean Waveform และ
 String ซึ่งประเภทของข้อมูลมีความสำคัญเป็นอย่างสูงในการเขียนโปรแกรมจาก LabVIEW

เนื่องจากฟังก์ชันในการทำงานภายในโปรแกรมมีรูปแบบการรับส่ง Input และ Output ที่แตกต่างกันออกไปเป็นเหตุให้ไม่สามารถนำประเภทของข้อมูลที่แตกต่างกันนำมาต่อใช้กันได้โดยตรง โดยในการนำข้อมูลที่บันทึกจากออสซิลโลสโคปมาดำเนินการในโปรแกรม LabVIEW นั้นใช้ข้อมูลแบบ String ในการนำมาใช้งานในกรณีนี้ ซึ่งปกติโปรแกรม LabVIEW จะสามารถนำข้อมูลแบบ String มาใช้ใน 3 ลักษณะ คือ

- ASCII byte stream คือข้อมูลในลักษณะรหัส ASCII ตามปกติที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น
- Data log files คือข้อมูลในลักษณะของเลข Binary ซึ่งไม่สามารถเปิดดูข้อมูลจากโปรแกรมอื่นนอกจาก LabVIEW ได้ โดยข้อมูลในลักษณะนี้มักนำไปใช้ในการดำเนินการเกี่ยวกับฐานข้อมูลเนื่องจากสามารถจัดเก็บข้อมูลหลายรูปแบบไว้ใน Record (log) เดียวของไฟล์ได้
- Binary byte stream คือข้อมูลในลักษณะรูปภาพ เนื่องจากข้อมูลในลักษณะนี้มีขนาดเล็กและจัดเก็บได้รวดเร็ว ดังนั้นจึงมักใช้ในการดำเนินงานลักษณะของ Real time หรือในกรณีที่ต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลที่มาก

2.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

จากวงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B ดังรูปที่ 2.5 เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_s ด้วยแรงดันอัดประจุ U_0 และเกิดการสปาร์กที่แกป S จะทำให้ C_s ต่อเข้ากับวงจรการสร้างรูปคลื่น ซึ่งในการวิเคราะห์สำหรับปรับรูปคลื่นสามารถวิเคราะห์ได้โดยนำลาปลาซทรานสฟอร์มเข้ามาช่วยในการดำเนินการดังในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลาปลาซทรานสฟอร์มของวงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่าห้ามมิให้คัดลอกและดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่
$$Z_1 = \frac{1}{C_s s} + R_f \quad (2.10)$$

$$Z_2 = \frac{R_t / C_b s}{R_t + 1 / C_b s} \quad (2.11)$$

ดังนั้นแรงดัน $U(s)$ สามารถแสดงได้จากสมการ

$$U(s) = \frac{U_o}{s} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.12)$$

เมื่อนำมาแทนค่าในสมการลาปลาซทรานสฟอร์ม

$$U(s) = \frac{U_o}{k} \frac{1}{s^2 + as + b} \quad (2.13)$$

เมื่อ $a = \left(\frac{1}{R_f C_s} + \frac{1}{R_f C_b} + \frac{1}{R_t C_s} \right)$ (2.14)

$$b = \left(\frac{1}{R_f R_t C_s C_b} \right) \quad (2.15)$$

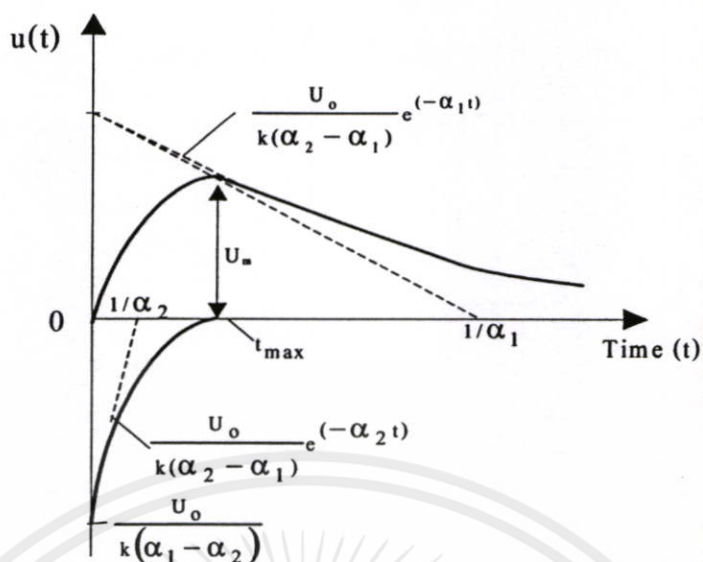
$$k = R_f C_b \quad (2.16)$$

ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เป็นรูปคลื่นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของเวลา ประกอบด้วยเทอมของเอ็กซ์โปเนนเชียล 2 เทอมที่มีค่าคงตัวของเวลา (Time constant) ซึ่งค่าคงตัวของเวลาดังกล่าวนี้นี้จะขึ้นอยู่กับค่าองค์ประกอบภายในวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทำให้สามารถปรับค่าคงตัวของเวลาเพื่อให้รูปคลื่นมีลักษณะตามต้องการ โดยเมื่อนำสมการดังกล่าวมาคิดในรูปสมการทางคณิตศาสตร์จากวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะได้ว่า

$$U(t) = A(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น โดยที่ A = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันอิมพัลส์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α_1 และ α_2 = ค่ารากที่สองของสมการ $s^2 + as + b = 0$ จากสมการ 2.15



รูปที่ 2.18 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเทอมของเอ็กซ์โปเนนเชียล 2 เทอม

สมการของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นั้นจะแปรผันตามเวลาและจะมีค่าคงตัวทางเวลาอยู่ 2 ตัว คือ α_1 และ α_2 ตามนิยามของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานที่กำหนดด้วยช่วงเวลาหน่วงคลื่น (T_1) และเวลาทางคลื่น (T_2) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าเวลาคงตัว $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ โดยค่าเวลาคงตัวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปคลื่นหรืออัตราส่วนระหว่าง T_1/T_2 ซึ่งการหาค่าของ T_1 และ T_2 สามารถหาได้จาก

$$T_1 = \frac{k_2}{\alpha_2} \quad (2.18)$$

$$T_2 = \frac{k_1}{\alpha_1} \quad (2.19)$$

โดยที่ค่า k_1 และ k_2 เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับรูปคลื่น สำหรับรูปคลื่นมาตรฐานค่าคงตัวดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางค่าเวลาคงตัวของรูปคลื่น

T_1/T_2 (μs)	k_1	k_2	$1/\alpha_1$ (μs)	$1/\alpha_2$ (μs)
1.2/5	1.44	1.49	3.47	0.805
1.2/50	0.73	2.96	68.2	0.405
1.2/200	0.70	3.15	286	0.381
250/2500	0.87	2.41	2875	104.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอย่างจงใจ หากฝ่าฝืนจะถือว่าผิดกฎหมายลิขสิทธิ์

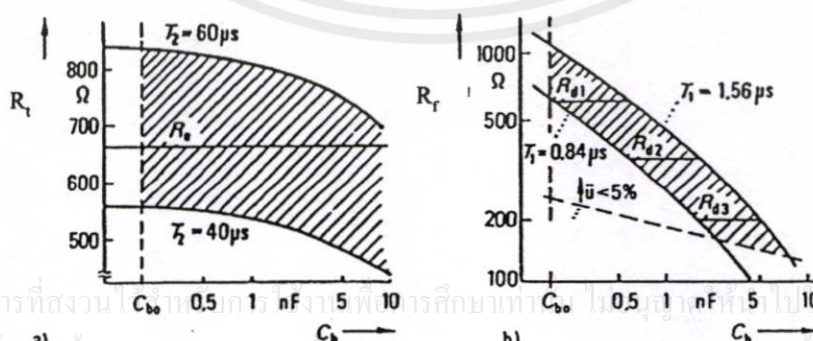
ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ สามารถหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) และเวลาหางคลื่น (T_2) ได้จากตารางที่ 2.2 ทั้งนี้ค่าที่คำนวณได้จะไม่ได้คิดผลของความเหนี่ยวนำซึ่งอาจเกิดขึ้นในวงจร [1,12]

ตารางที่ 2.2 ตารางค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

	วงจร A	วงจร B
T_1	$k_2 \frac{R_f R_t}{(R_f + R_t)} \times \frac{C_s C_b}{(C_s + C_b)}$	$k_2 R_f \frac{C_s C_b}{C_s + C_b}$
T_2	$k_1 (R_f + R_t) \times (C_s + C_b)$	$k_1 R_t (C_s + C_b)$

การคำนวณหาค่าองค์ประกอบภายในของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐานนั้นวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาโดยทั่วไปใช้การคำนวณเพื่อหาค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ใหม่โดยนำค่าเวลาหน้าคลื่น (T_1) และเวลาหางคลื่น (T_2) เข้ามาแทนในสมการดังตารางที่ 2.2 แล้วแก้สมการเพื่อหาค่า R_f สำหรับปรับหน้าคลื่นหรือ R_t สำหรับปรับหางคลื่น

ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ปัญหาที่พบและมีผลต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์คือผลของวัสดุทดสอบที่มีค่าความจุไฟฟ้าที่มากจนเกินไปจนเป็นเหตุให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีช่วงเวลาหน้าคลื่นสูงกว่ามาตรฐานดังนั้นวิธีแก้ไขคือการปรับค่า R_f ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อให้ได้รูปคลื่นตามมาตรฐาน ซึ่งในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มค่า R_t และ R_f ที่เหมาะสมของวงจรเมื่อเปรียบเทียบกับค่า C_b จะต้องอยู่ในพื้นที่แรงดังในรูปที่ 2.19 ส่วนในกรณีของวัสดุทดสอบที่รูปคลื่นไม่เป็นไปตามมาตรฐานจำเป็นต้องมีการแก้ไขค่าองค์ประกอบภายในของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ดังจะได้กล่าวต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_f กับ R_t ต่อ C_b ที่ส่งผลต่อรูปคลื่น

บทที่ 3

การจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

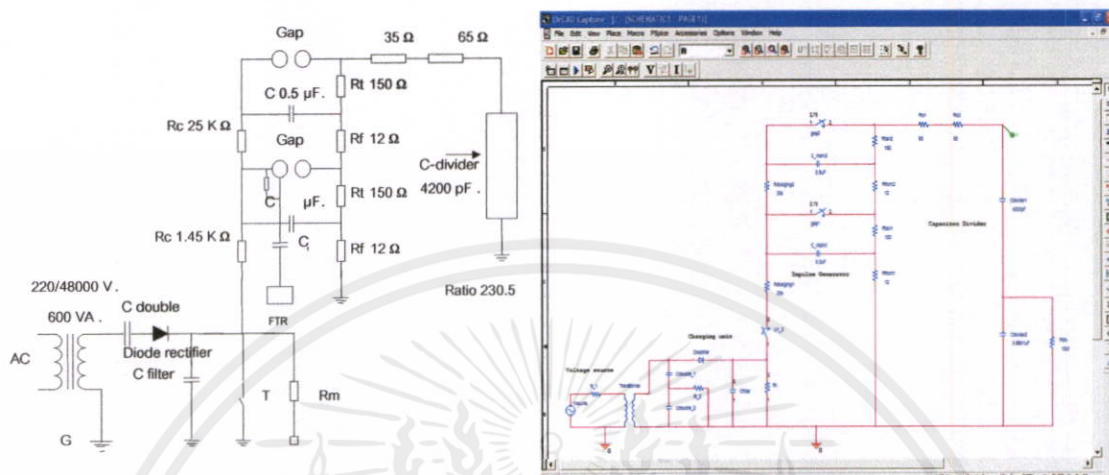
3.1 บทนำ

ในศึกษาด้านวิศวกรรมไฟฟ้า มีการนำแบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่างๆ มาใช้ประกอบการศึกษา การทดลอง รวมถึงการวิเคราะห์ผลของปัจจัยต่างๆ ในการทดลองกันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ส่วนหนึ่งได้จำลองการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรม OrCAD Release 9.0 [39] เพื่อเป็นการตรวจสอบผลการทดลองในเบื้องต้นรวมถึงนำมาประกอบการศึกษาในด้านที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแรงดันอิมพัลส์และหลักการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งได้ดำเนินการจัดทำแบบจำลองจากโปรแกรมดังกล่าวจำนวน 2 ชุด สำหรับตรวจสอบกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2 ชุด คือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ Passoni & Villa 200 kV. 5 kJ. 2 stages และเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ของ Passoni & Villa 400 kV. 14 kJ. 4 stages โดยการเปรียบเทียบผลของตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จริงจากออสซิลโลสโคปกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

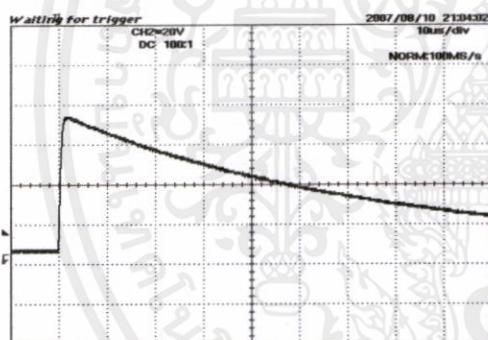
3.2 โปรแกรมการจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

โปรแกรม OrCAD เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมต่างๆ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อศึกษาหลักการของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ รวมทั้งผลขององค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ การปรับค่าองค์ประกอบภายในของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และนำมาตรวจสอบการคำนวณค่าพารามิเตอร์ภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยจำลองการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เพื่อหาโมเดลเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ได้มาจากค่าจริงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ซึ่งระยะสปาร์กแกปแทนด้วยสวิทช์ใช้การกำหนดระยะจากค่าความต้านทานของสวิทช์ในวงจรเพื่อให้การสวิทช์เป็นตามลำดับ โดยไม่คิดผลของค่าเก็บประจุสแต็คส่วนค่า R_{div} จำเป็นต้องใส่ไว้ในภาคแรงดันของคาปาซิเตอร์คิวเคอร์เพื่อมิให้โปรแกรมฟ้อง error เนื่องจากโปรแกรมจะมองเห็นคาปาซิเตอร์ต่อไม่ครบวงจร [32] ดังนั้นเพื่อความถูกต้องได้จัดทำแบบจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จำนวน 2 ชุดด้วยกัน คือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ของ Passoni & Villa 2 stages 200 kV 5 kJ และ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ของ Passoni & Villa 4 stages 400 kV 14 kJ ซึ่งผลที่ได้เป็นตามตารางที่ 3.1 และ 3.2 แบบจำลองนี้สามารถนำไปศึกษาผลของ

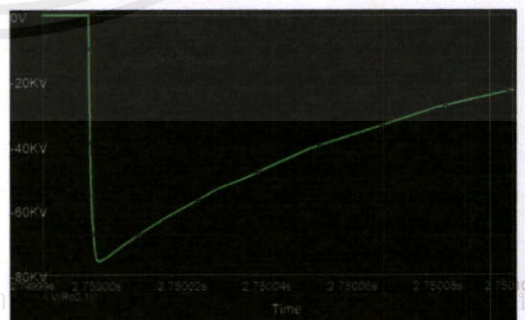
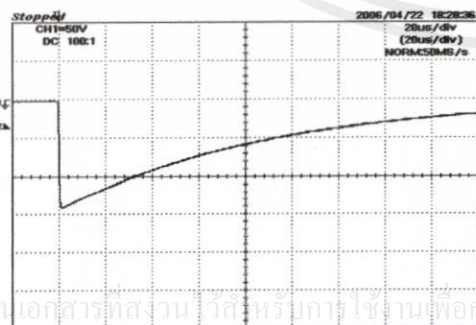
องค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ การต่อความต้านทานสมมูลกัน ผลกระทบจากอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบและยังสามารถเลือกวิเคราะห์ผลในแต่ละส่วนของวงจรที่สนใจก็ได้ เช่น ต้องการที่จะศึกษาการสร้างแรงดันสูงกระแสตรง วงจรกรองกระแส หรือวงจรเรียงกระแส เป็นต้น



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 200 kV. 5 kJ. 2 stages



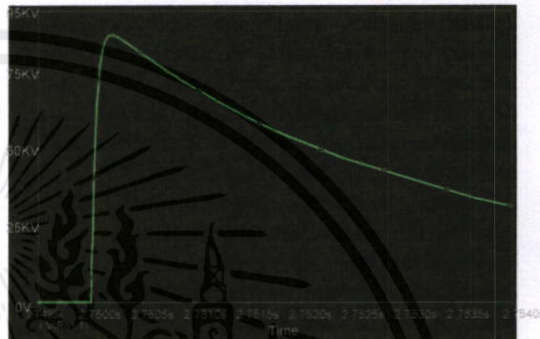
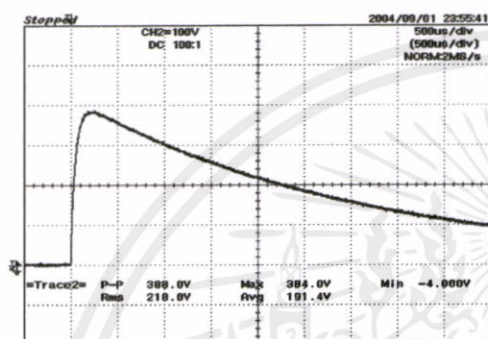
รูปที่ 3.2 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 200 kV. 5 kJ. 2 stages แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก



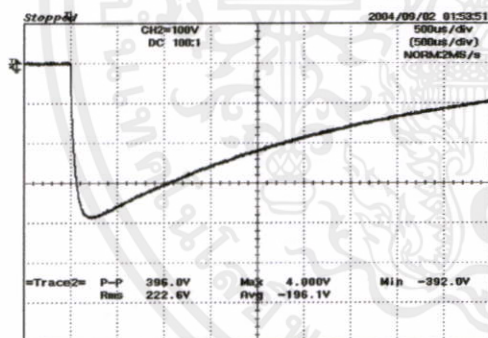
รูปที่ 3.3 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 200 kV. 5 kJ. 2 stages แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ

ตารางที่ 3.1 ผลเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มกับการจำลองจากโปรแกรม OrCAD เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV.

ผลเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์				ผลจากการจำลองด้วย OrCAD			
T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)	$U_{charging}$ (kV)	T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)	$U_{charging}$ (kV)
1.18	57.99	78.37	50	0.93	58.42	84.42	50
1.18	57.99	-70.07	-45	0.92	58.82	-75.94	-44.95



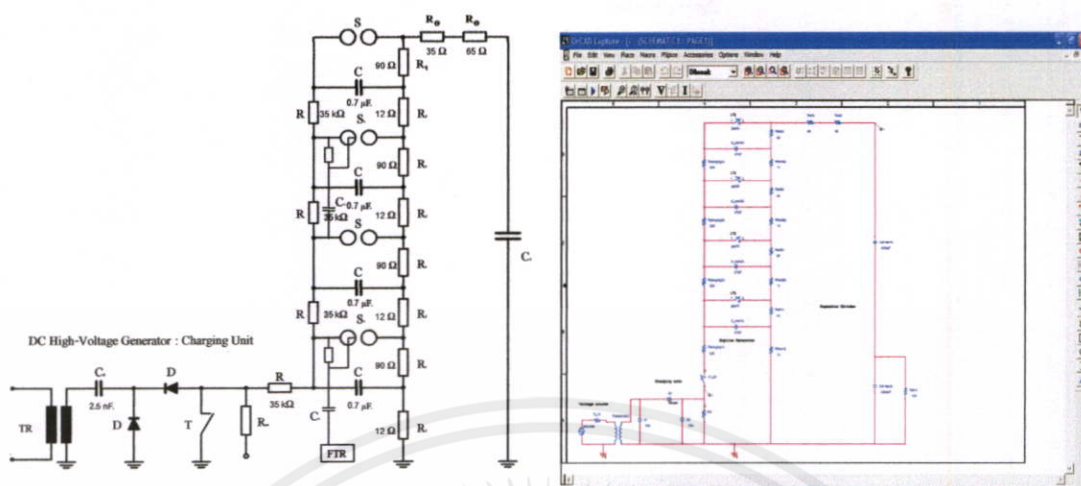
รูปที่ 3.4 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 200 kV, 5 kJ, 2 stages แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง ขั้วบวก



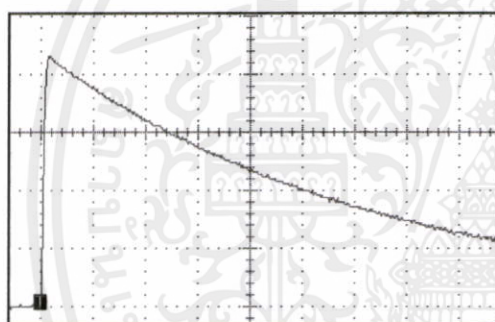
รูปที่ 3.5 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 200 kV, 5 kJ, 2 stages แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง ขั้วลบ

ตารางที่ 3.2 ผลเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งกับการจำลองจากโปรแกรม OrCAD เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV.

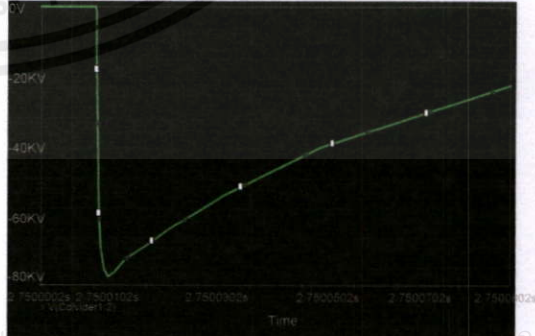
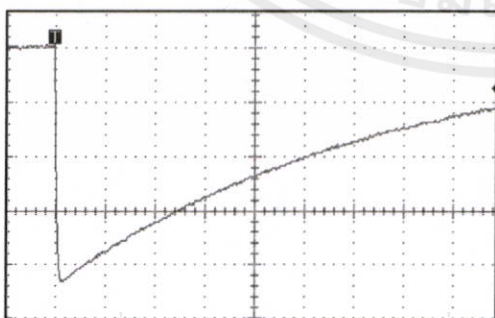
ผลเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์				ผลจากการจำลองด้วย OrCAD			
T_{cr} (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)	$U_{charging}$ (kV)	T_{cr} (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)	$U_{charging}$ (kV)
258.5	2267.5	89.43	60	217.1	2717.0	87.16	58.71
269	2299.0	-91.27	-60	213.9	2673.2	-88.22	-58.71



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 400 kV. 14 kJ. 4 stages



รูปที่ 3.7 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 400 kV. 14 kJ. 4 stages
แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ารูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้เพื่อการค้า

รูปที่ 3.8 ผลรูปคลื่นจริงและการจำลองจาก OrCAD ของ Passoni & Villa 400 kV. 14 kJ. 4 stages

แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ารูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ

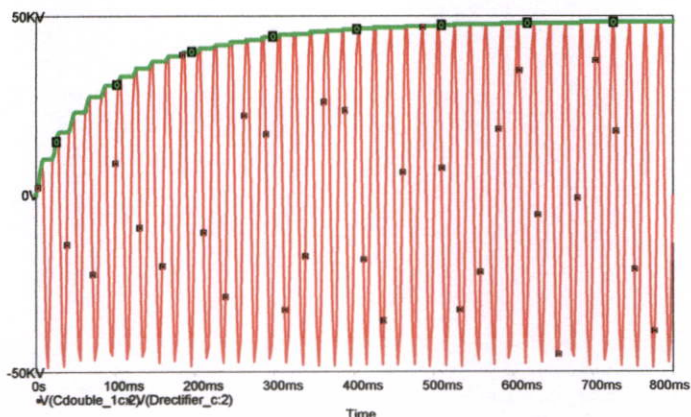
ตารางที่ 3.3 ผลเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเดิมกับการจำลองจากโปรแกรม OrCAD เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV.

ผลเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์				ผลจากการจำลองด้วย OrCAD			
T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)	$U_{charging}$ (kV)	T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)	$U_{charging}$ (kV)
0.97	44.40	80.35	20.5	0.86	45.84	78.02	20.5
1.10	44.60	- 81.46	- 20.5	0.89	46.14	-77.51	-20.5

3.3 การจำลองปรับค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

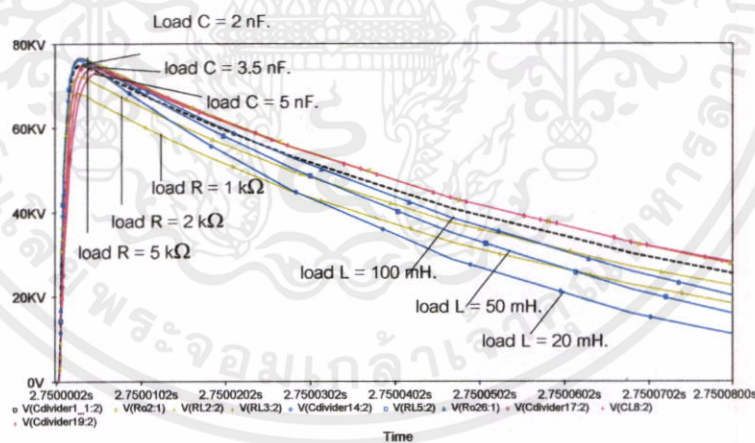
แบบจำลองการสร้างรูปคลื่นอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบเต็มระบบ ด้วยโปรแกรม OrCAD นั้นมีวัตถุประสงค์สำหรับเป็นแนวทางในการศึกษาหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ [28,29] เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่การจำลองเกี่ยวกับแรงดันอิมพัลส์นั้นมักจำลองการทำงานมาใช้เฉพาะส่วนที่สนใจศึกษาเท่านั้นโดยมิได้ครอบคลุมทั้งหมดของการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงจำลองการทำงานจากส่วนต่างๆของการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาทั้งหมด โดยในการจำลองได้กำหนดค่าองค์ประกอบตามเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีอยู่จริง ซึ่งในการปฏิบัติงานจริงมีปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นจึงใช้การจำลองด้วยโปรแกรม OrCAD เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และรูปคลื่นที่สร้างได้ภายใต้สภาวะเงื่อนไขต่างๆ รวมถึงระบบวงจรรูปคลื่นซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความถูกต้องในการทดสอบโดยใช้กรณีสมมุติตัวอย่างขึ้น ผลที่ได้ไม่เพียงแต่จะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับค่าองค์ประกอบภายในของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบไม่สอดคล้องตามมาตรฐานที่กำหนดแล้วยังสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับศึกษาวิจัยการหาค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ รวมทั้งยังสามารถนำไปประกอบการเรียนการสอนทำให้นักศึกษาเข้าใจหลักการของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้โดยง่าย

การสร้างแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง (Charging unit) ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ใช้ในการป้อนแรงดันสูงกระแสตรงให้กับชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งมีหลักการทำงานคือการแปลงแรงดันต่ำกระแสสลับให้เป็นแรงดันสูงกระแสสลับโดยหม้อแปลง (Transformer) และวงจรทวิแรงดัน (Double circuit) จากนั้นจะเข้ามายังชุดเรียงกระแส (Rectifier) และ วงจรกรองกระแส (Filter) เพื่อให้ได้แรงดันสูงกระแสตรง โดยสามารถศึกษาพฤติกรรมของแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงขั้วบวกดังรูปที่ 3.9 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงนี้ใช้ไม่ยาวกว่าระยะเวลาประมาณ 0.75 μ s ในการสร้างแรงดันสูงกระแสตรงสำหรับป้อนให้กับชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ต่อไป



รูปที่ 3.9 ผลจำลองการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงชั่ววอก

เป็นที่ทราบว่าการทดสอบแรงดันอิมพัลส์จริงนั้นปัจจัยที่ต้องคำนึงคือวัสดุทดสอบ (Test object) ซึ่งส่งผลต่อลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่แตกต่างกันไปดังรูปที่ 3.10 โดยคุณสมบัติของวัสดุทดสอบมีความแตกต่างกันตามลักษณะขององค์ประกอบที่สร้างขึ้นมา แต่ทั่วไปแยกออกได้เป็น 3 ลักษณะด้วยกันคือ ความต้านทาน (ตารางที่ 3.4) ความจุไฟฟ้า (ตารางที่ 3.5) หรือ ความเหนี่ยวนำ (ตารางที่ 3.6) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ค่าองค์ประกอบเหล่านั้นมีค่ามากกว่าที่เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ได้ออกแบบมา



รูปที่ 3.10 ผลจำลองลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่แตกต่างกันตามวัสดุทดสอบ

ตารางที่ 3.4 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นเมื่อโหลดเป็นความต้านทาน

Load Resistance	T_1 (μ s.)	T_2 (μ s.)	U_{peak} (kV.)
1 k Ω	1.39	44.73	68.42
2 k Ω	1.47	49.55	72.39
5 k Ω	1.53	56.69	76.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นเมื่อโหลดเป็นความเหนี่ยวนำ

Load Inductance	T_1 (μ s.)	T_2 (μ s.)	U_{peak} (kV.)
20 mH.	1.53	36.25	76.20
50 mH.	1.53	43.03	76.57
100 mH.	1.53	47.41	76.71

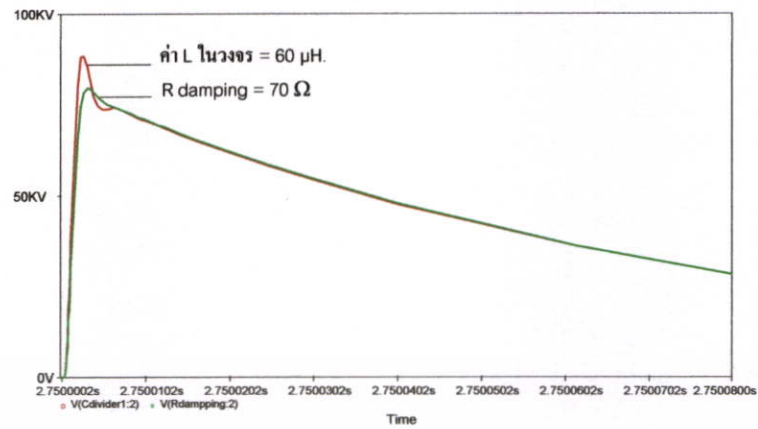
ตารางที่ 3.6 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นเมื่อโหลดเป็นความจุไฟฟ้า

Load Capacitance	T_1 (μ s.)	T_2 (μ s.)	U_{peak} (kV.)
2 nF.	2.12	58.30	75.31
3.5 nF.	2.56	59.46	74.24
5 nF.	2.99	60.44	73.26

ในบางกรณีการใช้งานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เป็นระยะเวลานานหรือการใช้สายตัวนำที่ไม่เหมาะสมอาจเป็นเหตุให้ภายในวงจรมีผลของค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งผลที่ได้อาจแตกต่างไปจากทฤษฎีโดยจะมีผลอย่างมากในกรณีของค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและบริเวณยอดคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นเมื่อภายในวงจรมีค่าความเหนี่ยวนำมากเกินไปจะส่งผลทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีลักษณะแกว่ง (Oscillation) ขึ้นที่บริเวณยอดคลื่นเกิดเป็นลักษณะ Over shoot กล่าวคือบริเวณยอดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จะมีลักษณะเป็นยอดแหลมขึ้นไปจากส่วนบนสุดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ดังกล่าวซึ่งในการทดสอบตามมาตรฐานนั้นจะถือว่ารูปคลื่นในลักษณะนี้จะไม่ได้มาตรฐาน สำหรับการจำลองนี้จึงได้กำหนดให้มีตัวเหนี่ยวนำค่ออนุกรมกับความต้านทาน R_0 ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อที่จะจำลองลักษณะที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีผลของความเหนี่ยวนำปะปนอยู่ในวงจรการทดสอบ อย่างไรก็ตามวิธีแก้ไขในตัวอย่างนี้โดยทั่วไปในทางปฏิบัติมักใช้การเพิ่มค่าความต้านทานหน่วง (Damping resistor) ค่อเข้าที่บริเวณปลายด้านแรงดันออกของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ดังผลในรูปที่ 3.11 โดยในตัวอย่างนี้ได้จำลองให้ภายในวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีค่าความเหนี่ยวนำภายในอยู่ 60 μ H เพื่อจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีลักษณะการแกว่งของรูปคลื่นบริเวณยอดคลื่น ซึ่งค่าความต้านทานหน่วงที่ใช้ในตัวอย่างนี้ใช้ความต้านทานหน่วง 70 Ω โดยคำนวณได้จากสมการ [1]

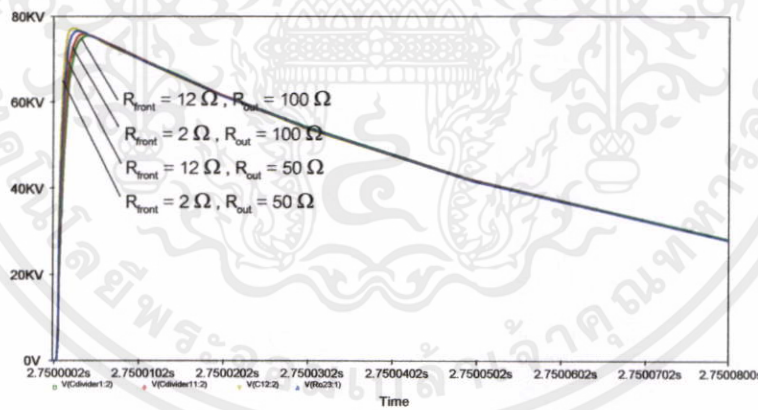
$$R_d \geq 2 \times \sqrt{L \times \frac{C_s + C_b}{C_s \times C_b}} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ผลจำลองปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการแกว่งบริเวณยอดคลื่น

กรณีที่วัสดุทดสอบมีค่าความประจุไฟฟ้าสูงมากเกินกว่าค่าที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เป็นเหตุให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบมีช่วงเวลาหน้าคลื่นไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐานกล่าวคือจะมีช่วงเวลาหน้าคลื่นที่มากกว่ามาตรฐาน ดังนั้นวิธีการปรับหน้าคลื่นให้ได้ตามมาตรฐานสามารถกระทำได้โดยการปรับค่าองค์ประกอบภายในวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จาก R_f และ R_o ให้มีค่าลดลงที่เหมาะสม ดังผลในรูปที่ 3.12 และ ตารางที่ 3.7



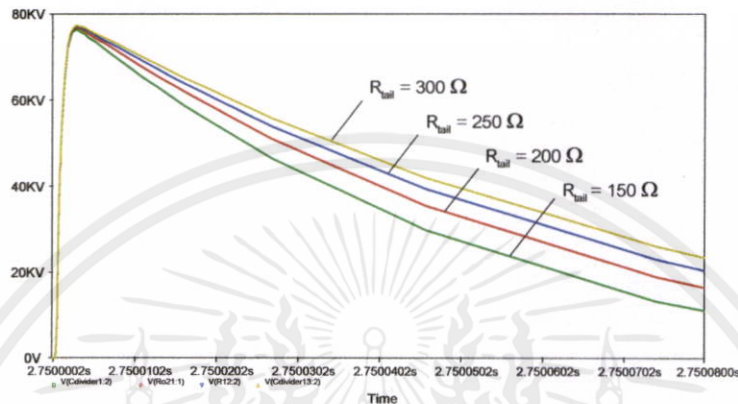
รูปที่ 3.12 ผลจำลองปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์กรณีหน้าคลื่นไม่เป็นไปตามมาตรฐาน

ตารางที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นจากผลการปรับค่า R_f และ R_o

R_f	R_o	T_1 (μs)	T_2 (μs)	U_{peak} (kV)
12 Ω	100 Ω	2.15	59.28	75.55
2 Ω	100 Ω	1.85	59.28	76.01
12 Ω	50 Ω	1.32	57.58	76.57
2 Ω	50 Ω	0.99	56.69	77.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบางกรณีหากวัสดุทดสอบมีองค์ประกอบของค่าความเหนียวสูงซึ่งจะเป็นผลโดยตรงต่อหางคลื่น โดยลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการทดสอบจะมีหางคลื่นที่สั้นกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐาน ดังนั้นวิธีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหานี้จะกระทำได้โดยการปรับค่า R_t ในวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ให้มีค่าที่สูงขึ้น ดังผลในรูปที่ 3.13 และ ตารางที่ 3.8



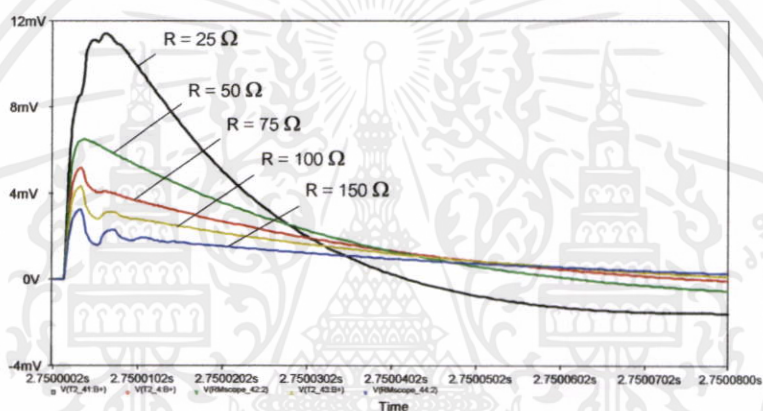
รูปที่ 3.13 ผลจำลองปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์กรณีหางคลื่นไม่เป็นไปตามมาตรฐาน

ตารางที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงหางคลื่นจากผลการปรับค่า R_t

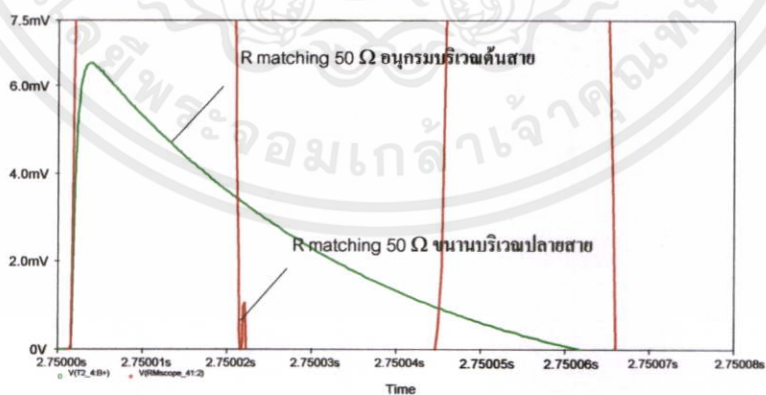
R_t	T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)
150 Ω	1.53	36.42	76.35
200 Ω	1.53	42.23	76.82
250 Ω	1.53	47.23	76.94
300 Ω	1.53	51.78	77.30

การต่อความต้านทานสมมูลกัน (Matching Resistor) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความถูกต้องของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่วัดโดยส่วนใหญ่แล้วความต้านทานนี้มักติดตั้งอยู่ที่ภาคแรงต่ำของโวลต์เตจดีไวเซอร์ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่อยู่ระหว่างภาคแรงต่ำของโวลต์เตจดีไวเซอร์และออสซิลโลสโคป สำหรับเหตุที่จำเป็นต้องใช้ความต้านทานสมมูลกันในระบบการวัดนั้นก็เพื่อขจัดผลของคลื่นจรซึ่งเป็นเหตุให้การวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีความผิดเพี้ยนไป โดยวิธีที่ใช้ในระบบวัดขึ้นอยู่กับประเภทของโวลต์เตจดีไวเซอร์ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับหลักการของการใช้งานความต้านทานสมมูลกันนั้นมีหลักการก็คือค่าความต้านทานสมมูลกันนี้จะต้องมีค่าเท่ากับค่าเสถียรค่าอิมพีแดนซ์ของสายวัดสัญญาณซึ่งสายวัดสัญญาณแต่ละประเภทจะมีค่าเสถียรค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในตัวอย่างนี้จึงจำลองการวัดสัญญาณก่อนเข้าออสซิลโลสโคป เพื่อจำลองการใช้

ความต้านทานสมมูลกันที่ถูกต้องและไม่ถูกต้องขึ้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบ โดยโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ใช้เป็นแบบตัวเก็บประจุซึ่งต้องใช้ต้านทานสมมูลกันต่ออนุกรมบริเวณต้นสายสัญญาณ ซึ่งในรูปที่ 3.14 เป็นผลการจำลองการปรับค่าความต้านทานสมมูลกัน ทั้งนี้สายสัญญาณที่ใช้จริงมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ $50\ \Omega$ อีกกรณีหนึ่งคือการติดตั้งความต้านทานสมมูลกันผิดตำแหน่งเช่นในกรณีที่โวลต์เตจดีไวเดอร์เป็นแบบความจุไฟฟ้าซึ่งต้องมีการติดตั้งความต้านทานสมมูลกันนี้อนุกรมไว้ที่บริเวณต้นสายสัญญาณวัดแต่มีการติดตั้งความต้านทานดังกล่าวขนานไว้บริเวณปลายสายสัญญาณ (การติดตั้งความต้านทานแบบนี้ใช้ในกรณีที่โวลต์เตจดีไวเดอร์เป็นแบบความต้านทาน) ซึ่งผลที่ได้ดังในรูปที่ 3.15 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งการต่อความต้านทานสมมูลกัน ทั้งการต่ออนุกรมที่ต้นสายสัญญาณและการต่อขนานที่ปลายสายสัญญาณ



รูปที่ 3.14 ผลจำลองปรับค่าความต้านทานสมมูลกันกรณีเปลี่ยนค่าความต้านทาน



รูปที่ 3.15 ผลจำลองปรับค่าความต้านทานสมมูลกันกรณีเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 สรุปผลการจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

จากผลการจำลองที่ผ่านมาพบว่าผลที่ได้ของค่าช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) และช่วงเวลาหางคลื่น (T_2) ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างสืบเนื่องมาจากข้อจำกัดของตัวโปรแกรมเองในแง่ของค่าความละเอียดของเครื่องมือวัดภายในตัวโปรแกรมที่ยังไม่ละเอียดพอรวมถึงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองซึ่งอาจแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ในวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จริงอยู่บ้างเนื่องจากอายุการใช้งาน แต่นับได้ว่าผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีความใกล้เคียงกับผลจากการวัดรูปคลื่นจริงและมีความน่าเชื่อถืออยู่ในเกณฑ์ที่พอยอมรับได้ อย่างไรก็ตามผลการจำลองทำให้ทราบหลักการทำงานและพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้โดยง่ายตัวอย่างเช่น หลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแรงสูงกระแสตรงหรือผลของปัจจัยต่างๆที่ทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งสังเกตได้ว่าในกรณีวัสดุทดสอบมีค่าความจุไฟฟ้ามากจะส่งผลต่อหน้าคลื่นทำให้ช่วงเวลาหน้าคลื่นมากกว่ามาตรฐาน ส่วนในกรณีวัสดุทดสอบมีค่าความเหนี่ยวนำมากจะส่งผลกับเวลาหางคลื่นโดยช่วงเวลาหางคลื่นจะน้อยกว่ามาตรฐาน โดยทั้ง 2 กรณีสามารถแก้ไขได้โดยการปรับค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

3.5 การวิเคราะห์ผลการจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

จากที่กล่าวมาแล้วว่าผลจำลองการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรม OrCAD มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปประกอบการศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รวมทั้งวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่อาจเกิดในระหว่างการทดสอบ ซึ่งวิธีที่ใช้ปรับค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้นใช้วิธีปรับค่าไปจนกว่าจะได้ผลเป็นที่พอใจ อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติงานจริงไม่สะดวกในการใช้วิธีดังกล่าวแก้ปัญหาโดยวิธีแก้ปัญหาที่ดีคือควรมีการคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่แม่นยำเพื่อบำเพ็ญการแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้องและประหยัดทรัพยากรในการจัดทำองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นมาใหม่ โดยผลการจำลองสร้างรูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้นั้นมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างจากปัจจัยต่างๆที่กล่าวไปแล้วแต่นับได้ว่าสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการศึกษาเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการทดสอบแรงดันอิมพัลส์

4.1 บทนำ

โปรแกรม LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) หากมองในภาพรวมก็คือเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมเพื่อนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ [31] โดยมีลักษณะเป็นโปรแกรมประยุกต์ (Application Program) เช่นเดียวกับ Visual Basic, Visual C++ หรือ FORTRAN เป็นต้น แต่วิธีการที่ใช้เขียนคำสั่ง (Source Code) โดยโปรแกรม LabVIEW ใช้ลักษณะของรูปภาพในการพัฒนา (Graphical-base Programming) ส่วนโปรแกรมอื่นที่กล่าวมานั้นใช้ลักษณะของตัวอักษร (Text-base Programming) กล่าวคือ สามารถใช้ชุดคำสั่งที่เป็นรูปภาพหรือไอคอนแทนการพิมพ์ชุดคำสั่งที่เป็นข้อความโดยลักษณะการไหลของข้อมูลของโปรแกรม LabVIEW จะเป็นในลักษณะแบบ Dataflow คือมองการไหลของข้อมูลที่ละชุดเมื่อชุดหนึ่งเสร็จก็จะดำเนินการในชุดต่อไปเหมือนลักษณะของ Block diagram ส่วนการไหลของข้อมูลแบบตัวอักษรนั้นจะมีการทำงานในลักษณะจากชุดคำสั่งด้านบนไล่ลงมาถึงชุดคำสั่งด้านล่างซึ่งหากนำมาเปรียบเทียบกันพบว่าข้อดีประการแรกของการใช้ LabVIEW คือลดความผิดพลาดในการสะกดหรือพิมพ์คำสั่งผิดออกไป ส่วนอีกประการหนึ่งคือจากการที่มีการไหลของข้อมูลแบบ Block diagram นั้นเองจึงสามารถที่จะพิจารณา ตรวจสอบหรือแก้ไขการทำงานของโปรแกรมจากส่วนนั้นได้โดยตรงอีกทั้งไม่จำเป็นที่จะต้องจดจำรูปแบบคำสั่งเหมือนกับโปรแกรมอื่นๆ [33,34,35,36]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรม LabVIEW V.7.1 ในการดำเนินการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการแสดงผลรูปคลื่น การวัดค่าพารามิเตอร์ และคำนวณการปรับค่าองค์ประกอบภายในของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีที่รูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐาน สาเหตุที่เลือกใช้โปรแกรม LabVIEW ในการจัดทำนั้นสืบเนื่องมาจากเป็นโปรแกรมที่ได้รับการออกแบบสำหรับการตรวจวัดโดยตรงทำให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง มีฟังก์ชันให้เลือกใช้งานมากและสิ่งสำคัญคือเป็นโปรแกรมที่คาดว่าจะเข้ามามีบทบาทสำคัญทั้งในภาคอุตสาหกรรม [30] และการศึกษาวิจัยในอนาคตซึ่งหากมีการพัฒนาบุคลากรการใช้โปรแกรมนี้ไว้น่าจะมีประโยชน์ต่อไปอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการวัดทางวิศวกรรมต่างๆ

เอกสารที่ 4.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

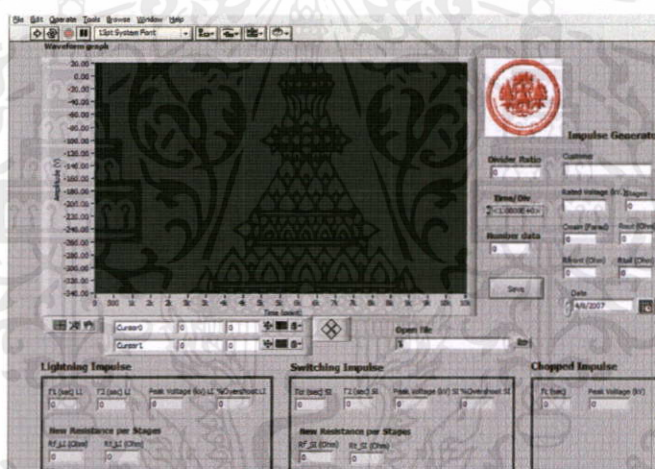
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนั้น อีกทั้งยังมิได้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก LabVIEW บางครั้งเรียกว่า Virtual Instrument (VI) โดยลักษณะเด่นที่นอกเหนือจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งานที่ค่อนข้างสูงแล้วยังสามารถนำมาใช้ในการ

คำนวณที่เกี่ยวข้องกับสมการที่มีความซับซ้อนได้ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ อีกทั้งลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพนั้นผู้ใช้สามารถที่จะใช้งานได้เหมือนกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางวิศวกรรมต่างๆ โดยในการพัฒนาโปรแกรมหนึ่งๆจาก LabVIEW นั้นจะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนด้วยกัน [9] คือ

4.2.1 Front Panel

อาจกล่าวให้เข้าใจง่าย ๆ ก็คือ Front Panel ก็คือแผงหน้าปัดที่แสดงหน้าจอของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยจะเป็นส่วนที่ใช้ในการสื่อสารข้อความ การควบคุมหรือแสดงผลระหว่างผู้ใช้กับตัวโปรแกรม ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่า Control หรือ Input จากผู้ใช้งาน เช่น สวิตช์ ปุ่มกด หรือ ปุ่มบิด เป็นต้น และอีกส่วนหนึ่งเรียกว่า Indicator หรือ Output จากการทำงานของโปรแกรม เช่น การแสดงผลแบบตัวเลข การแสดงผลแบบข้อความ หรือ จอแสดงรูปภาพ เป็นต้น

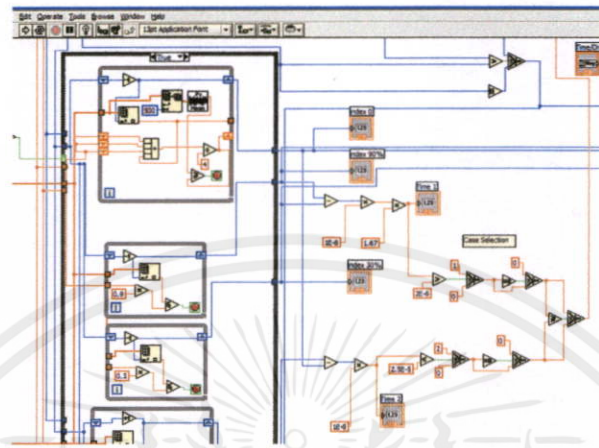


รูปที่ 4.1 ลักษณะของ Front panel

4.2.2 Block diagram

ในส่วนของ Block diagram นั้นเป็นชื่อเฉพาะที่ใช้เรียกตัวโครงสร้างของโปรแกรม โดยเป็นส่วนที่เก็บตัวโปรแกรม (Source Code) โดยจะอยู่ในรูปแบบของรูปภาพหรือไอคอนต่างๆ ซึ่งในส่วนนี้เป็นที่บรรจุตัวโครงสร้างของโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาโดยภายในจะแสดงส่วนประกอบต่างๆ ที่ต่ออยู่ภายในการทำงานของโปรแกรม เช่น Node, Terminal และ Wire หลักการทำงานในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยเริ่มจาก Acquisition หรือส่วนที่รับข้อมูล Input จากภายนอกเข้ามาดำเนินการภายในโปรแกรม หลังจากได้รับข้อมูลมาแล้วข้อมูลก็จะเข้าสู่ในส่วนของ Analysis หรือฟังก์ชันในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อดำเนินงานตามแต่ที่ได้ออกแบบโปรแกรมไว้ เมื่อ

ประมวลผลเสร็จข้อมูลก็จะเข้าสู่ส่วนของ Presentation หรือการแสดงผล Output ตามรูปแบบที่ได้ออกแบบจากการเขียนโปรแกรม



รูปที่ 4.2 ลักษณะของ Block diagram

4.2.3 Icon และ Connector

ในการเขียนโปรแกรมใด ๆ นั้น มักมีการทำงานที่ประกอบกันของรูปการทำงานอยู่หลายรูปด้วยกัน โดย Icon และ Connector นี้เปรียบเสมือน โปรแกรมย่อย (Subroutine) ในโปรแกรมทั่วไป โดยที่ Icon จะหมายถึง Block diagram ตัวหนึ่งซึ่งจะมีทั้งการส่งข้อมูลเข้าและส่งออก โดยผ่านทาง Connector ซึ่งเป็นจุดส่งผ่านข้อมูล ในทางปฏิบัติทั่วไปของโปรแกรม LabVIEW มักเรียกโปรแกรมย่อยนี้ว่า SubVI ซึ่งหากนำ SubVI นี้ไปใช้เป็นส่วนประกอบในการดำเนินการของ LabVIEW เพื่อเขียนโปรแกรมใหม่หรือในไฟล์ใหม่ก็จะเรียก SubVI นั้นว่า Module ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันความสับสนในการใช้งานโปรแกรม LabVIEW

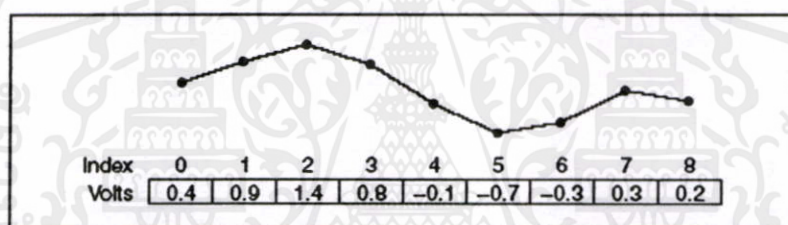


รูปที่ 4.3 ลักษณะของ Icon และ Connector

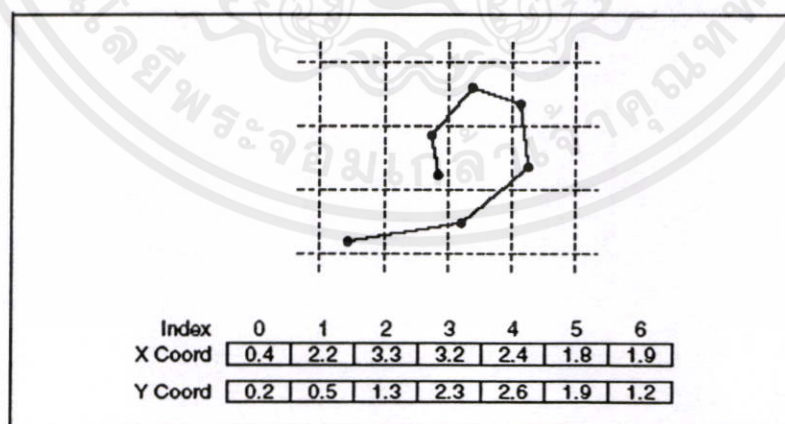
เอกสารนี้เป็นเอกสารสำคัญอีกประการหนึ่งของการใช้โปรแกรม LabVIEW คือข้อมูลที่ไหลอยู่ในโปรแกรมการคำนวณ โดยทั่วไปการเก็บข้อมูลจะเก็บในรูปของการรวมข้อมูลหลายๆแบบให้กลายเป็นกลุ่มข้อมูลเดียวกัน เป็นวิธีในการเก็บข้อมูลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเพื่อลดความยุ่งยากในการประมวลผลโดยเฉพาะอย่างยิ่ง

กรณีข้อมูลซึ่งมีปริมาณมากและใช้อัตราการสุ่มตัวอย่างเพื่อเก็บข้อมูลที่สูง ซึ่งในโปรแกรม LabVIEW ได้แบ่งการมองข้อมูลประเภทนี้เป็น 2 อย่างด้วยกัน คือ Array และ Cluster โดยข้อแตกต่างของข้อมูล 2 ประเภทนี้ก็คือ Array จะเป็นกลุ่มข้อมูลในรูปแบบเดียวกันทั้งหมด ส่วน Cluster จะประกอบด้วยข้อมูลหลายๆแบบในกลุ่มข้อมูลเดียว ในที่นี้จะขอกล่าวถึงข้อมูลในลักษณะของ Array ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เท่านั้น

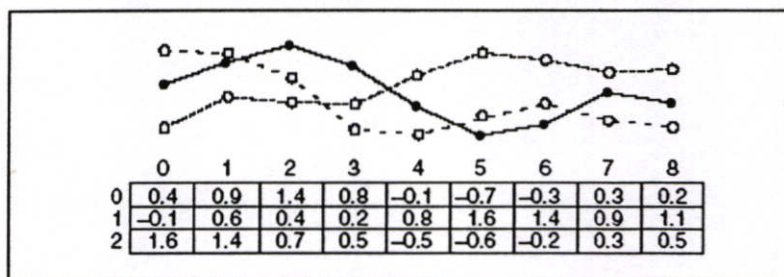
Array หมายถึง กลุ่มของข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบเดียวกัน เช่นกลุ่มของตัวเลข (Numeric) กลุ่มของตรรกะ (Boolean) หรือกลุ่มของข้อความ (String) โดยในแต่ละข้อมูลใน Array เรียกว่า Element ซึ่งเราสามารถอ้างอิงข้อมูลเหล่านั้นได้โดยการใช้ Index ตัวอย่างเช่น Element แรกสุดใน Array จะมี Index เป็น 0 อย่างไรก็ตามการเก็บข้อมูลแบบ Array สามารถเก็บข้อมูลได้ทั้ง 1 มิติ (1D) 2 มิติ (2D) หรือ 3 มิติ (3D) ก็ได้ โดยหน่วยความจำที่ใช้ใน โปรแกรมได้ออกแบบให้ในแต่ละมิติสามารถเก็บข้อมูลได้ 2^{31} Element ต่อมิติและมีจำนวน Index ได้ N-1 ค่า (Element แรกสุดจะเป็น Index 0) [37,38] ดังตัวอย่างการระบุ Index จากรูปที่ 4.4 ถึง รูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 รูปแบบของ Array 1 มิติ (1D)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.5 รูปแบบของ Array 2 มิติ (2D) ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 รูปแบบของ Array 2 บิต แบบหลาย Waveforms

4.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทดสอบแรงดันอิมพัลส์

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม LabVIEW version 7.1 ในการพัฒนาโปรแกรม โดยเป็นโปรแกรมเดียวที่มีขนาดเล็กซึ่งสามารถพกพาไปใช้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ไม่ว่าจะเป็น Personal Computer หรือ Notebook เครื่องใดก็ตามที่มีระบบปฏิบัติการหรือ OS (Operation System) ตั้งแต่ Windows XP เป็นต้นไป โดยการออกแบบโปรแกรมนี้จะสามารถนำมาใช้ในการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ที่ต้องปรับเปลี่ยนในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดนั้นจะต้องป้อนรายละเอียดในการทดสอบ (Instrument setup) และเปิดข้อมูลจากไฟล์ข้อมูลออกมาเพื่อดำเนินการ Run บนโปรแกรมที่ได้ออกแบบขึ้น เมื่อทราบผลจากการทดสอบแล้วโปรแกรมสามารถสั่งพิมพ์ผลการทดสอบหรือบันทึกข้อมูลการทดสอบในลักษณะเป็นรูปภาพได้ ทั้งนี้ในการพัฒนาโปรแกรมใดๆก็ตามควรมีลักษณะการออกแบบของโปรแกรมดังต่อไปนี้

1. ได้ผลลัพธ์ถูกต้องตามต้องการ
2. ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบของข้อมูลได้
3. ต้องมีรูปแบบของโปรแกรมที่นักคอมพิวเตอร์ทั่วไปสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย
4. ต้องเผื่ออำนวยความสะดวกการปรับปรุงแก้ไขที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตและต้องมีเอกสารประกอบโปรแกรมที่พัฒนา

สำหรับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจะเริ่มจากการรับข้อมูลจากออสซิลโลสโคปและนำข้อมูลเหล่านั้นมาจำแนกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยการทดสอบแรงดันอิมพัลส์นั้นมีลักษณะของรูปคลื่นที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบอยู่ 3 ประเภทตามที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า รูปคลื่นเต็ม รูปคลื่นอิมพัลส์สวิตชิง และรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ ดังนั้นในการทำงานของโปรแกรมจำเป็นต้องจำแนกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่นำมาทดสอบนั้นเป็นรูปคลื่นประเภทอะไร และชั่วอะไร จากนั้นจึงนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นสำหรับรูปคลื่นประเภทนั้นๆ และแสดงผลรูปคลื่นทั้งในส่วนของกราฟและค่าพารามิเตอร์ที่วัดมาได้ และหารูปคลื่นที่ได้จาก

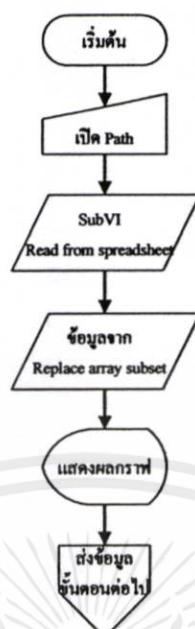
การทดสอบไม่ได้ตามมาตรฐานโปรแกรมจะดำเนินการคำนวณหาค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องปรับเปลี่ยนเพื่อให้รูปคลื่นที่ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

การออกแบบโปรแกรมได้ดำเนินการตามแนวความคิดที่ว่าผู้ใช้งานในทุกระดับสามารถนำมาใช้งานได้ง่าย โดยไม่จำเป็นต้องทราบโครงสร้างภายในของโปรแกรมที่ค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งลักษณะของข้อมูลที่ได้จากออสซิลโลสโคปนั้น โปรแกรม LabVIEW จะมองข้อมูลเหล่านั้นเป็น Array แบบ 2 มิติ (2D Array) โดยการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการวัดและวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งส่วนประกอบการทำงานของโปรแกรมออกเป็นส่วนต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- การเปิดไฟล์ข้อมูล
- การระบุ Index ของข้อมูลและจำแนกรูปคลื่น
- การคำนวณค่าพารามิเตอร์
- คำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- ส่วนการบันทึกผลเป็นรูปภาพ

4.3.1 การเปิดไฟล์ข้อมูล

รูปแบบในการบันทึกข้อมูลลงเป็นไฟล์นั้นสามารถแบ่งรูปแบบออกอย่างกว้างๆ ได้ 2 รูปแบบใหญ่ๆ คือ ข้อมูลแบบตัวอักษร (Text File) และ ข้อมูลแบบไบนารี (Binary File) โดยรูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบตัวอักษร จากที่กล่าวมาแล้วว่าข้อมูลที่บันทึกได้จากออสซิลโลสโคปสามารถนำมาทำงานได้กับโปรแกรมสเปรดชีตทั่วไป โดยในโปรแกรม LabVIEW มีฟังก์ชันในการทำงานกับข้อมูลในลักษณะนี้คือการใช้ฟังก์ชันสเปรดชีตสตริง (Spreadsheet string) ซึ่งการทำงานจะมีโปรแกรมย่อยที่ใช้ประกอบการทำงาน ในส่วนนี้เริ่มจากฟังก์ชันเปิดไฟล์ (Open file) สำหรับเลือก Path ที่บรรจุข้อมูลซึ่งอาจเป็นข้อมูลจากที่ใดก็ได้ที่เครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องนั้นสามารถเห็นข้อมูล จากนั้นโปรแกรมจะทำการรับค่าข้อมูลจากไฟล์ดังกล่าวที่ได้ทำการเปิดก่อนหน้านี้และส่งต่อมายัง subVI ที่ชื่อว่า Read From Spreadsheet File.vi เพื่อทำการอ่านค่าของชุดข้อมูล สำหรับในขั้นตอนนี้จะมีการใช้ฟังก์ชัน Index Array ในการระบุตำแหน่งของ index จาก Element โดยข้อมูลที่นำมาใช้ในส่วนนี้จะป้อนข้อมูลเริ่มต้นของข้อมูลจริงจนถึง EOL (End Of Line) ซึ่งเป็นข้อมูลสุดท้ายของชุดข้อมูลจากไฟล์ กล่าวคือไม่ได้นำข้อมูลในส่วนของ Header file มาใช้งาน เมื่อสิ้นสุดการทำงานในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะส่งข้อมูลดังกล่าวไปที่ฟังก์ชัน Replace Array Subset เพื่อแสดงผลกราฟของรูปคลื่นและใช้ในการทำงานของโปรแกรมในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.7 แผนภาพลำดับขั้นตอนการเปิดไฟล์ข้อมูล

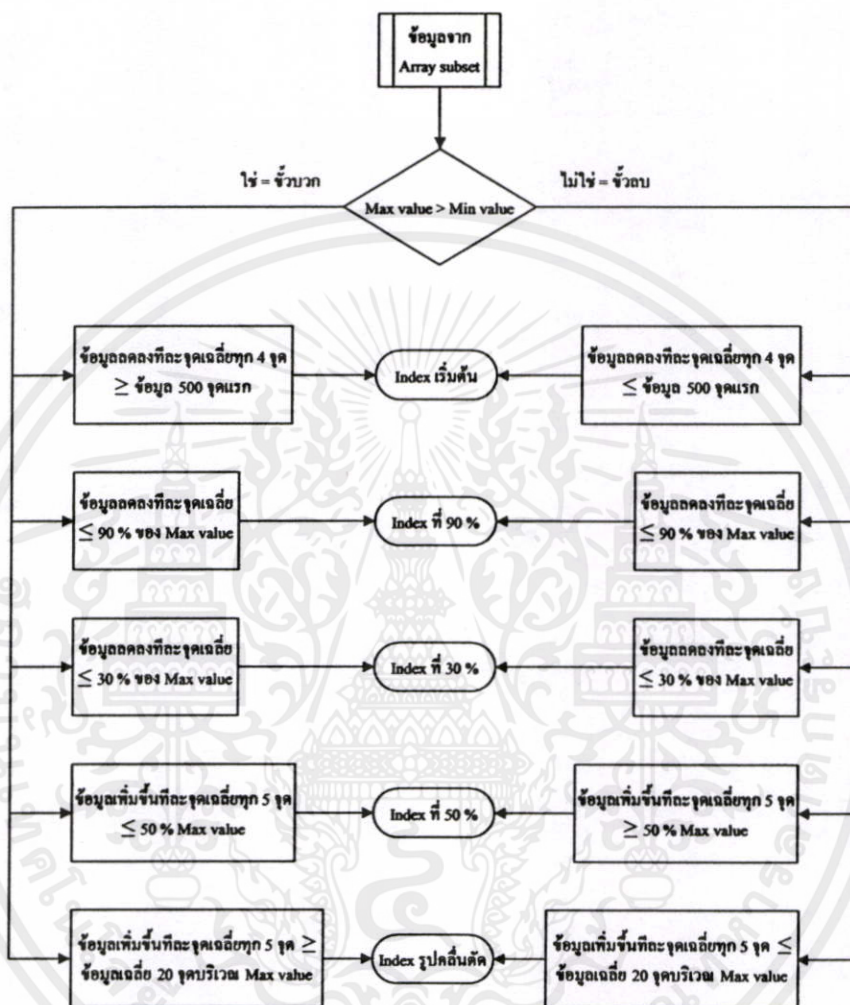
4.3.2 การระบุ Index ของข้อมูลและการจำแนกรูปคลื่น

การระบุตำแหน่งหรือจุดของ Index นั้นมีความสำคัญในการแยกแยะจำแนกรูปคลื่นรวมทั้งจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่นำไปสู่การคำนวณพารามิเตอร์ที่ได้จากรูปคลื่นในขั้นตอนต่อไป ซึ่งข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการระบุ Index นั้นจะเป็นข้อมูลที่ได้อาจมาจากฟังก์ชัน Array Max&Min ที่รับข้อมูลสลับเนื่องมาจากการเปิดไฟล์ข้อมูล โดยเริ่มจากการนำข้อมูลที่ได้จาก Max value และ Min value มาเปรียบเทียบกันเพื่อระบุว่าข้อมูลรูปคลื่นที่ได้เป็นขั้วบวกหรือขั้วลบและหลังจากนั้นจึงนำข้อมูลจาก Max index และ Min index มาระบุตำแหน่งจุดที่สูงสุดและจุดต่ำสุดมาใช้งานซึ่งในที่นี้ค่า Max จะหมายถึงรูปคลื่นเป็นขั้วบวกและค่า Min จะหมายถึงรูปคลื่นเป็นขั้วลบ โดยเริ่มจากข้อมูลที่ได้จาก Max index หรือ Min index นำมาลดลงทีละ 1 จุดและหาค่าเฉลี่ยทุกๆ 4 จุดเพื่อนำมาค่าดังกล่าวเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของข้อมูล 500 จุดแรก ถ้าข้อมูลเฉลี่ยจาก 500 จุดแรกมากกว่าหรือเท่ากับค่าเฉลี่ยที่ลดลงมาทุกๆ 4 จุดก็จะระบุว่า Index นั้นเป็นจุดที่เริ่มต้นของรูปคลื่น

การหา Index ของรูปคลื่นที่ 90 % จะนำค่า Max value มาคำนวณหาค่าที่ 90 % และนำค่าที่ลดลงมาทีละจุดนั้นมาเปรียบเทียบ ถ้าค่าที่ลดลงมาทีละจุดน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่ 90 % ก็จะระบุจุดนั้นเป็น Index ที่รูปคลื่น 90 % สำหรับการหา Index ของรูปคลื่นที่ 30 % ก็เช่นเดียวกันแต่ค่าที่นำมาเปรียบเทียบนั้นจะเป็นค่าที่ 30 % ของรูปคลื่น

การหา Index ของรูปคลื่นที่ 50 % นั้นจะนำค่า Max index หรือ Min index มาเพิ่มขึ้นทีละจุดแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าของรูปคลื่นที่ 50 % ถ้าค่าที่เพิ่มขึ้นมาทีละจุดน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่ 50 % ก็จะระบุจุดนั้นเป็น Index ที่รูปคลื่น 50 %

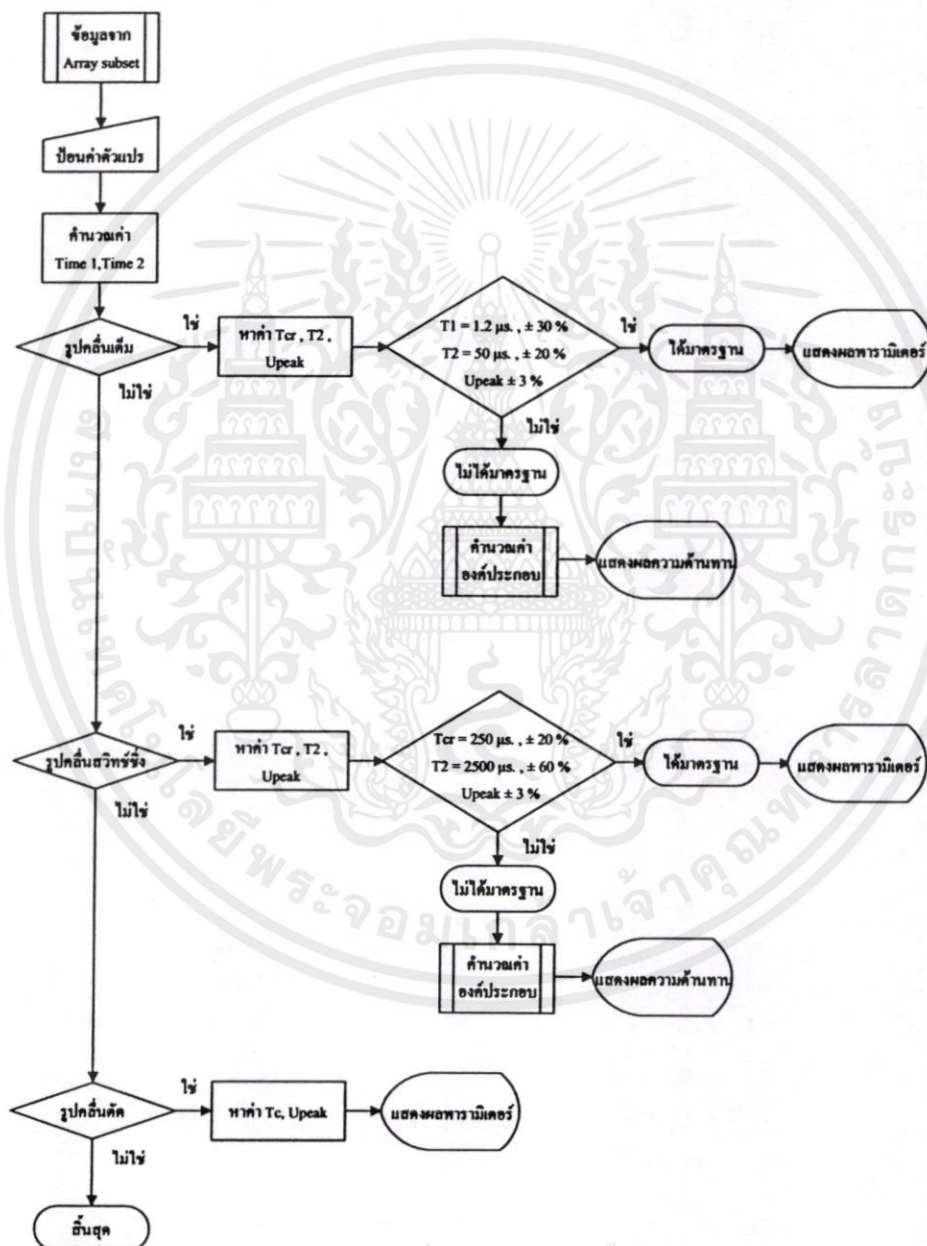
กรณีที่เป็นรูปคลื่นตัด Index ที่ต้องใช้คือจุดที่รูปคลื่นตัดลงอย่างรวดเร็ว ใช้หลักการว่า นำ Max index หรือ Min index นำมาเพิ่มขึ้นทีละ 1 จุดและหาค่าเฉลี่ยทุกๆ 5 จุดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย 20 ค่าบริเวณขอดคลื่น ถ้าค่าบริเวณขอดคลื่นมากกว่าหรือเท่ากับค่าเฉลี่ยทุก 5 จุด ก็จะระบุจุดนั้นเป็น Index ที่รูปคลื่นตัดหรือสับลงมา



รูปที่ 4.8 แผนภาพการระบุค่า Index ต่างๆ

การจำแนกรูปคลื่นว่าข้อมูลที่ได้มานั้นเป็นรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม รูปคลื่นอิมพัลส์สวิตชิง หรือรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับนั้นใช้หลักการคือ นำ Index ที่ 90% มาลบกับ Index ที่ 30% เพื่อจะหาช่วงของช่วงเวลาที่ 1 กำหนดให้เป็น Time 1 แล้วนำค่าดังกล่าวมาตรวจสอบกับค่า 2×10^6 ถ้ามากกว่าจะกำหนดให้มีค่าเป็น 1 แต่ถ้าน้อยกว่าจะกำหนดให้มีค่าเป็น 0 และอีกส่วนหนึ่งคือ นำ Index ที่ 50% มาลบกับ Index ที่เริ่มต้นสำหรับหาช่วงของหางคลื่น โดยค่าที่ได้กำหนดให้เป็น Time 2 แล้วจึงนำค่าดังกล่าวมาตรวจสอบกับค่า 25×10^6 ถ้าน้อยกว่าจะกำหนดให้มีค่าเป็น 2 แต่ถ้ามากกว่าจะกำหนดให้มีค่าเป็น 0 หลังจากนั้นจึงนำค่า Time 1 และ Time 2 มาเปรียบเทียบกับ

ถ้าเท่ากันจะกำหนดให้เป็นตัวแปร 0 แต่ถ้าไม่เท่ากันก็จะกำหนดให้เป็นตัวแปร 1 หรือ ตัวแปร 2 ตามแต่ค่าที่กำหนดมานั้นเป็นค่าอะไร โดยการกำหนดค่าตัวแปรมีนัยสำคัญคือ ถ้าตัวแปรเป็น 0 โปรแกรมจะตัดสินใจว่าข้อมูลชุดนั้นเป็นรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้ารูปคลื่นเต็ม แต่ถ้าตัวแปรเป็น 1 โปรแกรมจะตัดสินใจว่าข้อมูลชุดนั้นเป็นรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตชิง หรือถ้าตัวแปรเป็น 2 โปรแกรมจะตัดสินใจว่าข้อมูลชุดนั้นเป็นรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้าสลับทั้งหลายที่กล่าวมานั้นก็เพื่อนำตัวแปรมาดำเนินการต่อใน Module ของการคำนวณและวิเคราะห์ผลของรูปคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก

รูปที่ 4.9 แผนภาพการจำแนกรูปคลื่นและคำนวณค่าพารามิเตอร์

4.3.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เริ่มจากการนำตัวแปรที่ได้จากการจำแนกรูปคลื่นมาคำนวณงานต่อในฟังก์ชัน Case structure เพื่อเลือกดำเนินการตามกรณีในตัวแปรนั้นกำหนดมา โดยในการดำเนินการในกระบวนการนี้จะต้องป้อนค่าตัวแปรต่างๆจากภายนอก ซึ่งค่าตัวแปรดังกล่าวคือ Number data, Time/Div, Divider ratio, Cmain, Rfront, Rtail, Rout และ Stages เพื่อใช้ในการวัดค่าปริมาณต่างๆและการวิเคราะห์องค์ประกอบของรูปคลื่น โดยการเขียนโปรแกรมในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 3 กรณีตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งในแต่ละกรณีมีหลักการที่แตกต่างกันบ้างซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

กรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (ตัวแปรเป็น 0) มีค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ คือ T_1 , T_2 , Peak voltage และ %Overshoot โดยเริ่มจากการนำ Index ที่ 90% มาลบกับ Index ที่ 30% เพื่อหาค่าของ T' เมื่อได้ค่า T' แล้วนำมาคูณกับค่า Time/Div เพื่อได้ค่าเป็นเวลาของ T' จริง จากนั้นจะต้องนำมาหารด้วย Number data เพื่อให้สอดคล้องกับจำนวนช่องของออสซิลโลสโคป แล้วจึงนำมาคูณด้วย 1.67 จึงจะได้ค่า T_1 จริงๆออกมา ในกรณีของการหาค่า T_2 ก็เช่นกันแต่ต่างที่นำ Index ที่ 50% ของด้านหางคลื่นมาลบกับ Index ที่เริ่มต้นและไม่ต้องนำค่า 1.67 มาคูณ สำหรับการหาค่า Peak voltage จำเป็นต้องอาศัยการดำเนินการของฟังก์ชัน Array Max&Min เพื่อที่จะได้ Max value และ Min value และนำค่าทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน (โดยต้องใส่ Absolute เพื่อไม่ทำให้ค่าที่ได้เป็นลบ) ถ้าปริมาณค่าไหนมีค่ามากกว่าก็ใช้ค่านั้นแล้วนำมาคูณด้วยค่าของ Divider ratio ของระบบวัดก็จะได้ค่า Peak voltage ส่วนอีกค่าหนึ่งที่สำคัญคือค่า %Overshoot ซึ่งเป็นปัจจัยในการพิจารณาตามมาตรฐานกำหนด โดยค่าดังกล่าวได้มาจาก subVI ที่ชื่อว่า Pulse Parameters เพื่อให้ SubVI ดังกล่าวคำนวณค่า Overshoot และนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์อีกทีหนึ่ง

กรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์ (ตัวแปรเป็น 1) มีขั้นตอนการทำงานคล้ายคลึงกับกรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มโดยกรณีของพารามิเตอร์ทั้งค่า T_2 ค่า Peak voltage และ %Overshoot จะมีการดำเนินการเหมือนกัน แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือค่าพารามิเตอร์ T_{cr} โดยการหาค่า T_{cr} เริ่มจากการนำค่าจาก Max index หรือ Min index (แล้วแต่ว่ารูปคลื่นเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบ) นำมาลบกับ Index ที่เริ่มต้น จากนั้นจึงนำมาคูณด้วยค่า Time/Div และหารด้วย Number data ที่สอดคล้องกับจำนวนช่องของออสซิลโลสโคปซึ่งค่าที่ได้มาจะเป็นค่า T_{cr} ที่แสดงผลออกมา

กรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ (ตัวแปรเป็น 2) เป็นกรณีที่มีค่าพารามิเตอร์เพียง 2 ค่าคือค่า T_c และ ค่า Peak voltage โดยการหาค่า Peak voltage จะดำเนินการเหมือนกับทั้ง 2 กรณีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนค่า T_c นั้นเริ่มจากการนำ Index ที่รูปคลื่นตัดหรือสับลงมาเปรียบเทียบกับค่าจาก Max index หรือ Min index ว่าเป็นค่าเดียวกันหรือไม่ ถ้าเท่ากันแสดงว่าเป็นรูปคลื่นตัดบริเวณหน้าคลื่น แต่ถ้าหากว่าค่าที่ได้จาก Max index หรือ Min index นั้นมีค่ามากกว่า Index ที่

รูปคลื่นตัดหามาได้ รูปคลื่นนั้นก็จะ เป็นเป็นรูปคลื่นตัดบริเวณหลังคลื่น ซึ่งจากจุดที่กล่าวมานี้เองที่นำมากำหนดให้เป็น T_c ที่แสดงผลออกมาทางหน้าจอของโปรแกรม

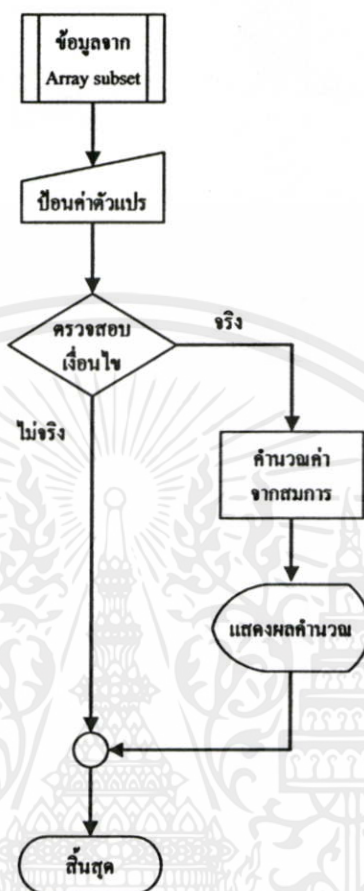
4.3.4 การคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

การคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นี้จะดำเนินการในเฉพาะกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่นำมาทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด โดยจะเป็นการคำนวณค่าความต้านทานภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อนำค่าที่คำนวณได้ไปสร้างความต้านทานมาใหม่สำหรับนำไปเปลี่ยนกับความต้านทานเดิมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อเป็นการปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ทั้งนี้ในการคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะดำเนินการเฉพาะในกรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม และกรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์เท่านั้น เนื่องจากกรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับนั้นเป็นไปได้ยากในการปฏิบัติซึ่งในการทดสอบในกรณีนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยจากภายนอกเป็นส่วนใหญ่

จากการที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีความละเอียดอ่อนมากดังนั้นการจัดทำความต้านทานขึ้นมาใหม่เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้นความต้านทานดังกล่าวไม่ควรเป็นปัจจัยเสริมในการทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีความผิดเพี้ยนไป เช่นจะต้องเป็นความต้านทานที่ทนความร้อนได้สูงและมีค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อหลีกเลี่ยงผลของความเหนี่ยวนำซึ่งอาจเป็นเหตุให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีการออสซิลเลชันได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำขึ้น โดยรายละเอียดการออกแบบโครงสร้างของความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำสามารถดูได้จากภาคผนวก

กระบวนการในการทำงานในส่วนนี้ใช้ฟังก์ชัน Case structure ในการตรวจสอบเงื่อนไขว่าจากผลที่ได้มานั้นจะต้องมีการคำนวณค่าองค์ประกอบใหม่หรือไม่โดยตรวจสอบกับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งหากเงื่อนไขเป็นจริง (หมายความว่าผลของตัวแปรที่วัดได้จากรูปคลื่นไม่เป็นไปตามมาตรฐาน) โปรแกรมจะดำเนินการคำนวณค่าพารามิเตอร์ภายในของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อนำไปปรับปรุงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อปรับให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ตามมาตรฐาน แต่ถ้าหากเงื่อนไขไม่เป็นจริง โปรแกรมก็จะไม่ดำเนินการคำนวณค่าพารามิเตอร์เนื่องจากว่ารูปคลื่นที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานอยู่แล้ว โดยในการกำหนดเงื่อนไขนั้นจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม และกรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์ โดยกรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มจะสร้างเงื่อนไขการตรวจสอบจากค่าของ T_1 และ T_2 ซึ่งกรณีของ T_1 จะตรวจสอบว่าค่าที่ได้้อยู่ระหว่าง $0.84-1.56 \mu s$ และค่าของ T_2 จะตรวจสอบว่าค่าที่ได้้อยู่ระหว่าง $40-60 \mu s$ หากค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ก็แสดงว่ารูปคลื่นที่ดำเนินการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน แต่ถ้าค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้ง 2 ค่าไม่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดรูปคลื่นดังกล่าวจะไม่เป็นไปตามมาตรฐานซึ่งจำเป็นต้องนำมาหาค่าองค์ประกอบเพื่อนำไปปรับปรุงเครื่องกำเนิด

แรงดันอิมพัลส์ต่อไป โดยสมการที่นำมาคำนวณนั้นนำมาจากตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 ซึ่งค่าที่คำนวณมาได้นี้จะระบุให้เป็นค่าความต้านทานใหม่ต่อจำนวนชั้นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 4.10 แผนภาพการคำนวณค่าองค์ประกอบ

4.3.5 การบันทึกผลการทดสอบเป็นรูปภาพ

ในส่วนของการบันทึกผลการทดสอบจะกำหนดให้มีรูปแบบการบันทึกเป็นรูปภาพทั้งหน้าจอของ Front panel โดยสามารถเลือกลักษณะของไฟล์ที่ต้องการบันทึกไม่ว่าจะเป็นไฟล์มีนามสกุล jpg , bmp หรือ png ผ่านการกดปุ่ม Save ซึ่งโปรแกรมจะเรียก Module ภายในโปรแกรมขึ้นมาใหม่เพื่อให้ดำเนินการบันทึก ดังชื่อ หรือกำหนด Drive ปลายทาง

4.4 การใช้งานโปรแกรมทดสอบแรงดันอิมพัลส์

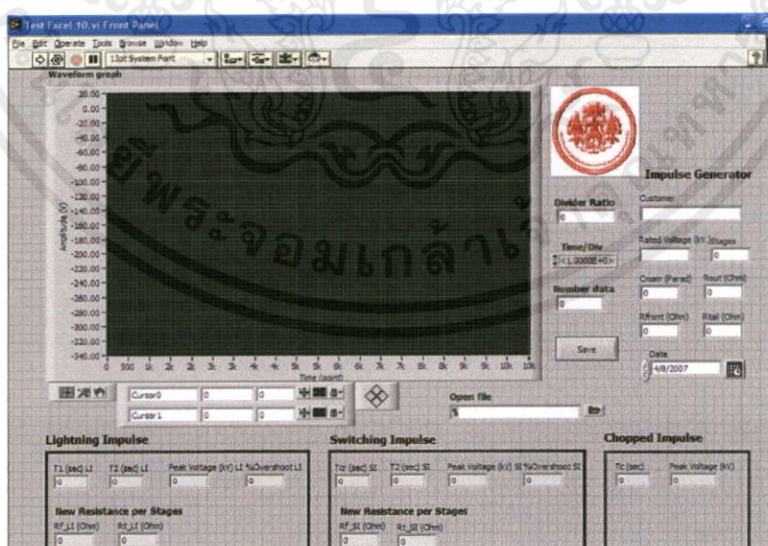
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร
โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ และในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ อีกทั้งยังมีความสะดวกในการพกพาไปใช้นอกสถานที่หรือใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องใดๆ ได้โดยง่าย

ซึ่งแนวทางในการเขียนโปรแกรมนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ง่ายในการนำไปใช้งาน โดยที่ตัวผู้ใช้งานเองไม่จำเป็นต้องมีความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงหรือการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในระดับที่สูงมากนัก สำหรับลำดับขั้นตอนในการใช้งานของโปรแกรมจะมีอยู่ 5 ขั้นตอนด้วยกันคือ

1. การเปิดตัวโปรแกรมขึ้นมา
2. ป้อนค่าตัวแปรและรายละเอียดของการทดสอบ
3. เปิดไฟล์ข้อมูล
4. การ Run โปรแกรม
5. การบันทึกและการสั่งพิมพ์

4.4.1 การเปิดโปรแกรม

การใช้งานโปรแกรมในวิทยานิพนธ์ดังกล่าวนี้จะเริ่มจากการเปิดตัวของโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมา เมื่อดำเนินการเปิดโปรแกรมขึ้นมาแล้วโปรแกรมจะแสดงหน้าจอ (Front panel) สำหรับใช้ในการดำเนินการวัดและแสดงผลค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รวมทั้งการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เพื่อคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องใช้ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐาน โดยภายในหน้าจอจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ คือ ส่วนแสดงกราฟรูปคลื่น (Waveform graph) ส่วนที่ต้องป้อนค่าตัวแปรพื้นฐานและรายละเอียด ส่วนแสดงผลการวัด ส่วนการคำนวณค่าองค์ประกอบ ส่วนสำหรับเปิดไฟล์ (Open file) และปุ่มสำหรับบันทึก (Save) ซึ่งหน้าจอมีรูปแบบตามรูปที่ 4.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 4.11 ลักษณะของหน้าจอ (Front panel) สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การป้อนค่าตัวแปรและรายละเอียดของการทดสอบ

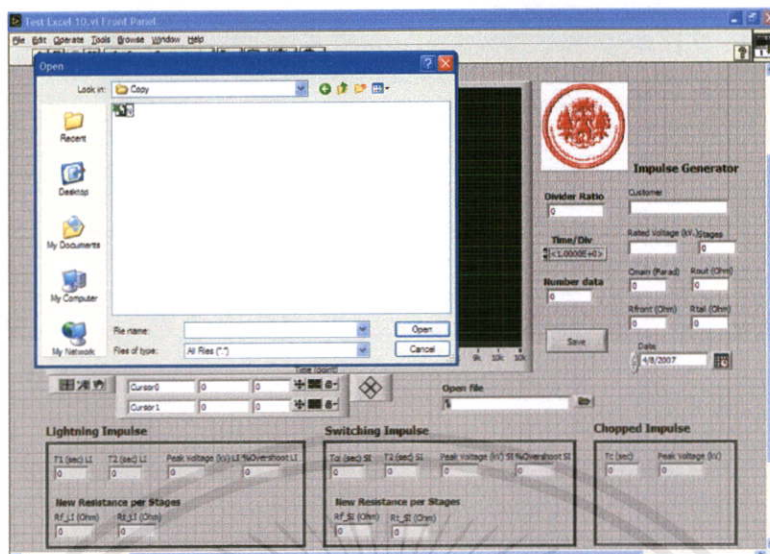
การป้อนค่าตัวแปรพื้นฐานต่างๆมีความจำเป็นอย่างมากในการใช้งาน โปรแกรม ซึ่งหากค่าตัวแปรต่างๆไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงจะมีผลทำให้ค่าต่างๆที่โปรแกรมคำนวณมามีความผิดพลาดอีกทั้งในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์นั้นควรมีรายละเอียดในการทดสอบบันทึกไว้เป็นหลักฐานด้วย โดยรายการตัวแปรต่างๆ มีคำอธิบายดังนี้

Divider ratio	หมายถึง ค่าอัตราส่วนโวลต์เตจเคียวเคอร์ที่ใช้ในระบบวัดของการทดสอบนั้นๆ หากป้อนค่านี้ไม่ตรงกับความเป็นจริงจะมีผลทำให้ขนาด (Amplitude) ที่วัดได้มีความผิดพลาด
Time/Div	หมายถึง ค่าในแกนเวลาที่บันทึกจากออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็น Combo box ให้เลือกค่าเวลาที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลมา ซึ่งหากไม่เลือกหรือเลือกผิดมีผลทำให้การคำนวณเกี่ยวกับเวลาของโปรแกรมผิดพลาด
Number data	หมายถึง ปริมาณจุดที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล ซึ่งค่าในส่วนนี้จะมีผลในด้านการระบุตำแหน่ง (Index) ในการดำเนินการของโปรแกรม
Customer	หมายถึง สถานที่ ผู้ผลิต หรือผู้ดำเนินการทดสอบ
Rated voltage	หมายถึง พิกัดของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์นั้นๆ
Stages	หมายถึง จำนวนชั้นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในกรณีคำนวณค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ใหม่
Cmain	หมายถึง ค่าคาปาซิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ต่อชั้น ใช้กรณีคำนวณค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ใหม่
Rout	หมายถึง ค่าความต้านทานภายนอกของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ใช้ในกรณีคำนวณค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ใหม่ หากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบไม่มีก็ไม่ต้องป้อนค่าหรือป้อนค่าเป็น 0
Rfront	หมายถึง ค่าความต้านทานหน้าคลื่นต่อชั้นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ใช้ในกรณีคำนวณค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ใหม่
Rtail	หมายถึง ค่าความต้านทานหางคลื่นต่อชั้นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ใช้ในกรณีคำนวณค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ใหม่
Date	หมายถึง วัน เดือน ปี ที่ทำการทดสอบ

4.4.3 การเปิดไฟล์ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมนี้ใช้ข้อมูลจากการบันทึกมาจากออสซิลโลสโคปในลักษณะของไฟล์ข้อมูลเพื่อดำเนินการ โดยในการเปิดไฟล์นั้นสามารถทำได้โดยการกดปุ่ม Browse จากบริเวณ

Open file จะปรากฏ Pop up เมนู Open ขึ้นมาจากนั้นจึงเลือกไฟล์ตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.12



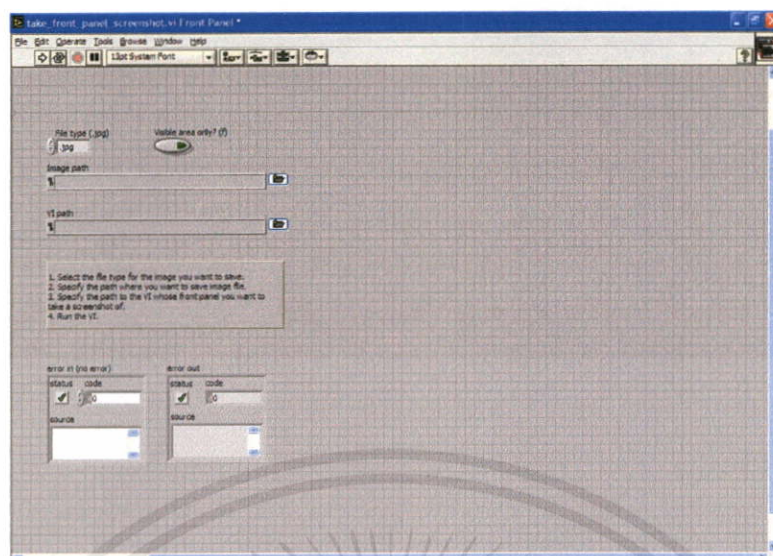
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการเลือกเปิดไฟล์

4.4.4 การ Run โปรแกรม

เมื่อดำเนินการป้อนค่าตัวแปรพื้นฐาน และเปิดไฟล์ เสร็จเรียบร้อยแล้วก็ดำเนินการ Run โปรแกรมเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นรวมทั้งการคำนวณค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีรูปคลื่นไม่เป็นไปตามมาตรฐาน โดยผลของพารามิเตอร์ของรูปคลื่นจะแสดงตามตำแหน่งที่รูปคลื่นที่ทำการทดสอบเป็นรูปคลื่นชนิดใด ซึ่งการ Run โปรแกรมสามารถทำได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ การกดปุ่ม Run จากเมนู  หรือการเลือกไปที่ Operate ที่เมนูบาร์ จากนั้นจึงเลือกไปที่ Run หรืออีกวิธีหนึ่งคือการกดปุ่ม Ctrl พร้อมกับปุ่ม R จากคีย์บอร์ด เมื่อดำเนินการ Run แล้วโปรแกรมจะแสดงค่าต่างๆตามที่ออกแบบไว้ทางหน้าจอ

4.4.5 การบันทึกและการสั่งพิมพ์

ในการทดสอบใดๆนั้นสิ่งสำคัญในการทดสอบคือหลักฐานซึ่งอาจเป็นเอกสารหรือไฟล์รูปแบบต่างๆ เพื่อใช้สำหรับอ้างอิงเกี่ยวกับการทดสอบ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบให้โปรแกรมดำเนินการบันทึกผลการทดสอบเป็นลักษณะรูปภาพทั้งหน้าจอเพื่อป้องกันการแก้ไขอีกทั้งเพื่อความสะดวกในการเรียงเรียงจัดทำเป็นเอกสารต่อไป ซึ่งรูปแบบในการบันทึกรูปภาพนั้นผู้ใช้สามารถเลือกการบันทึกรูปภาพเป็นไฟล์นามสกุลต่างๆได้ คือ *.jpg , *.bmp หรือ *.png ตามต้องการของผู้ใช้ สำหรับการดำเนินการนั้นก็เพียงกดปุ่ม Save จากบริเวณหน้าจอ (Front panel) ก็จะไม่มีการบันทึกโปรแกรมย่อยถูกเรียกขึ้นมาแสดงที่หน้าจอเพื่อดำเนินการบันทึก ดังรูปที่ 4.13 ครั้งที่มีการนำไปใช้



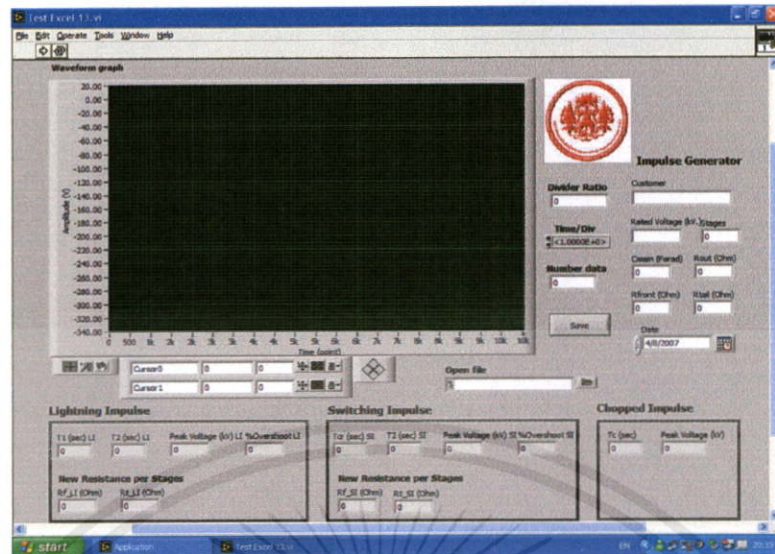
รูปที่ 4.13 โปรแกรมย่อยสำหรับบันทึกไฟล์

ในการบันทึกนี้จะมีขั้นตอนที่ต้องเลือกค่าอยู่ 2 ช่องคือ Image path ซึ่งเป็นการเลือกปลายทางที่ต้องการบันทึกรวมทั้งตั้งชื่อไฟล์ดังกล่าว ส่วน VI path จะเป็นไฟล์ของโปรแกรมที่กำลังเปิดอยู่และต้องการจะบันทึก โดยสามารถทำการกดปุ่ม Browse บริเวณท้ายช่องเพื่อทำการเลือกไฟล์และปลายทางที่ต้องการบันทึก จากนั้นจึงกดปุ่ม Run เป็นอันเสร็จเรียบร้อย

สำหรับกรณีที่ต้องการสั่งพิมพ์เป็นเอกสารนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือการกดปุ่ม Ctrl พร้อมกับปุ่ม P หรืออีกวิธีหนึ่งคือการนำเมาส์ไปเลือกที่เมนู File จากนั้นจึงเลือกไปที่ Print Window ทั้งนี้ในการสั่งพิมพ์นั้นจะต้องมีการต่อสายและ Setup driver ของเครื่องพิมพ์ให้เรียบร้อยแล้วเสียก่อน

4.5 การนำโปรแกรมทดสอบแรงดันอิมพัลส์ไปใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์อื่น

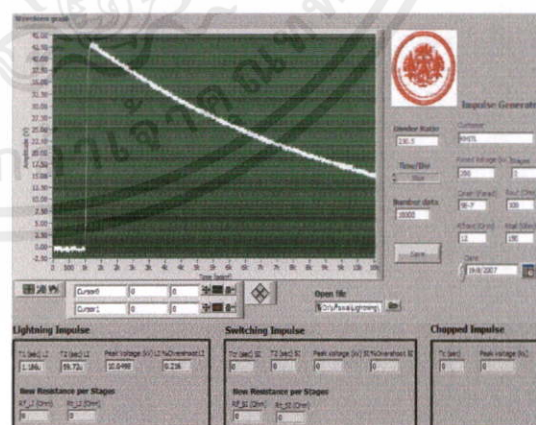
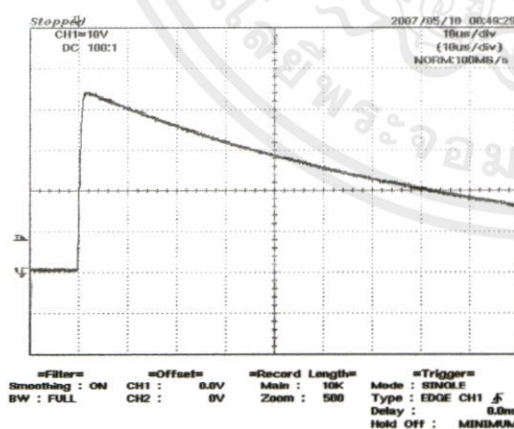
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจาก LabVIEW นี้สามารถนำไปเปิดใช้งานในเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องใดๆ ได้ ซึ่งเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องนั้นไม่จำเป็นจะต้องมีตัวโปรแกรม LabVIEW ทั้งนี้สืบเนื่องจากเพื่อความสะดวกและคล่องตัวในการนำไปใช้ปฏิบัติงานจริง [8] โดยขั้นตอนดังกล่าวนี้เรียกว่าขั้นตอนก่อนนำไปใช้จริง (Deploy) ซึ่งโปรแกรม LabVIEW จะดำเนินการคอมไพล์ตัว Source code ที่เขียนจากโปรแกรม LabVIEW และทำการบันทึกไว้ในรูปแบบของ Executable file เพื่อใช้ในการดำเนินการกับเครื่องคอมพิวเตอร์ใดๆ โดยมีขนาดของไฟล์เพียงประมาณ 14 MB ซึ่งภายในจะบรรจุด้วยไฟล์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการทำงาน โดยตัวไฟล์ที่ใช้ในการ Run โปรแกรมจริงจะอยู่ในส่วนของ Application file ส่วนไฟล์อื่นๆ มีไว้สำหรับสนับสนุนการทำงานของโปรแกรม โดยมีรูปแบบดังต่อไปนี้



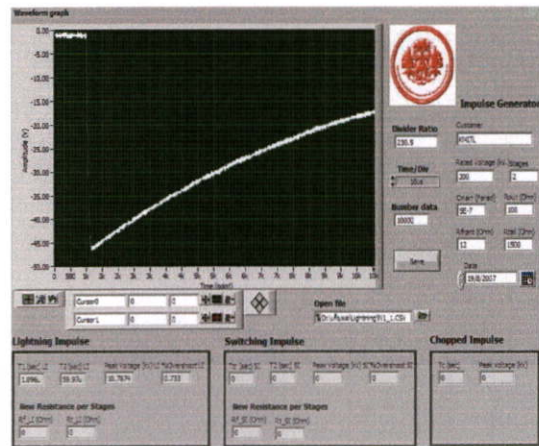
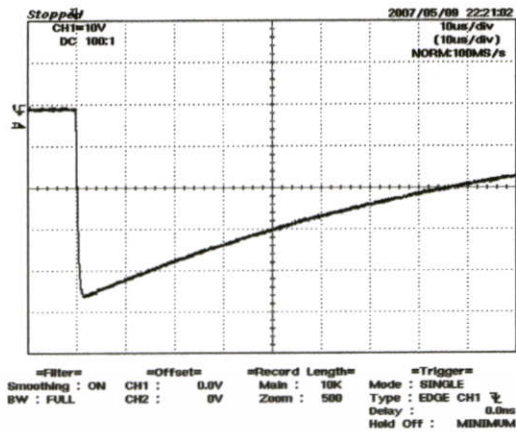
รูปที่ 4.16 ลักษณะของหน้าจอ (Front panel) ที่ได้บันทึกมาจาก Executable file

4.6 การทดสอบวัดค่าจากโปรแกรม LabVIEW

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการพัฒนาโปรแกรมสำหรับทดสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นเพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจึงได้ดำเนินการตรวจสอบผลการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากโปรแกรมและเปรียบเทียบกับผลการวัดจากออสซิลโลสโคป โดยในการตรวจสอบผลการเปรียบเทียบได้แสดงผลการเปรียบเทียบได้แก่การเปรียบเทียบค่าแรงดันและค่ากระแสแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ออกมาจากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ซึ่งผลการเปรียบเทียบได้แก่การเปรียบเทียบค่าแรงดันและค่ากระแสแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ออกมาจากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 4.17 ผลการทดสอบรูปคลื่นอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มชั่ววอกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



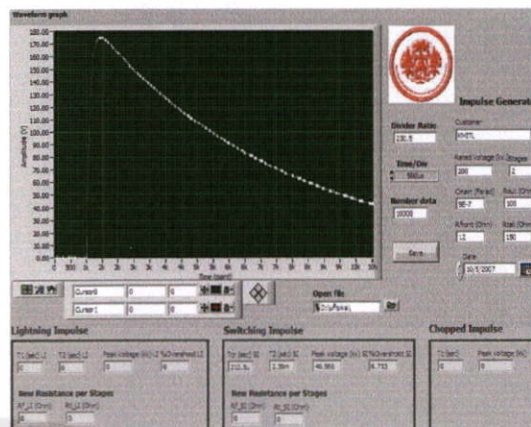
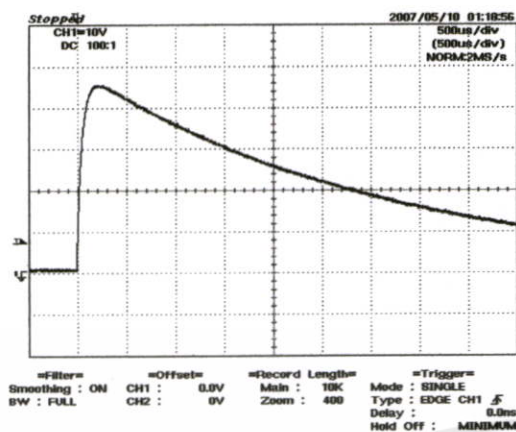
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบรูปคลื่นอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วลบ

ตารางที่ 4.1 ตารางความคลาดเคลื่อนผลวัดด้วยโปรแกรมของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วบวก

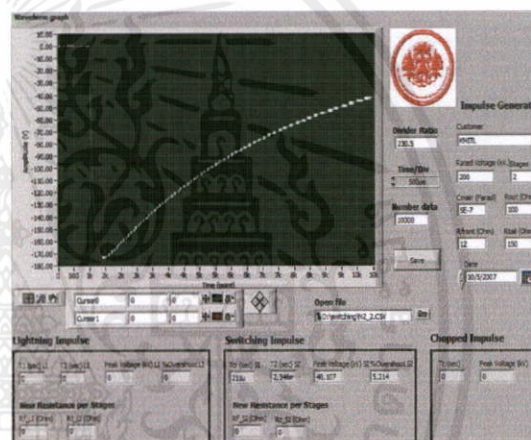
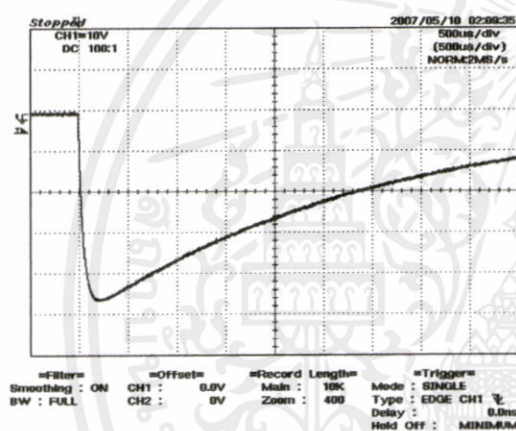
รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม LabVIEW	% ความคลาดเคลื่อน
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วบวก ครั้งที่ 1	T ₁	1.144 μs	1.186 μs	3.67
	T ₂	60.00 μs	59.72 μs	0.46
	Peak	10.049 kV	10.049 kV	0
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วบวก ครั้งที่ 2	T ₁	1.068 μs	1.069 μs	0.09
	T ₂	61.70 μs	62.17 μs	0.76
	Peak	40.337 kV	40.568 kV	0.57
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วบวก ครั้งที่ 3	T ₁	1.068 μs	1.052 μs	1.50
	T ₂	64.50 μs	64.07 μs	0.66
	Peak	80.444 kV	80.214 kV	0.28

ตารางที่ 4.2 ตารางความคลาดเคลื่อนผลวัดด้วยโปรแกรมของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วลบ

รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม LabVIEW	% ความคลาดเคลื่อน
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วลบ ครั้งที่ 1	T ₁	1.035 μs	1.096 μs	5.89
	T ₂	64.30 μs	59.97 μs	6.73
	Peak	-10.400 kV	-10.787 kV	3.72
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วลบ ครั้งที่ 2	T ₁	0.985 μs	1.069 μs	8.53
	T ₂	66.20 μs	64.37 μs	2.76
	Peak	-40.337 kV	-41.490 kV	2.86
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วลบ ครั้งที่ 3	T ₁	1.018 μs	1.069 μs	5.01
	T ₂	66.20 μs	64.98 μs	1.84
	Peak	-77.678 kV	-79.292 kV	2.07



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตชิงชั่ววอก



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตชิงชั่ววอก

ตารางที่ 4.3 ตารางความคลาดเคลื่อนผลวัดด้วยโปรแกรมของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิงชั่ววอก

รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม LabVIEW	% ความคลาดเคลื่อน
อิมพัลส์สวิตชิงชั่ววอก ครั้งที่ 1	T_{cr}	205 μ s	220 μ s	7.32
	T_2	2,315 μ s	2,314 μ s	0.04
	Peak	10.372 kV	10.510 kV	1.33
อิมพัลส์สวิตชิงชั่ววอก ครั้งที่ 2	T_{cr}	210 μ s	210 μ s	0
	T_2	2,380 μ s	2,390 μ s	0.42
	Peak	40.107 kV	40.568 kV	1.15
อิมพัลส์สวิตชิงชั่ววอก ครั้งที่ 3	T_{cr}	210 μ s	222 μ s	5.71
	T_2	2,385 μ s	2,412 μ s	1.13
	Peak	78.370 kV	78.831 kV	0.59

ตารางที่ 4.5 ตารางความคลาดเคลื่อนผลวัดด้วยโปรแกรมของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม LabVIEW	% ความคลาดเคลื่อน
อิมพัลส์รูปคลื่นตัด หัวบวก	T_c	2.30 μ s	2.22 μ s	3.47
	Peak	14.383 kV	14.383 kV	0
อิมพัลส์รูปคลื่นตัด หัวลบ	T_c	4.00 μ s	4.05 μ s	1.25
	Peak	-18.901 kV	-18.808 kV	0.49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

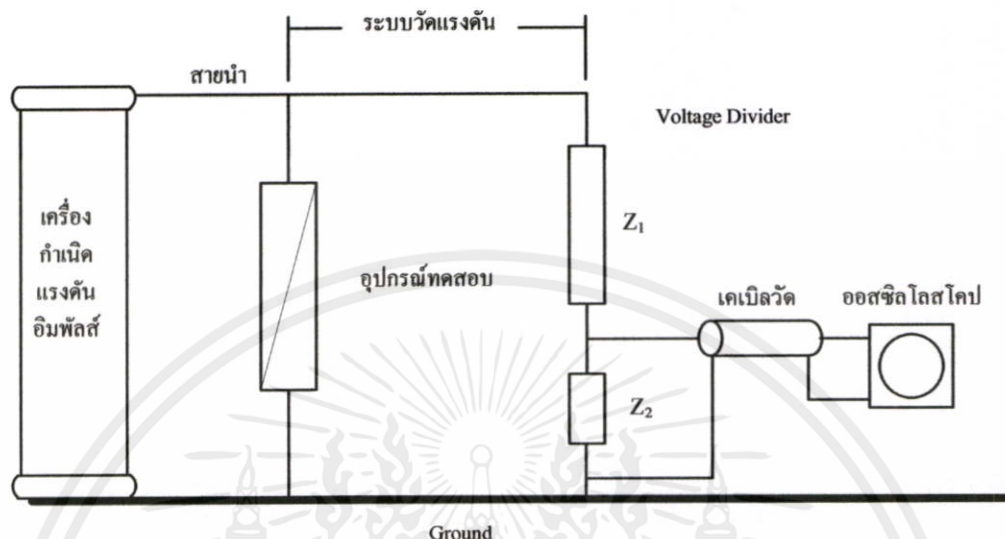
วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามามีใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ ทั้งนี้เพื่อลดความผิดพลาดอันอาจเกิดจากการวัดและการคำนวณด้วยวิธีเดิม โดยเริ่มจากการสร้างโมเดลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้น โดยใช้โปรแกรม OrCAD ในการจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งใช้ชื่อว่า “Passoni & Villa Modeling 200 kV.” เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริงจากออสซิลโลสโคปและศึกษาการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รวมทั้งปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นรวมทั้งการนำผลที่ได้จากการคำนวณการปรับค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาทำการตรวจสอบเพื่อใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบไม่ได้ตามมาตรฐาน

อีกส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์คือการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม LabVIEW โดยใช้ชื่อว่า “KMITL Testing Impulse Voltage” สำหรับใช้แสดงผลการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน และนำผลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนั้นมาทำการเปรียบเทียบความแตกต่างกับผลการวัดค่าจริงที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ซึ่งในที่นี้ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากบริษัท ABB (ประเทศไทย) จำกัด ในส่วนการเปรียบเทียบกันระหว่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจาก LabVIEW กับ ค่าที่วัดจริงได้ในอุตสาหกรรมนั้นจะทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มทั้งชั่วบวก ชั่วลบ และแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นคัต

คุณลักษณะอีกประการหนึ่งของ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้คือ โปรแกรมนี้สามารถที่จะคำนวณหาค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานคือเมื่อโปรแกรมได้ทำการคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มาแล้ว (เมื่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่ได้มาตรฐาน) จะทำการสร้างองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ตามค่าที่โปรแกรมคำนวณออกมาได้ขึ้นมาใหม่ สำหรับนำองค์ประกอบนั้นไปทำการทดสอบใช้งานกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จริง และทำการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ใหม่ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบผลเพื่อพิสูจน์ว่าค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่โปรแกรมคำนวณออกมานั้นสามารถทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบได้ตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการทดสอบทั้งในส่วนของการจำลองการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และโปรแกรมที่ได้ดำเนินการพัฒนาขึ้น ได้แก่

Impulse Generator ของ Passoni & Villa 200 kV. ออสซิลโลสโคป ของ Yokogawa รุ่น DL-1520

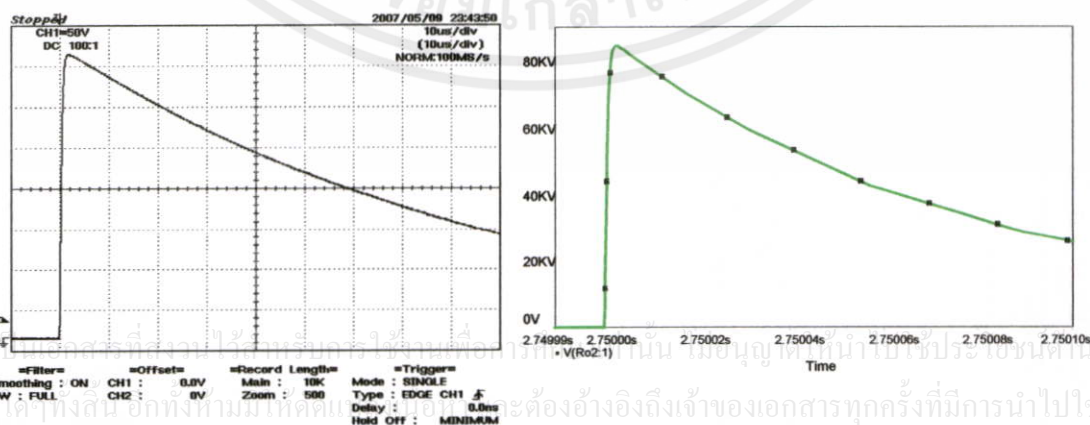
ในการวัดและบันทึกข้อมูล และ Impulse Analyzing System ของ Haefely Test AG ทั้งนี้ในการดำเนินการทดสอบได้ยึดตามมาตรฐาน IEC60060-1 โดยวงจรที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังรูปที่ 5.1



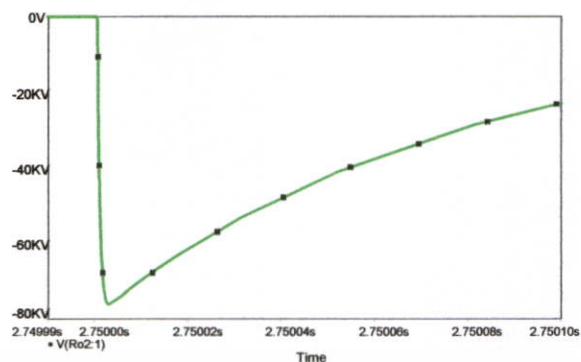
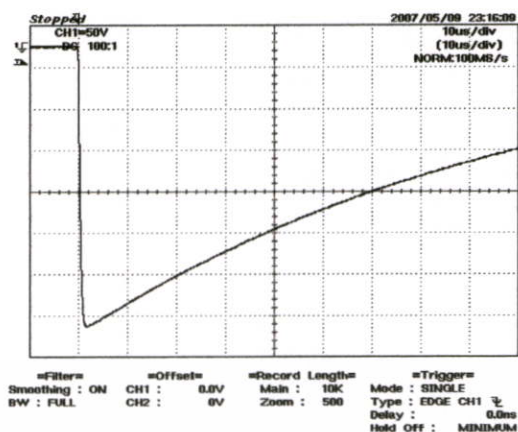
รูปที่ 5.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์

5.2 ผลการทดสอบการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากโปรแกรม OrCAD

ในการจำลองการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทั้งในส่วนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มและแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งนั้นใช้หลักการที่ว่ายึดการรักษาระดับแรงดันที่ทำการทดสอบที่มีความใกล้เคียงกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์กันระหว่างผลที่ได้จากการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จริงจากออสซิลโลสโคปและผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการจำลองสร้างแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 5.2 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มชั่วบวระหว่างผลการวัดจริงและผลการจำลอง



รูปที่ 5.3 รูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้ารูปคลื่นเต็มขั้วลบระหว่างผลการวัดจริงและผลการจำลอง

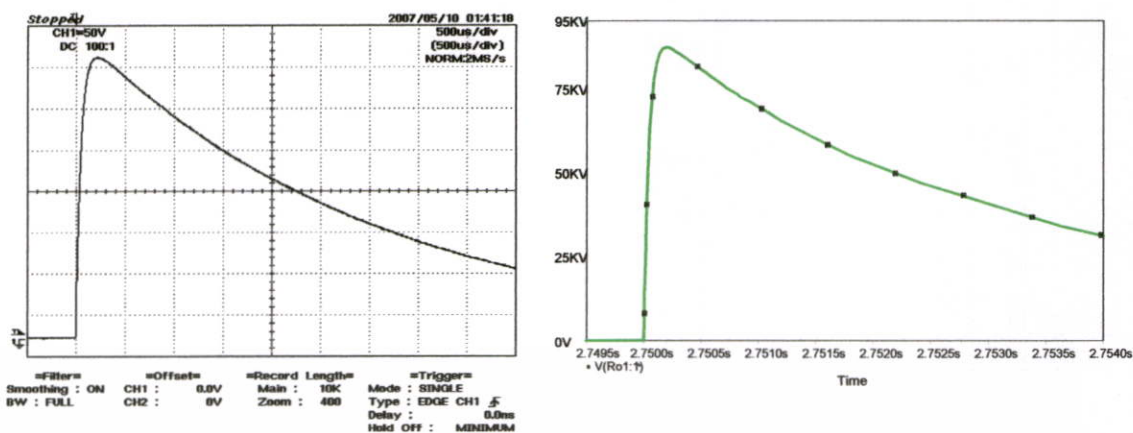
ตารางที่ 5.1 ตารางความคลาดเคลื่อนผลการจำลองแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก

รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม OrCAD	% ความคลาดเคลื่อน
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก ครั้งที่ 1	T ₁	1.144 μ s	1.140 μ s	0.35
	T ₂	60.00 μ s	57.40 μ s	4.33
	Peak	10.049 kV	10.038 kV	0.11
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก ครั้งที่ 2	T ₁	1.068 μ s	1.145 μ s	7.21
	T ₂	61.70 μ s	57.63 μ s	6.60
	Peak	40.337 kV	40.255 kV	0.20
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก ครั้งที่ 3	T ₁	1.068 μ s	1.168 μ s	9.36
	T ₂	64.50 μ s	57.68 μ s	10.58
	Peak	80.444 kV	80.011 kV	0.54

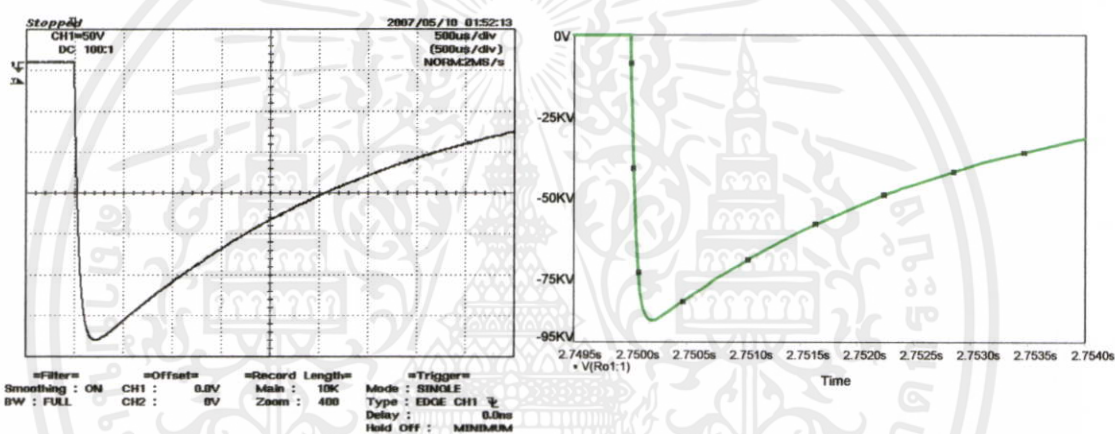
ตารางที่ 5.2 ตารางความคลาดเคลื่อนผลการจำลองแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ

รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม OrCAD	% ความคลาดเคลื่อน
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ครั้งที่ 1	T ₁	1.035 μ s	1.168 μ s	12.85
	T ₂	67.30 μ s	58.18 μ s	13.55
	Peak	-10.400 kV	-10.177 kV	2.14
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ครั้งที่ 2	T ₁	0.985 μ s	0.996 μ s	1.11
	T ₂	66.20 μ s	58.01 μ s	12.37
	Peak	-40.337 kV	-40.763 kV	1.05
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ครั้งที่ 3	T ₁	1.018 μ s	1.171 μ s	15.03
	T ₂	66.20 μ s	57.71 μ s	12.82
	Peak	-77.678 kV	-77.979 kV	0.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ



รูปที่ 5.4 รูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งชั่ววาระหว่างผลการวัดจริงและผลการจำลอง



รูปที่ 5.5 รูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งชั่ววาระหว่างผลการวัดจริงและผลการจำลอง

ตารางที่ 5.3 ตารางความคลาดเคลื่อนผลการจำลองแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตซ์ ชั่ววาระ

รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม OrCAD	% ความคลาดเคลื่อน
อิมพัลส์สวิตซ์ ชั่ววาระ ครั้งที่ 1	T_{cr}	205 μ s	185 μ s	9.75
	T_2	2,315 μ s	2,000 μ s	13.60
	Peak	10.372 kV	10.040 kV	3.20
อิมพัลส์สวิตซ์ ชั่ววาระ ครั้งที่ 2	T_{cr}	210 μ s	183 μ s	12.56
	T_2	2,380 μ s	1,910 μ s	19.75
	Peak	40.107 kV	40.297 kV	0.47
อิมพัลส์สวิตซ์ ชั่ววาระ ครั้งที่ 3	T_{cr}	210 μ s	183 μ s	12.86
	T_2	2,385 μ s	2,000 μ s	16.14
	Peak	78.370 kV	78.582 kV	0.27

ตารางที่ 5.4 ตารางความคลาดเคลื่อนผลการจำลองแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิง ขั้วลบ

รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม OrCAD	% ความคลาดเคลื่อน
อิมพัลส์สวิตชิง ขั้วลบ ครั้งที่ 1	T_{cr}	205 μ s	195 μ s	4.88
	T_2	2,310 μ s	2,030 μ s	12.12
	Peak	-10.275 kV	-10.070 kV	1.99
อิมพัลส์สวิตชิง ขั้วลบ ครั้งที่ 2	T_{cr}	210 μ s	187 μ s	10.95
	T_2	2,330 μ s	1,980 μ s	15.02
	Peak	-39.876 kV	-40.325 kV	1.12
อิมพัลส์สวิตชิง ขั้วลบ ครั้งที่ 3	T_{cr}	215 μ s	185 μ s	13.95
	T_2	2,385 μ s	2,010 μ s	15.72
	Peak	-78.370 kV	-78.652 kV	0.32

5.3 ขั้นตอนในการใช้งานของโปรแกรม

จากที่กล่าวมาแล้วว่าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดำเนินการจัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์
สำหรับการทดสอบจำนวน 2 โปรแกรม คือการจัดทำโมเดลเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
Passoni & Villa 200 kV. จากโปรแกรม OrCAD ซึ่งใช้ชื่อว่า “Passoni & Villa Modeling 200 kV.”
และ การพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลรูปคลื่นและวิเคราะห์ช่วงเวลาของรูปคลื่นแรงดันอิม
พัลส์ จากโปรแกรม LabVIEW ซึ่งใช้ชื่อว่า “KMITL Testing Impulse Voltage” โดยในการใช้งาน
นั้นทั้งสองโปรแกรมนี้นี้จะมีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นจึงขอสรุปขั้นตอนที่ใช้ในการทดสอบรูปคลื่น
แรงดันอิมพัลส์ดังนี้

1. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบแรงดันอิมพัลส์และต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบ
2. ป้อนรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานการทดสอบ
3. บันทึกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากออสซิลโลสโคป Yokogawa รุ่น DL-1520 ใน
ลักษณะของ Text file
4. นำข้อมูลที่ทำกรบันทึกในลักษณะ Text file มาเปิดในโปรแกรม KMITL Testing
Impulse Voltage ที่พัฒนามาจาก LabVIEW V. 7.1 และ Run โปรแกรม
5. โปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage จะแสดงผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และ
วัดค่าพารามิเตอร์ของช่วงเวลา เช่น T_1 , T_2 , T_c และค่ายอดคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่ทำ
การทดสอบผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์
6. ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบได้ตามมาตรฐานก็เป็นอันเสร็จสิ้น
การทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

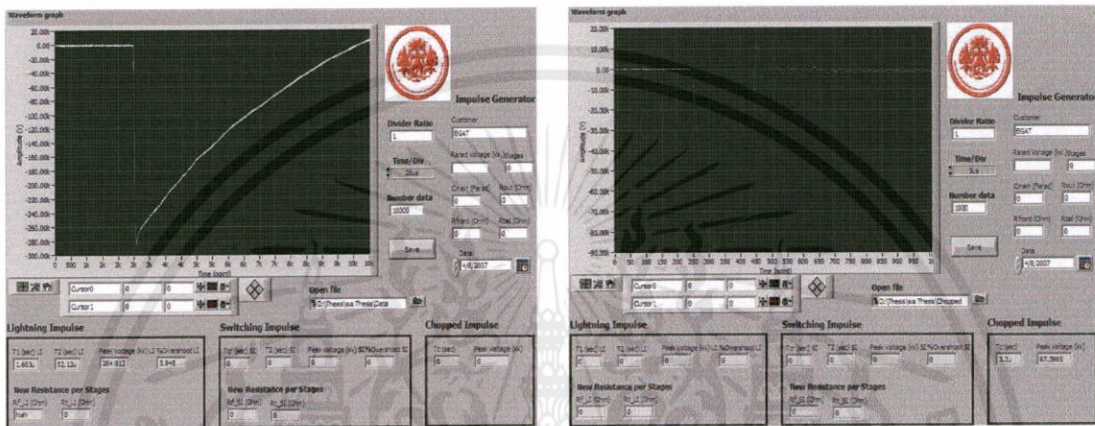
7. ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบไม่ได้ตามมาตรฐานโปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage จะทำการคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่เหมาะสม เช่น ค่า R_f หรือ R_s สำหรับนำไปปรับเปลี่ยนที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
8. นำค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage ไปป้อนที่โปรแกรม Passoni & Villa Modeling 200 kV. ที่เขียนขึ้นมาจากโปรแกรม OrCAD V. 9.0
9. โปรแกรม Passoni & Villa Modeling 200 kV. จะแสดงผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่จะได้ภายหลังจากการเปลี่ยนค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
10. ผู้ใช้งานทำการวัดค่าพารามิเตอร์ของช่วงเวลาจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่แสดงจากโปรแกรม Passoni & Villa Modeling 200 kV. โดยใช้ Cursors จากภายในโปรแกรม
11. เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของช่วงเวลาที่ต้องการแล้วจึงดำเนินการสร้างค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ก่อนนำไปใช้งานจริง

5.4 ผลการทดสอบวัดค่าและคำนวณค่าองค์ประกอบจากโปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการพัฒนาโปรแกรมสำหรับทดสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งใช้ชื่อว่า KMITL Testing Impulse Voltage โดยได้ดำเนินการทดสอบการทำงานของโปรแกรมเพื่อตรวจสอบความแม่นยำในการวัดค่าพารามิเตอร์ทั้งในส่วนของแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ารูปคลื่นเต็มและแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด เพื่อนำผลการวัดจากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์กับผลที่ได้จากการวัดจริงในอุตสาหกรรม อีกทั้งยังดำเนินการเพื่อตรวจสอบผลการคำนวณค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน โดยได้ดำเนินการทดสอบกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มไม่ได้ตามที่มาตรฐานกำหนดโดยมีค่าพารามิเตอร์ของหางคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มากกว่ามาตรฐาน จากนั้นจึงได้จัดทำค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นมาใหม่และนำไปติดตั้งที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แล้วจึงทำการวัดผลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ภายหลังจากได้ดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

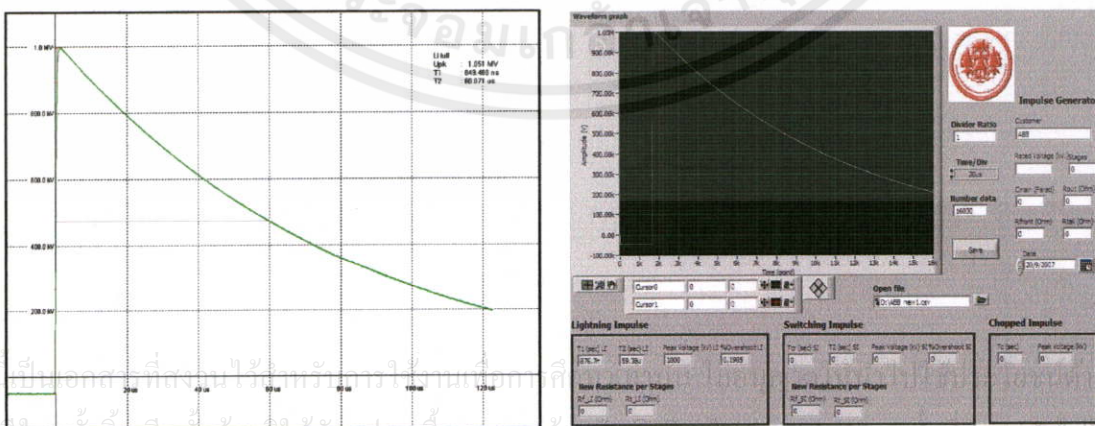
การออกแบบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ส่วนหนึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับฮาร์ดแวร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถบันทึกเป็นไฟล์ข้อมูลได้ โดยนำข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ดังกล่าวมาใช้งานกับโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น ดังนั้นในขั้นตอนแรกของการทดสอบโปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage จึงได้ทำการทดสอบการเปิดไฟล์ข้อมูลจากฮาร์ดแวร์ไมโครคอนโทรลเลอร์

แตกต่างจากออสซิลโลสโคป Yokogawa รุ่น DL-1520 ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยใช้ข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี) ซึ่งใช้ออสซิลโลสโคปของ Tektronix รุ่น TDS 3034D โดยในตัวอย่างนี้ไม่จำเป็นต้องป้อนค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับการคำนวณค่าองค์ประกอบใหม่เนื่องจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ดังกล่าวได้ตามมาตรฐานการทดสอบและมีเป้าหมายเพื่อทำการทดสอบการเปิดไฟล์ข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยมาจากออสซิลโลสโคปที่แตกต่างกัน

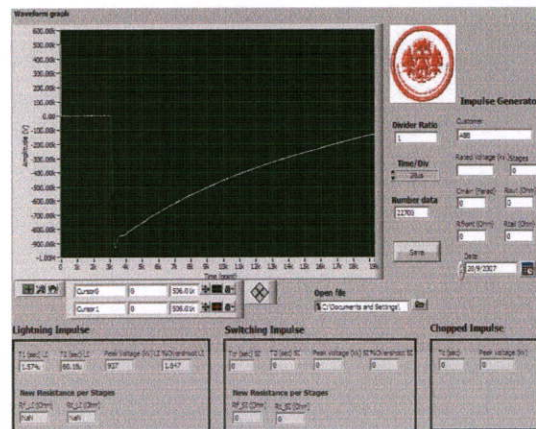
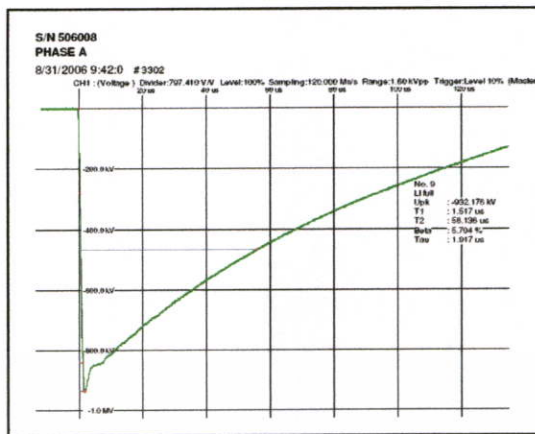


รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบเปิดไฟล์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ (ข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ)

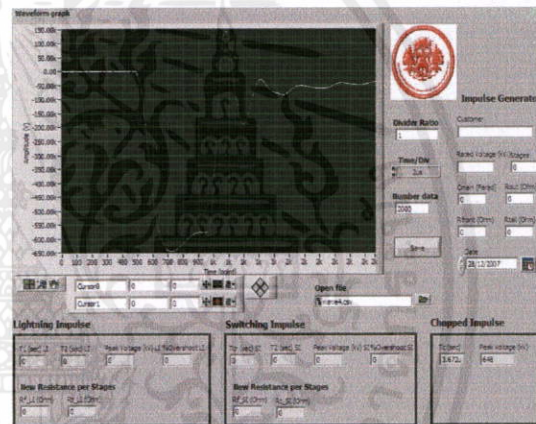
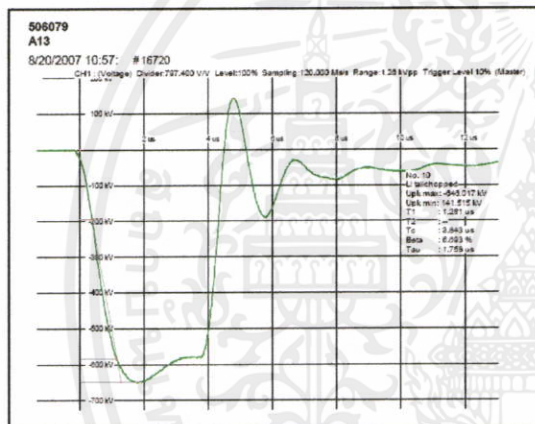
การทดสอบในลำดับต่อมาได้ดำเนินการทดสอบการใช้งานโปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage โดยใช้ข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากบริษัท ABB (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งใช้ Impulse Analyzing System ของ Haefely Test AG สำหรับการทดสอบเปิดไฟล์ข้อมูลและการตรวจสอบผลการวัดค่าช่วงเวลาของโปรแกรม



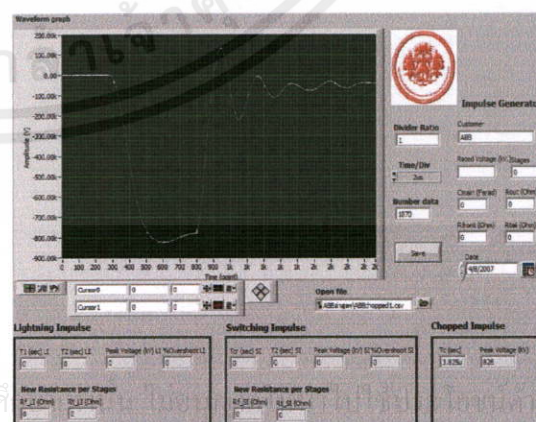
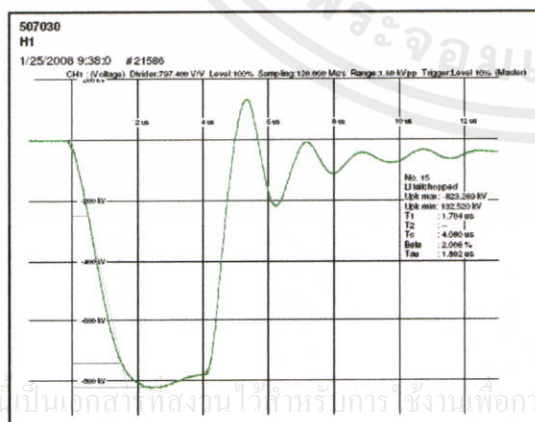
รูปที่ 5.7 รูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้ารูปคลื่นเต็มจั่วบวกของผลการทดสอบกับชุด Haefely Test AG



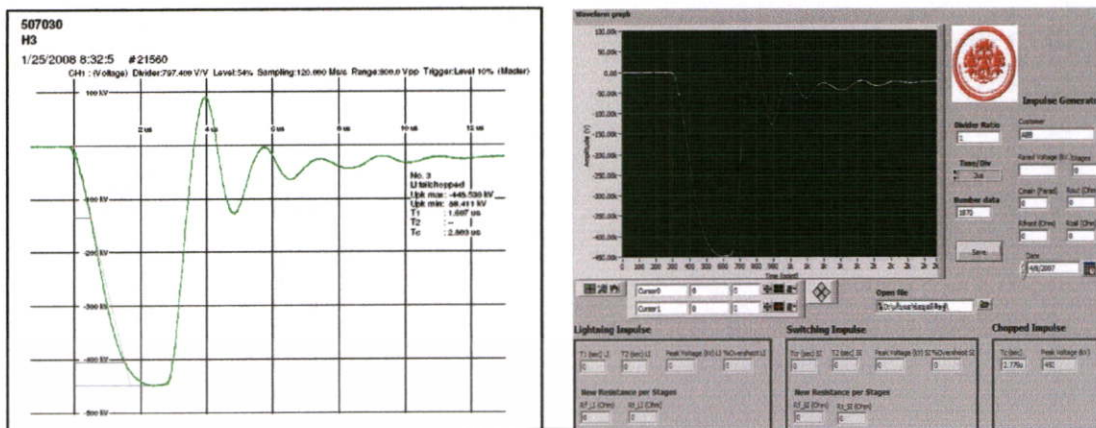
รูปที่ 5.8 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มช่วงของผลการทดสอบกับชุด Haefely Test AG



รูปที่ 5.9 รูปคลื่นอิมพัลส์รูปคลื่นตัดช่วงของผลการทดสอบกับชุด Haefely Test AG ครั้งที่ 1



รูปที่ 5.10 รูปคลื่นอิมพัลส์รูปคลื่นตัดช่วงของผลการทดสอบกับชุด Haefely Test AG ครั้งที่ 2



รูปที่ 5.11 รูปคลื่นอิมพัลส์รูปคลื่นตัดชั่วพลของผลการทดสอบกับชุด Haefely Test AG ครั้งที่ 3

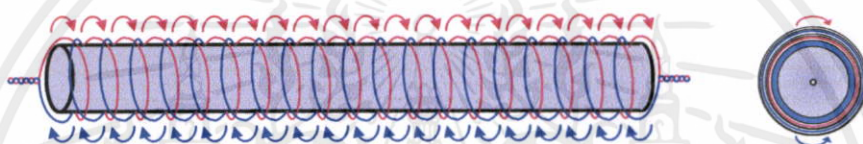
ตารางที่ 5.5 ตารางความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบ กับ Haefely Test AG

รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจาก Haefely Test AG	ผลจากโปรแกรม LabVIEW	% ความคลาดเคลื่อน
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็มชั่วพล	T_1	0.849 μ s	0.876 μ s	3.18
	T_2	60.071 μ s	59.38 μ s	1.16
	Peak	1,051 kV	1,000 kV	5.10
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็มชั่วพล	T_1	1.517 μ s	1.574 μ s	3.75
	T_2	56.136 μ s	60.16 μ s	7.16
	Peak	-932.176 kV	-937.00 kV	0.52
อิมพัลส์รูปคลื่นตัดชั่วพล ครั้งที่ 1	T_c	3.843 μ s	3.672 μ s	4.44
	Peak	-646.017 kV	-648.00 kV	0.31
อิมพัลส์รูปคลื่นตัดชั่วพล ครั้งที่ 2	T_c	4.080 μ s	3.825 μ s	6.25
	Peak	-823.269 kV	-826.00 kV	0.33
อิมพัลส์รูปคลื่นตัดชั่วพล ครั้งที่ 3	T_c	2.803 μ s	2.779 μ s	0.85
	Peak	-448.538 kV	-450.00 kV	0.32

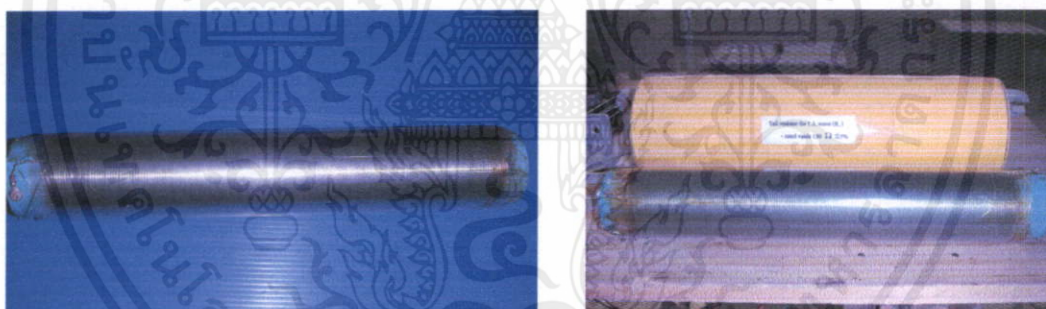
ในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ได้ออกแบบให้สามารถดำเนินการคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งจะดำเนินการเมื่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นั้นไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดสอบกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีค่าของทางคลื่นที่มากกว่ามาตรฐาน โดยโปรแกรมได้คำนวณค่าความต้านทานทางคลื่นต่อชั้นที่ควรนำไปเปลี่ยนแทนค่าความต้านทานเดิมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ คือ 111.8 Ω จากนั้นจึงดำเนินการจัดทำความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำขึ้นนั้น เมื่อดำเนินการแล้วเสร็จพบว่าค่าความต้านทานที่

จัดทำขึ้นมานั้นมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย คือมีค่า 113 Ω จึงได้ทดสอบนำความต้านทานดังกล่าวไปทดแทนความต้านทานทางคลื่นเดิม

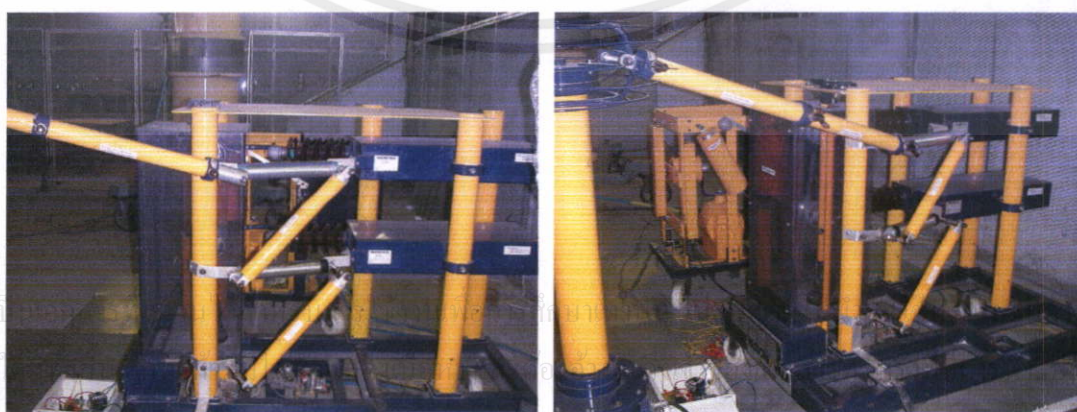
โดยหลักการสั้นๆของการจัดทำความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำนั้นก็คือการนำลวดความต้านทานชนิด Ni-Cr มาขนาบกัน 2 ชุด ตัวอย่างเช่นต้องการความต้านทาน 112 Ω ก็ทำการคำนวณความยาวของลวดความต้านทานที่ต้องใช้ในการพันรอบตลอดความยาวของฉนวน (PVC) เมื่อได้ความยาวของลวดความต้านทานแล้วจึงจัดหาลวดความต้านทานที่เมื่อมีความยาวเท่ากับที่คำนวณได้จะมีความต้านทาน 224 Ω จำนวน 2 เส้น จากนั้นจึงนำมาพันบนแกนฉนวนที่ละเส้นซ้อนทับกัน โดยมีทิศทางการพันที่ตรงข้ามกันเพื่อหักล้างผลของสนามแม่เหล็กซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำภายในวงจรทดสอบ ซึ่งในการพันระหว่างรอบแกนฉนวนและระหว่างชั้นต้องมีการฉนวนที่ดี จากนั้นจึงนำปลายของลวดความต้านทานมารวมกัน (หรือนำมาขนาบกันนั่นเอง)



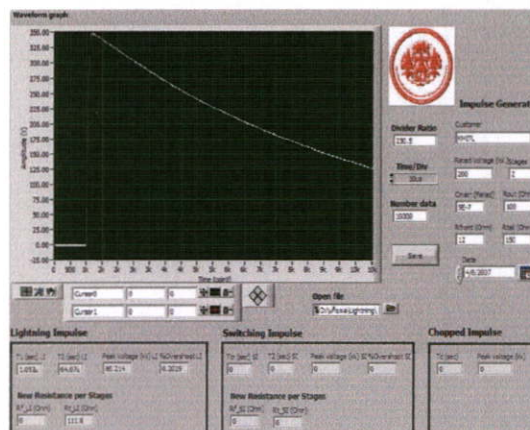
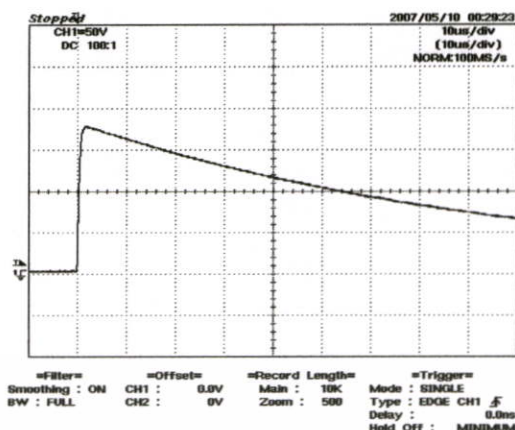
รูปที่ 5.12 หลักการพันความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ



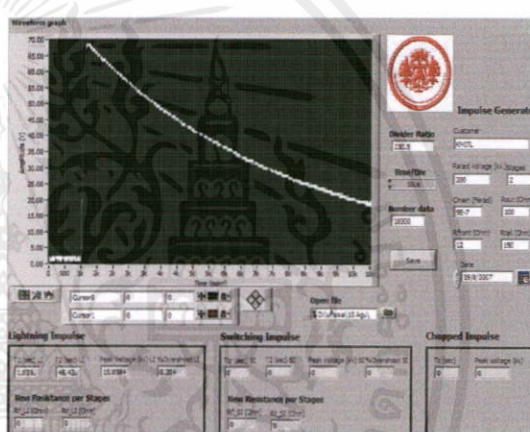
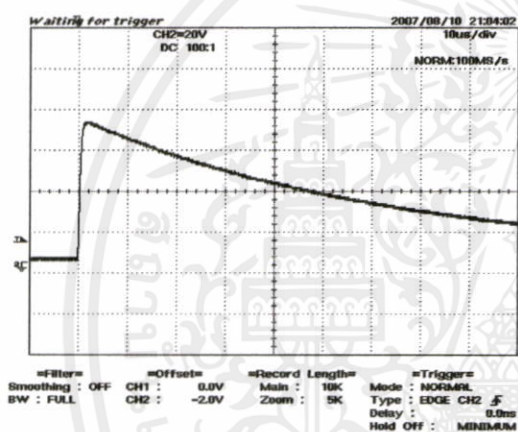
รูปที่ 5.13 ความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ



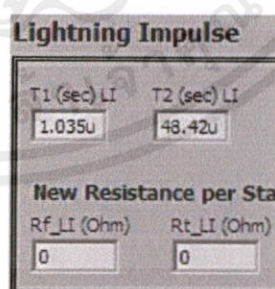
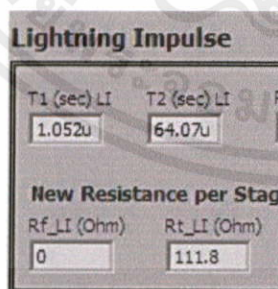
รูปที่ 5.14 การต่อความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มชั่ววอก กรณีรูปคลื่นไม่เป็นไปตามมาตรฐาน



รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มชั่ววอกเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานทางคลื่นเป็น 113 Ω ทั้ง 2 ตัว



รูปที่ 5.17 รูปขยายการแสดงผลก่อนและหลังการเปลี่ยนความต้านทานทางคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
โดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นสังกัดและต้องนำผลไปแจ้งหน่วยงานต้นสังกัด
โดยการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจาก LabVIEW (KMITL Testing Impulse Voltage) และได้นำ
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากการทดสอบดังกล่าวมาทำการทดสอบเปรียบเทียบความแตกต่างกับการ

แตกต่างจากค่าที่วัดจริง อย่างไรก็ตามสามารถใช้โปรแกรม Passoni & Villa Modeling 200 kV. เป็นแนวทางในการศึกษาและการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในเบื้องต้นได้และการจำลองผลของการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐาน รวมทั้งนำมาใช้ประกอบการเรียนการสอนในวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงเพื่อให้นักศึกษาหรือผู้ที่สนใจได้เห็นภาพพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

ในกรณีของการวัดรูปคลื่นจากโปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage จากผลการทดสอบซึ่งนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดค่าในอุตสาหกรรมจริงทั้งแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด โดยเปรียบเทียบกับชุด Impulse Analyzing System ของ Haefely Test AG พบว่ามีความแม่นยำในระดับที่น่าพอใจกล่าวคือมีความคลาดเคลื่อนในการวัดเพียงเล็กน้อย ในส่วนของการคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับนำไปปรับผลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นั้นจากการทดสอบพบว่ามีความถูกต้องพอสมควรซึ่งสามารถนำไปใช้ในการปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ อย่างไรก็ตามควรมีการทดสอบเปรียบเทียบผลการวัดรวมทั้งผลการคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มากกว่านี้เพื่อการยืนยันผลในการวัดค่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ และการคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

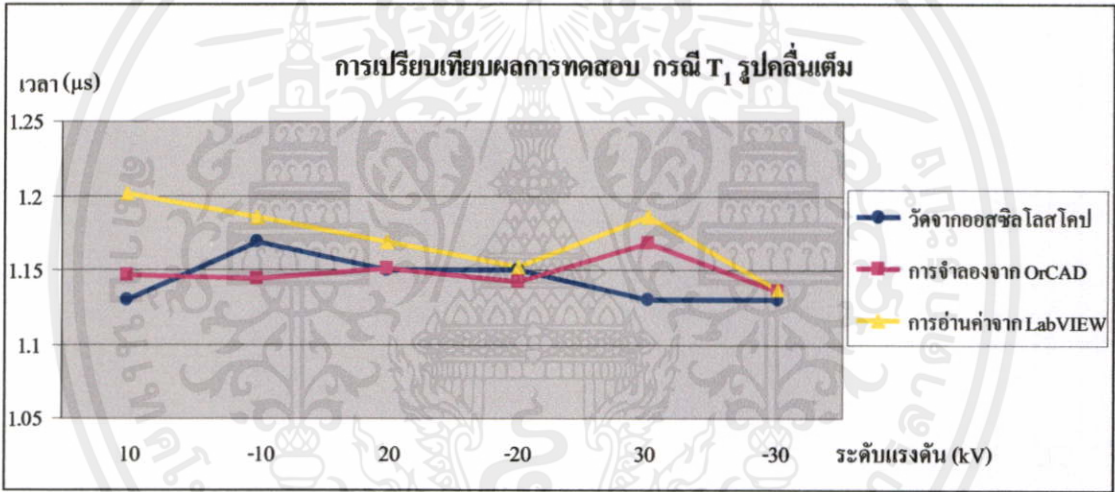
เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ จึงนำผลที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 กรณีมาดำเนินการทดสอบใหม่เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างกันของทั้ง 3 กรณี กล่าวคือ นำผลจากการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากโปรแกรม OrCAD ผลจากโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม LabVIEW และผลจากการวัดโดยตรงจากออสซิลโลสโคป มาทำการตรวจสอบถึงความคลาดเคลื่อนของผลที่ปรากฏออกมา โดยการดำเนินการทดสอบทั้งชั่วบวกและชั่วลบอีกทั้งใช้ระดับแรงดันอิมพัลส์ต่างกัน 3 ระดับแรงดัน ดังผลที่ปรากฏต่อไปนี้

ตารางที่ 5.7 ตารางการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ชั่วบวก

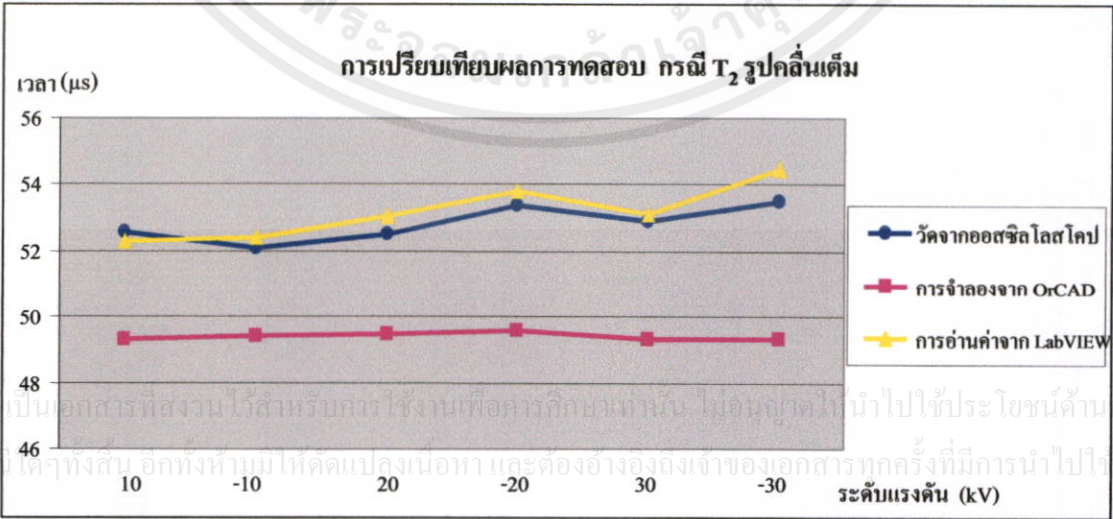
รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม OrCAD	ผลจากโปรแกรม LabVIEW
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ชั่วบวก ครั้งที่ 1	T ₁	1.169 μ s	1.144 μ s	1.186 μ s
	T ₂	52.10 μ s	49.42 μ s	52.43 μ s
	Peak	10.020 kV	10.212 kV	10.187 kV
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ชั่วบวก ครั้งที่ 2	T ₁	1.150 μ s	1.142 μ s	1.152 μ s
	T ₂	53.40 μ s	49.60 μ s	53.80 μ s
	Peak	20.050 kV	20.038 kV	20.162 kV
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ชั่วบวก ครั้งที่ 3	T ₁	1.130 μ s	1.135 μ s	1.136 μ s
	T ₂	53.50 μ s	49.30 μ s	54.47 μ s
	Peak	28.444 kV	28.421 kV	28.652 kV

ตารางที่ 5.8 ตารางการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ

รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม OrCAD	ผลจากโปรแกรม LabVIEW
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ครั้งที่ 1	T ₁	1.130 μs	1.147 μs	1.202 μs
	T ₂	52.60 μs	49.30 μs	52.31 μs
	Peak	-9.920 kV	-9.902 kV	-10.081 kV
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ครั้งที่ 2	T ₁	1.150 μs	1.151 μs	1.169 μs
	T ₂	52.50 μs	49.49 μs	53.08 μs
	Peak	-18.360 kV	-18.676 kV	-18.465 kV
อิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ครั้งที่ 3	T ₁	1.130 μs	1.168 μs	1.186 μs
	T ₂	52.90 μs	49.29 μs	53.13 μs
	Peak	-28.540 kV	-28.907 kV	-28.864 kV



รูปที่ 5.19 การเปรียบเทียบ T₁ ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม



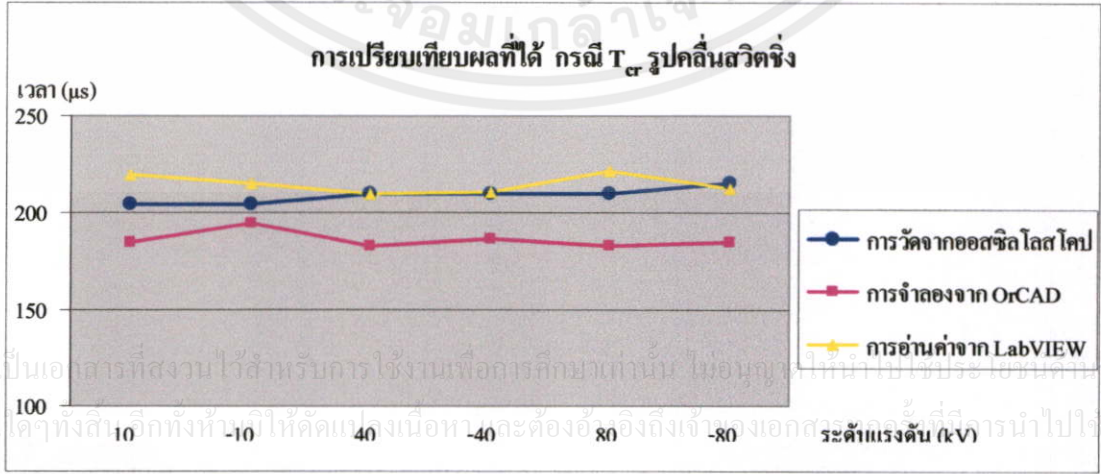
รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบ T₂ ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

ตารางที่ 5.9 ตารางการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิง ขั้วบวก

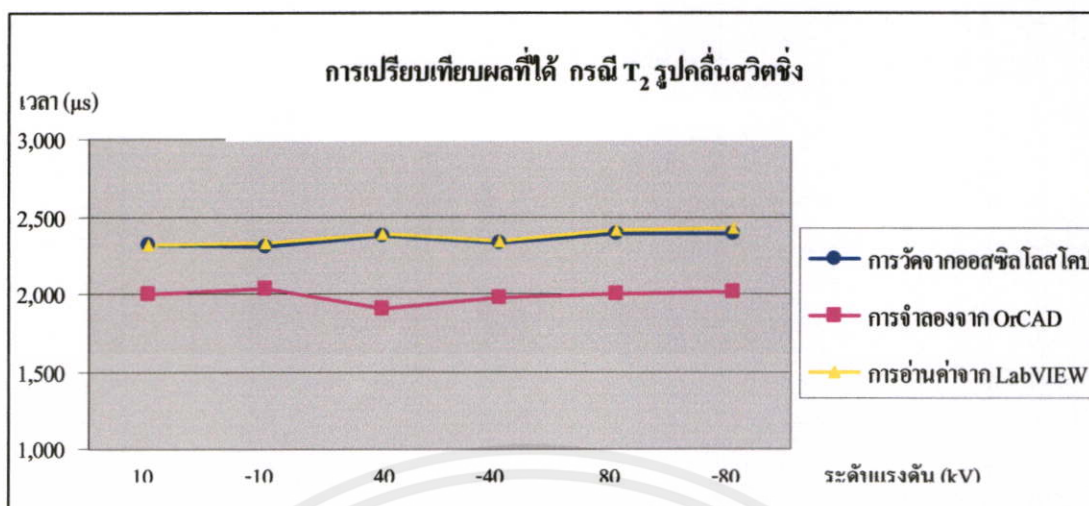
รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม OrCAD	ผลจากโปรแกรม LabVIEW
อิมพัลส์สวิตชิง ขั้วบวก ครั้งที่ 1	T_{cr}	205 μ s	185 μ s	220 μ s
	T_2	2,315 μ s	2,000 μ s	2,314 μ s
	Peak	10.372 kV	10.040 kV	10.510 kV
อิมพัลส์สวิตชิง ขั้วบวก ครั้งที่ 2	T_{cr}	210 μ s	183 μ s	210 μ s
	T_2	2,380 μ s	1,910 μ s	2,390 μ s
	Peak	40.107 kV	40.297 kV	40.568 kV
อิมพัลส์สวิตชิง ขั้วบวก ครั้งที่ 3	T_{cr}	210 μ s	183 μ s	222 μ s
	T_2	2,385 μ s	2,000 μ s	2,412 μ s
	Peak	78.370 kV	78.582 kV	78.831 kV

ตารางที่ 5.10 ตารางการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิง ขั้วลบ

รูปคลื่น	ค่าที่วัด	ผลจากการวัดจริง	ผลจากโปรแกรม OrCAD	ผลจากโปรแกรม LabVIEW
อิมพัลส์สวิตชิง ขั้วลบ ครั้งที่ 1	T_{cr}	205 μ s	195 μ s	215 μ s
	T_2	2,310 μ s	2,030 μ s	2,325 μ s
	Peak	-10.275 kV	-10.070 kV	-10.695 kV
อิมพัลส์สวิตชิง ขั้วลบ ครั้งที่ 2	T_{cr}	210 μ s	187 μ s	211 μ s
	T_2	2,330 μ s	1,980 μ s	2,346 μ s
	Peak	-39.876 kV	-40.325 kV	-40.107 kV
อิมพัลส์สวิตชิง ขั้วลบ ครั้งที่ 3	T_{cr}	215 μ s	185 μ s	213 μ s
	T_2	2,385 μ s	2,010 μ s	2,427 μ s
	Peak	-78.370 kV	-78.652 kV	-78.370 kV



รูปที่ 5.21 การเปรียบเทียบ T_{cr} ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิง



รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบ T_2 ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตช์

จากผลการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าเวลาของทั้ง 3 กรณี พบว่าการวัดรูปคลื่นจากโปรแกรม LabVIEW (KMITL Testing Impulse Voltage) และการวัดจริงจากออสซิลโลสโคปนั้นมีความใกล้เคียงกันสูงพอสมควรแต่ที่ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนกันอยู่บ้างเนื่องจากลักษณะรูปคลื่นที่เก็บผลมานั้นมีสัญญาณรบกวนทำให้รูปคลื่นไม่เรียบเป็นเหตุให้การระบุตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนแต่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยการใส่วงจรกรอง (Filter circuit) เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกจากระบบการวัด ส่วนการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากโปรแกรม OrCAD (Passoni & Villa Modeling 200 kV.) นั้นผลการวัดค่าพารามิเตอร์ยังมีความคลาดเคลื่อนจากทั้ง 2 กรณีข้างต้น จากที่กล่าวมาแล้วว่าอาจสืบเนื่องจากค่าความละเอียดของเครื่องมือวัดของตัวโปรแกรมเองที่ซึ่งมีความละเอียดไม่เพียงพอซึ่งยังมีความหยาบอยู่มากรวมถึงปัจจัยเสริมต่างๆทางด้านองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีอยู่ซึ่งมิได้เป็นไปตามทฤษฎีทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนแต่หากมองโดยรวมแล้วความคลาดเคลื่อนดังกล่าวยังในเกณฑ์ที่พอยอมรับได้ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางในการดำเนินงานต่อไปได้ และสำหรับผลของการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ก็มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ดำเนินงานทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

การทดสอบแรงดันอิมพัลส์เป็นการทดสอบที่มีความละเอียดและค่อนข้างซับซ้อนทั้งในการวิเคราะห์ผลการทดสอบเนื่องจากมีปัจจัยมากมายที่ทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนรวมถึงวิธีในการแก้ปัญหาในกรณีที่ผลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งต้องใช้บุคลากรที่มีความชำนาญและประสบการณ์ที่สูง อีกทั้งการเตรียมการแก้ปัญหาอาจมีค่าใช้จ่ายที่สูง จากงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาพบว่า การนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์นั้นยังอยู่ในวงที่ค่อนข้างจำกัดหรือมีการทำงานที่ยังไม่ครอบคลุมกระบวนการทั้งหมดตามที่ต้องการ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการดำเนินงานเพื่อหาวิธีในการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้งานและครอบคลุมกระบวนการทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ โดยเริ่มจากการจัดทำโมเดลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ซึ่งใช้โปรแกรม OrCAD ที่ชื่อว่า Passoni & Villa Modeling 200 kV. สำหรับใช้ในการจำลองการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และตรวจสอบผลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และอีก โปรแกรมหนึ่งคือการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการทดสอบแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ที่ชื่อว่า KMITL Testing Impulse Voltage ซึ่งใช้ในการแสดงผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และวัดค่าพารามิเตอร์ของช่วงเวลาต่างๆตามมาตรฐานรวมทั้งค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ อีกทั้งในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่ได้มาตรฐาน โปรแกรมจะคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องปรับเปลี่ยนเพื่อให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งการทำงานของทั้ง 2 โปรแกรมจะต้องมีความสัมพันธ์กัน

สำหรับหลักในการดำเนินการวิจัยนั้นได้จัดทำโมเดลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จากโปรแกรม OrCAD สำหรับจำลองการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยการป้อนค่าองค์ประกอบของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งโปรแกรมจะสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากค่าตัวแปรต่างๆที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม ดังนั้นจึงทราบได้ว่าหากปรับเปลี่ยนองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แล้วรูปคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะใด ซึ่งสามารถนำมาใช้ในกรณีที่ต้องการทราบผลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ก่อนที่จะมีการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ อีกทั้งโปรแกรมการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นี้ยังสามารถแยกการวิเคราะห์ตามส่วนต่างๆของวงจรการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้จึงเหมาะสำหรับ

การศึกษาการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ของนักศึกษาหรือผู้ที่สนใจซึ่งจะสามารถเข้าใจได้โดยง่าย เนื่องจากสามารถเลือกที่จะดูผลของการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากส่วนใดของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ก็ได้รวมทั้งผลขององค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และผลจากวัสดุทดสอบที่ส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างได้ ซึ่งจะเห็นภาพการสร้างแรงดันอิมพัลส์ในแต่ละส่วนของวงจรได้อย่างชัดเจน แต่ข้อจำกัดของการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นี้คือสามารถนำมาใช้ได้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ Passoni & Villa รุ่น GTU 200 kV.- 5 kJ เท่านั้น

อีกส่วนหนึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ โดยการเขียนโปรแกรมจาก LabVIEW ซึ่งโปรแกรมการทดสอบแรงดันอิมพัลส์นี้ใช้ในการแสดงผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ และการวัดค่าพารามิเตอร์โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 อีกทั้งในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่ได้มาตรฐาน โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จะทำการคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับนำไปทำการปรับค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งโปรแกรมจะรับข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาจากไฟล์ข้อมูล (Data file) ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทดสอบ โดยผู้ใช้งานจะต้องป้อนค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ เมื่อทำการรันโปรแกรมแล้ว โปรแกรมจะแสดงผลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นั้น หากว่ารูปคลื่นดังกล่าวไม่ได้มาตรฐานที่กำหนด โปรแกรมจะคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งผลการคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นี้สามารถนำไปตรวจสอบผลเบื้องต้นในการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบกับโปรแกรมจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากโปรแกรม OrCAD เพื่อความรอบคอบและความถูกต้องก่อนดำเนินการสร้างค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จริง

จากข้อมูลการทดสอบที่ได้กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์มาเป็นลำดับแล้วนั้นสามารถสรุปเป็นประเด็นต่างๆได้ดังนี้ คือ การจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากโปรแกรม OrCAD สามารถใช้งานได้ดีในระดับหนึ่ง โดยความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้มาจากโปรแกรมเมื่อเปรียบเทียบกับการวัดจากออสซิลโลสโคปนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างอย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่ได้มาตรฐานนั้นพบว่ามีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอาจใช้โปรแกรมดังกล่าวเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาคณิตที่รูปคลื่น

แรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบไม่ได้มาตรฐาน โดยมีความสะดวกและรวดเร็วซึ่งเป็นประโยชน์ในการคำนวณค่าองค์ประกอบในการดำเนินการทดสอบจริงต่อไป

สำหรับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาจากโปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์นั้นจากการทดสอบเปรียบเทียบกับการวัดในอุตสาหกรรมจริงพบว่ามีความแม่นยำที่สูงพอสมควรซึ่งจะช่วยให้การปฏิบัติงานทดสอบแรงดันอิมพัลส์จริงมีความถูกต้อง รวดเร็ว ลดปัจจัยเสี่ยงในกระบวนการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่อาจมีความผิดพลาดได้และที่สำคัญคือในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่ได้มาตรฐาน โปรแกรมสามารถคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับนำไปปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งการคำนวณค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่ได้มาตรฐานสามารถใช้งานได้จริงแต่ยังมีความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อยเนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณมิได้คิดผลของความเหนี่ยวนำภายในวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เนื่องจากหาค่าความเหนี่ยวนำดังกล่าวเป็นการยากที่จะหาค่าได้อย่างแม่นยำ โดยรวมแล้วการคำนวณค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานั้นทำให้มีความรวดเร็วและประหยัดทรัพยากรในการจัดทำค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีที่ต้องแก้ปัญหาจากการที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่ได้มาตรฐาน จากการดำเนินงานที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ในขั้นต้น

6.2 สรุปขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม

ขั้นตอนในการใช้งานโปรแกรมของวิทยานิพนธ์นี้

1. เตรียมการทดสอบโดยการต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ให้เรียบร้อย
2. ป้อนรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
3. บันทึกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากออสซิลโลสโคปในลักษณะของ Text file
4. นำข้อมูลที่ทำกรบันทึกจากออสซิลโลสโคปมาเปิดในโปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage และ Run โปรแกรม
5. โปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage จะแสดงผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และวัดค่าพารามิเตอร์ของช่วงเวลาและค่ายอดคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์
6. ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบได้ตามมาตรฐานก็เสร็จสิ้นการทำงานของโปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage
7. ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบไม่ได้ตามมาตรฐานโปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage จะทำการคำนวณค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่เหมาะสม สำหรับนำไปเปลี่ยนที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เป็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

8. นำค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม KMITL Testing Impulse Voltage ไปป้อนค่าดังกล่าวที่โปรแกรม Passoni & Villa Modeling 200 kV.
9. โปรแกรม Passoni & Villa Modeling 200 kV. จะแสดงผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่จะได้ภายหลังจากมีการเปลี่ยนค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
10. ผู้ใช้งานวัดค่าพารามิเตอร์ของช่วงเวลาจากรูปคลื่นและค่ายอดคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่แสดงจากโปรแกรม Passoni & Villa Modeling 200 kV. โดยใช้เครื่องมือวัดจากภายในโปรแกรม
11. เมื่อตรวจสอบแล้วว่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ดังกล่าวได้ตามที่มาตรฐานกำหนดจึงดำเนินการสร้างค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อนำไปเปลี่ยนที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

6.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการที่ได้ดำเนินการใช้โปรแกรม OrCAD ในการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และการพัฒนาโปรแกรมสำหรับวัดและวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากโปรแกรม LabVIEW จากที่ผ่านมานั้น พบประเด็นของปัญหาที่เป็นอุปสรรคในการดำเนินงานซึ่งส่งผลต่อการทำงานของโปรแกรมดังกล่าวข้างต้น โดยสรุปดังนี้

1. ในกรณีการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ยังขาดความแม่นยำในส่วนของการทดสอบ สืบเนื่องมาจากข้อจำกัดในด้านความละเอียดในการใช้ Cursor ภายในตัวโปรแกรมสำหรับวัดผลรูปคลื่นและปัจจัยเสริมต่างๆ ที่มีได้เป็นไปตามทฤษฎี ตัวอย่างเช่นพฤติกรรมในการทำงานของแกปที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ซึ่งแตกต่างจากการนำอุปกรณ์จำพวกสวิตช์มาใช้ในโปรแกรมหรือการป้อนค่าองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ภายในโปรแกรมซึ่งแตกต่างจากค่าองค์ประกอบจริง เนื่องจากองค์ประกอบจริงอาจมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปเป็นเหตุให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อน
2. หากมองในภาพโดยรวมการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากโปรแกรม OrCAD สามารถนำมาเป็นแนวทางในการศึกษาเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ แต่หากมองในแง่ของรายละเอียดแล้วพบว่าผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควรเนื่องจากโปรแกรมมิได้ออกแบบมาสำหรับการจำลองได้ในทุกเงื่อนไขได้อีกทั้งความแตกต่างกันระหว่างค่าตัวแปรในทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติยังเป็นอุปสรรคในด้านความถูกต้องของข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม อีกทั้งการจำลองแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น

ดังนั้นมีความยากลำบากในการจำลองรูปคลื่นเนื่องจากการจำลองจุดที่รูปคลื่นตัดและพฤติกรรมภายหลังจากรูปคลื่นตัดมีปัจจัยต่างๆที่มีผลอย่างมากมาขในทางปฏิบัติจึงเป็นการยากที่จะจำลองรูปคลื่นในลักษณะดังกล่าว

3. ในส่วนของออสซิลโลสโคปที่นำมาใช้ในการปฏิบัติ นั้นยังมีผลในด้านความละเอียดของออสซิลโลสโคปในการวัดรูปคลื่น เนื่องจากค่าความละเอียดของออสซิลโลสโคปที่นำมาใช้งานนั้นสามารถตั้งความละเอียดในการวัดได้สูงสุดเป็นหน่วยทศนิยม 2 ตำแหน่งเป็นปัญหาอย่างมากโดยเฉพาะการวัดในส่วนของหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ซึ่งมีความชันของเส้นที่สูงมาก โดยแต่ละตำแหน่งในการเลื่อน Cursor นั้นมีผลอย่างมากในการตรวจวัดรูปคลื่นแม้ว่าจะใช้การ Zoom รูปคลื่นในการวัดแล้วก็ตามดังนั้นจากปัจจัยดังกล่าวเป็นเหตุให้ผลที่ได้จากการวัดจริงอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง
4. ในส่วนของการพัฒนาโปรแกรมการวัดและวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จาก Lab VIEW นั้นอุปสรรคในการดำเนินงานเป็นผลสืบเนื่องมาจากสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณค่าองค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้นได้คิดปัจจัยเสริมต่างๆที่เกิดขึ้นในการปฏิบัติงานจริงดังนั้นประสิทธิภาพความเที่ยงตรงในการคำนวณค่าองค์ประกอบอาจคลาดเคลื่อนบ้างแต่ยังอยู่ในข่ายที่รับได้
5. จากการที่ต้องการให้โปรแกรมมีความคล่องตัวในการใช้งาน โดยสามารถนำไปใช้กับข้อมูลจากออสซิลโลสโคปรุ่นใดๆก็ได้ นั้น ในบางครั้งการทำงานในการเปิดไฟล์ของโปรแกรมมีปัญหาเนื่องจากออสซิลโลสโคปแต่ละรุ่นมีการกำหนด Header file ที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่าในไฟล์จากออสซิลโลสโคปบางรุ่นที่มีปัญหาในการเปิดไฟล์นั้นสามารถนำข้อมูลมาปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับการทำงานของโปรแกรมได้แต่ทำให้ขาดความคล่องตัวและความยืดหยุ่นในการใช้งานจริง อย่างไรก็ตามปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการบันทึกข้อมูลใหม่และเลือกการบันทึกเป็นชนิด CSV หรือใช้จุดภาคเป็นตัวขึ้นในการเก็บข้อมูล
6. แกนของขนาดและเวลาที่แสดงในโปรแกรมจะแสดงจากจุดของข้อมูล (กรณีอัตโนมัติ) หากต้องการให้แสดงค่าตรงตามรูปคลื่นจำเป็นต้องตั้งตามค่าตัวคูณของแกนซึ่งจะทำให้มีปัญหาในกรณีที่รูปคลื่นมาจากออสซิลโลสโคปต่างรุ่นกันหรือโวลเตจดีไวเคอร์คนละตัวกัน
7. ในการดำเนินการจัดทำองค์ประกอบใหม่ในกรณีที่รูปคลื่นไม่เป็นไปตามมาตรฐานนั้น อุปสรรคในการดำเนินการคือราคาของลวดความต้านทานที่จะนำมาใช้สร้าง (ลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารความต้านทานชนิด Ni-Cr) นั้นมีราคาที่สูงมากและหาซื้อได้ยากในท้องตลาด โดยขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับข้อเสนอแนะหากมีการนำไปดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาโปรแกรมต่อไปนั้นควรมีการพัฒนาต่อไปเนื่องจากตัวโปรแกรม LabVIEW มีการพัฒนาอยู่ตลอด (มีการเปลี่ยน Version อยู่เสมอ) ซึ่งมีความง่ายและทันสมัยขึ้นอีกทั้งมีฟังก์ชันให้เลือกใช้งานที่มากขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปข้อเสนอแนะหากมีการพัฒนาต่อยอดได้ดังต่อไปนี้

1. ควรเพิ่มเติมขีดความสามารถของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถขยายการทดสอบออกไปในวงกว้างได้ เช่น ควรมีการเลือกมาตรฐานในการทดสอบได้หลากหลาย ควรมีการแสดงข้อมูลขั้นตอนการปฏิบัติงานในแต่ละมาตรฐาน ประกอบการทดสอบ ในกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดควรมีข้อมูลของแอมพลิจูดให้พิจารณาหารูปคลื่นดังกล่าวไม่เป็นไปตามมาตรฐาน หรืออาจจะมีการเพิ่มฟังก์ชันในการแสดงผลรูปคลื่นตามที่ป้อนค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
2. นำโปรแกรมมาพัฒนาต่อเพื่อใช้เป็นข้อมูลในลักษณะของ Data Logger เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์รูปคลื่น โดยนำมาใช้เกี่ยวเนื่องกับการจัดเก็บเป็นฐานข้อมูล
3. การทดสอบผลการคำนวณค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ควรมีกรณีที่ทดสอบมากกว่านี้เพื่อความเชื่อมั่นของตัวโปรแกรม
4. การหาฟังก์ชันในการระบุจุด Virtual Origin หรือจุดเริ่มต้นเสมือนที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งการระบุจุดนี้เป็นปัจจัยสำคัญในด้านความถูกต้องของการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
5. ควรมีวงจรกรองชนิดทำให้รูปคลื่นมีความเรียบเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนในการอ่านข้อมูลเนื่องจากในบางกรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจมีสัญญาณรบกวนผสมอยู่หรือเกิดจากการแกว่งของรูปคลื่น
6. หาวิธีในการกำจัดผลของ Header file ที่อาจเป็นอุปสรรคในการเปิดไฟล์ข้อมูลหรืออาจเปลี่ยนวิธีในการนำข้อมูลเข้ามาในโปรแกรมซึ่งอาจใช้การสื่อสารเป็นประเภทอื่น เช่นผ่านสาย USB หรือ สาย LAN เป็นต้น
7. ควรมีการนำโปรแกรมไปทดสอบกับซอฟต์แวร์ของมาตรฐานต่างๆ เช่น TDG (Test Data Generator) หรือซอฟต์แวร์ที่ผู้ผลิตเครื่องมือวัดต่างๆ ได้ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [2] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [3] ศรณรงค์ สุวรรณนารักษ์. “การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อหาพารามิเตอร์ของแรงดันทดสอบอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [4] ถิรพงศ์ กษิรวัฒน์. “การวิเคราะห์ข้อมูลและการควบคุมเครื่องมือวัดโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการทดสอบโดยแรงดันสูงอิมพัลส์ที่ 125 kV.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2538.
- [5] นิคม เพ็ชรรักษ์. “การทดสอบแรงดันสูงอิมพัลส์แบบอัดโน้มติควบคุมโดยไมโครโปรเซสเซอร์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2536.
- [6] วีระพันธ์ รังสีจิตรประภา. “ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบดิจิทัลสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.” รายงานผลการวิจัยทุนรัชดาภิเษกสมโภช, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2538.
- [7] ภาณุพงศ์ พินกฤษ, ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ไชยพร หล่อทองคำ “การจำลองการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เพื่อใช้ในการทดสอบและการศึกษา วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.” การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2548.
- [8] กิจไพบูรณ์ ชิวพันธุ์ศรี. การออกแบบแอปพลิเคชันในระบบกราฟิกด้วย LabVIEW. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2550.
- [9] เจริญ เพชรมณี. เรียนลัด LabVIEW. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2547.
- [10] IEC standard 60060-1. “High Voltage Test Techniques.” 1998.
- [11] IEC standard 1083-2. “Digital recorders for measurement in high voltage impulse test.” 1996.
- [12] Kuffel, E. et. al. **High Voltage Engineering Fundamentals.** 2nd Ed. Woburn : Butterworth-Heinemann. 2000.
- [13] M., Abdel Salam. **High Voltage Engineering Theory and Practice.** Assiut : Assiut University. 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ [13] M., Abdel Salam. **High Voltage Engineering Theory and Practice.** Assiut : Assiut University. 1990.

- [14] Hugh, Ryan. **High voltage engineering and testing.** 2nd Ed. London : Institution of Electrical Engineering. 2001.
- [15] Kind, D. and Feser, K. **High-Voltage Test Techniques.** 2nd Ed. New Delhi : Vieweg/SAB Publications. 1999.
- [16] Adolf J.Schwab. **High Voltage Measurement Techniques.** Massachusetts : The M.I.T. Pres. 1972.
- [17] McComb T., Kuffel J., Malewski R. and Schon K. "Qualifying an Impulse Digitizer for Measurements in HV Impulse Tests." IEEE Tran.Power Delivery., July. 1990.
- [18] McComb T. and Lagnese J. "Calculating the Parameters of Full Lightning Impulse Using Model-based Curve Fitting." IEEE Tran.Power Delivery., October. 1991.
- [19] Li M., Kuffel J. and Janischewskyj W. "Exponential Fitting Algorithms for Digitally Recorded HV Impulse Parameter Evaluation." IEEE Tran.Power Delivery., October. 1993.
- [20] Zhang Y. and Tonello O. "Computer Controlled Impulse Test & Measurement System." IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Brussels, Belgium, June, 1996.
- [21] Garnacho F. and et. al. "Evaluation Procedures for Lightning Impulse Parameters in Case of Waveforms with Oscillations and/or An Overshoot." IEEE Tran.Power Delivery., April. 1997.
- [22] Zucca M., Sardi A. and Saracco O. "Modelling HV Reference Dividers for Lightning Impulse." High Voltage Engineering Symposium, London, August, 1999.
- [23] Brede A., Werle P., Gockenbach E. and Borsi H. "A New Method of Determining the Mean Curve of Lightning Impulse According to IEC 60060-1." High voltage Engineering Symposium, London, August, 1999.
- [24] Berlijn S. and et al. "Today's Problems with the Evaluation Methods of Full Lightning Impulse Parameters as described in IEC 60060-1." High voltage Engineering Symposium, London, August, 1999.
- [25] Hackemack K., Werle P., Gockenbach E. and Borsi H. "A New Proposal for the Evaluation of Lightning Impulses." International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Xi'an, China, June, 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] Hallstrom J., Chekurov Y. and Martti M. "A Calculable Impulse Voltage Calibrator for Calibration of Impulse Digitizers." IEEE Tran.Instrumentation and Measurement., April. 2003.
- [27] Venkatesan S., Ranjan P. and Ashokaraju D. "A Comparative Study on Methods for Evaluation of Lightning Impulse Parameters." TENCON Asia-Pacific Region, Bangalore, India, October, 2003.
- [28] Meiners, S. "An impulse generator simulation circuit." Faculty of Electrical engineering University of Pittsburgh. 2002.
- [29] Suthar J., Laghari J. and Saluzzo T. "Usefulness of spice in high voltage engineering education." IEEE Trans. Power systems., August. 1991.
- [30] Furrer L., Kurz S. and Loppacher M. "Automatic Impulse Voltage Routine Testing of Distribution Transformer." High Voltage Engineering Symposium, London, August, 1999.
- [31] Teng J., Chan S., Lee J. and Lee R. "A LabVIEW Based Virtual Instrument for Power Analyzers." IEEE Tran.Instrumentation and Measurement., 2000.
- [32] Herniter, M. **Schematic Capture Using MicroSim PSpice.** New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 2000.
- [33] Travis, J. **LabVIEW for Everyone.** 2nd Ed. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 2002.
- [34] Wells, L. and Travis, J. **LabVIEW for Everyone.** 2nd Ed. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1997.
- [35] Wells, L. **The LabVIEW Student Edition User's Guide.** New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1994.
- [36] Essick, J. **Advance LabVIEW Labs.** New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 2002.
- [37] LabVIEW. "LabVIEW User manual." National Instruments. 2003.
- [38] LabVIEW. "LabVIEW Fundamentals." National Instruments. 2005.
- [39] OrCAD User guide, "OrCAD reference manual." Cadence Design Systems, Inc. 1998.
- [40] Instruction manual, "Impulse Generator type GTU 200 kV.- 5 kJ." Passoni & Villa, 1994.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

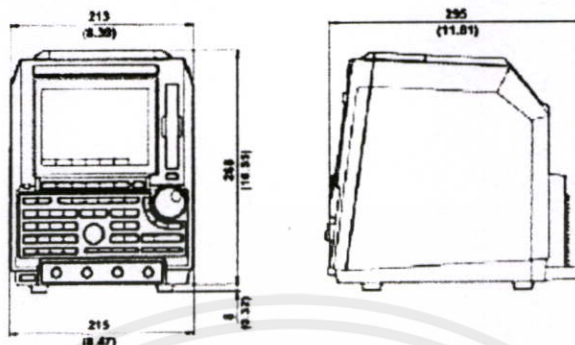


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของออสซิลโลสโคปที่ใช้งาน Oscilloscope YOKOGAWA DL1520

DIMENSIONS

Unit: mm (inch)



Vertical section

Number of input channels:

4 (DL1540/IDL1540L); 2 (DL1520/DL1520L)

Vertical resolution:

8 bits (normal) (25LSB/div)

9 bits (smoothing)

12 bits (after averaging with 256 weight)

Max sampling rate:

Normal

200 MS/s (when half of the number of available channels are in use)

100 MS/s (when all channels are in use) Equivalent time 20 GS/s

Effective storage frequency

(-3 dB):

Repetitive waveform

DC to 150 MHz*¹

Single shot waveform

DC to 80 MHz (When half of the number of available channels are in use)

DC to 40 MHz *² (When all channels are in use)

Sensitivity:

2 mV/div to 5 V/div (DL1520/DL1520L)

DC accuracy *⁴:100 mV/div $\pm$ (1.5% of 8 div + 1 LSB)1 mV/div $\pm$ (5% of 8 div + 1 LSB)Other ranges $\pm$ (2.5% of 8 div + 1 LSB)

Offset voltage accuracy:

1 m to 50 mV/div $\pm$ (2.5% of set value + 0.2 mV)100 m to 500 mV/div $\pm$ (1% of set value + 2 mV)1 to 5 V/div $\pm$ (2.5% of set value + 20 mV)

Interchannel isolation:

-40 dB (typical value *⁵ in the same range)

Max input voltage:

250 V (DC+ AC peak) (1 kHz max)

(CAT I & II, 177 Vrms)

Input impedance:

1 M Ω $\pm$ 1.5% (approx. 25 pF)

Input coupling:

AC/DC/GND

Horizontal section

Sweep time:

5 ns/div to 50 s/div

Time axis accuracy:

 $\pm$ (0.01% + 500 ps)*⁶

Max record length (DL1520L): 1 M words (1 channel use)

400 k word (2 channels use)

Max record length (DL1520): 20 k words (roll mode)

10 k words (other mode)

Screen update speed

1 channel in use:

Max 60 screens/s

All channels in use:

Max 60 screens/s

Display

CRT:

7-inch, raster scan, amber (540 x 432 dots)

Number of displayed traces: Max 8 traces (zoom mode) (DL1540/DL1540L)

(4 captured + 4 magnified) traces

Max 6 traces (zoom mode) (DL15201 DL1520L)
(2 captured + 2 magnified + 2Math) traces

Communication

GP-IB interface : Electrical and mechanical specifications: Conform to IEEE std. 488-1978

Protocol: Conforms to IEEE std 488.2-1987

RS-232-C interface : [RS-232-C interface unit (optional accessory) required for use with the DL1540 and the DL1540L]

Baud rate: 75,150,300,600,1200,2400,4800,9600,19200 bps

Centronics interface : [Available for the -C3 model of the DL1520 and the DL1520L]

Supported printer commands: ESC/P, LIPS3, PC-PR201, PCL5

SCSI interface : [SCSI interface unit (optional accessory) required for the DL1540 and the DL1540L.

Available for -C4 model of the DL1520L.]

Supported SCSI devices and conditions

HD drive: Drive formattable by the EZ-SCSI

MO drive: Up to 640MB type which is formattable by the EZ-SCSI

Zip drive: Iomega Zip drive compatible

Signal input/output

TRIG OUT TTL level

GOINO-GO evaluation output TTL level (from option box control connector)

GOINO-GO operation condition output TTL level (from option box control connector)

Calibration output: 1 kHz, 1 Vp-p, square wave

3.5-inch FDD

Types of supported disks: 640 KB, 720 KB, 1.2 MB, 1.44 MB

Format: MS-DOS

General specifications

Operation temperature range: 5 to 40°C

Operation humidity range: 20 to 85% RH (when not using the printer)

35 to 85% RH (when using the printer)

Supply voltage: 100 to 120 VAC/ 220 to 240 VAC

DL1540/DL1540L Automatically switched

DL1520/DL1520L Select from the above

Supply frequency: 50/60 Hz

Power consumption: 280 VA max

External dimensions: 215(W) x 268(H) x 295(D) mm

(Excluding projections)

Weight: Approx. 5 kg (DL1540 only)

Approx. 6 kg (DL1540L/DL1520/DL1520L main unit only)

*1: Between 5 V/div and 10 mV/div ranges.
For 5 mV/div: DC to 80 MHz. For 2 mV/div and 1 mV/div: DC to 20 MHz.

*2: Between 5 V/div and 5 mV/div ranges.
For 2 mV/div and 1 mV/div: DC to 20 MHz.

*3: 1 mV/div is realized by zooming of 2 mV/div.

*4: Standard operating conditions (23 ± 2°C, 55 ± 10% RH).
After 30 minutes warm up, and after calibration.

*5: A "typical" value is a representative or average value. It is not a strictly guaranteed value.

*6: Standard operating conditions (23 ± 2°C, 55 ± 10% RH).
After 30 minutes warm up.

*7: Continuous clock signal only.

*8: Supported by CH1 only.

*9: DL1540 only. มิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*10: DL1540L/DL1520/DL1520L only.

ข้อมูลทางเทคนิคโครงสร้างของชุดข้อมูล

Technical Information

Understanding the structure of Binary data (xxxxxxx.WVF) file created by the DL, AR series

1 - Outline

1-1: Objective of this Technical Information

This Technical Information explains the binary file structure of the DL series and the AR4400 / AR4800. The file structure is open to users and by understanding it, you can use or analyze the data. The content of this document is applicable to the following instruments.

DL1500 series (DL1540, DL1540L, DL1520, DL1520L)
DL2700, DL4100, DL4200, DL708, AR4400, AR4800

1-2: File Created upon Saving

When waveform data are saved in the BIN (binary) format in above instrument, two files are created either in the directly of DL_WAVE, DL_MISC or AR_WAVE with following extension:

XXXXXXXX.HDR
XXXXXXXX.WVF

Each file name and contents are shown below.

FILE: XXXXXXXX.HDR

NAME: ASCII HEADER FILE

CONTENTS: 1) PublicInfo (COMMON INFORMATION)

This part includes various information concerning the waveform data, such as the waveform data size, range ..., etc. When more than 4 trace information are included, multiple number of groups are generated.

2) PrivateInfo (INSTRUMENT-SPECIFIC INFORMATION)

This part include information specific to used instrument, such as firmware version.

3) MediaInfo (MEDIA INFORMATION)

This part is created if multiple number of media (e.g. FD) is used to save traces.

FILE: XXXXXXXX.WVF

NAME: WAVEFORM DATA FILE

CONTENTS: 1) Data Offset

This indicates the offset before the captured waveform data. The value can be found in the PublicInfo of the ASCII HEADER FILE.

2) Waveform data

The part contains captured waveform data.

3) Panel setting information

The part contains indispensable information to store the capture data back to the DL or AR series.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2-1: Example of ASCII Header File

- Example of Header File of the DL1500 series

//YOKOGAWA ASCII FILE FORMAT

```

$PublicInfo
FormatVersion      1.01
Model              DL1540
Endian             Big
DataFormat         Trace
GroupNumber        1
TraceTotalNumber   4
DataOffset         0

$Group1
TraceNumber        4
BlockNumber        1
TraceName          Ch1          Ch2          Ch3          Ch4
BlockSize          10032        10032        10032        10032
VResolution        1.56250e-04   3.12500e-03   6.25000e-04   1.56250e-05
VOffset            0.00000e+00    0.00000e+00    0.00000e+00    0.00000e+00
VDataType          IS2          IS2          IS2          IS2
VUnit              V            V            V            V
VPlusOverData      ?            ?            ?            ?
VMinusOverData     ?            ?            ?            ?
VIllegalData       -32768       -32768       -32768       -32768
VMaxData           32640        32640        32640        32640
VMinData           -32640       -32640       -32640       -32640
HResolution        1.00000e-06   1.00000e-06   1.00000e-06   1.00000e-06
HOffset            0.00000e+00    0.00000e+00    0.00000e+00    0.00000e+00
HUnit              s            s            s            s
Date               97/12/04      97/12/04      97/12/04      97/12/04
Time               16:40:33      16:40:33      16:40:33      16:40:33

$PrivateInfo
ModelVersion       1.33
MathBlockNo.       ?
FormMath           ?
DisplayPointNo.    6
DisplayBlockSize   10020
TriggerPointNo.    5000
PhaseShift         0            0            0            0
DCOffset           0.00000e+00    0.00000e+00    0.00000e+00    0.00000e+00
DCUnit            V            V            V            V
RefFileNumber      6
  
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• Example of Header File of the DL5100

//YOKOGAWA ASCII FILE FORMAT

\$PublicInfo

```
FormatVersion      1.01
Model              DL5100
Endian             Big
DataFormat         Block
GroupNumber        2
TraceTotalNumber   8
DataOffset         0
```

\$Group1

```
TraceNumber        4
BlockNumber        1
TraceName          CH1          CH2          CH3          CH4
BlockSize          4002         4002         4002         4002
VResolution        -6.2500000E-02  -6.2500000E-02  -6.2500000E-02  -6.2500000E-02
VOffset            8.0000000E+00  8.0000000E+00  8.0000000E+00  8.0000000E+00
VDataType          IU1          IU1          IU1          IU1
VUnit              V            V            V            V
VPlusOverData      0            0            0            0
VMinusOverData     255          255          255          255
VIllegalData       ?            ?            ?            ?
VMaxData           0            0            0            0
VMinData           255          255          255          255
HResolution        1.0000000E-08  1.0000000E-08  1.0000000E-08  1.0000000E-08
HOffset            -2.0000000E-05  -2.0000000E-05  -2.0000000E-05  -2.0000000E-05
HUnit              s            s            s            s
Date               93/03/15     93/03/15     93/03/15     93/03/15
Time               18:27:28     18:27:28     18:27:28     18:27:28
```

\$Group2

```
TraceNumber        4
BlockNumber        1
TraceName          CH5          CH6          CH7          CH8
BlockSize          4002         4002         4002         4002
VResolution        -6.2500000E-02  -6.2500000E-02  -6.2500000E-02  -6.2500000E-02
VOffset            8.0000000E+00  8.0000000E+00  8.0000000E+00  8.0000000E+00
VDataType          IU1          IU1          IU1          IU1
VUnit              V            V            V            V
VPlusOverData      0            0            0            0
VMinusOverData     255          255          255          255
VIllegalData       ?            ?            ?            ?
VMaxData           0            0            0            0
VMinData           255          255          255          255
HResolution        1.0000000E-08  1.0000000E-08  1.0000000E-08  1.0000000E-08
HOffset            -2.0000000E-05  -2.0000000E-05  -2.0000000E-05  -2.0000000E-05
HUnit              s            s            s            s
Date               93/03/15     93/03/15     93/03/15     93/03/15
Time               18:27:28     18:27:28     18:27:28     18:27:28
```

\$PrivateInfo

```
ModelVersion       1.22
DisplayPointNo     0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• Example of Header File of the DL4000 series

#YOKOGAWA ASCII FILE FORMAT

```

$PublicInfo
FormatVersion      1.01
Model              DL4100
Endian             Big
DataFormat         Trace
GroupNumber        1
TraceTotalNumber   4
DataOffset         0

$Group1
TraceNumber        4
BlockNumber        1
TraceName          Ch1          Ch2          Ch3          Ch4
BlockSize          10036        10036        10036        10036
VResolution        1.56250e-02  1.56250e-02  1.56250e-02  1.56250e-
VOffset            0.00000e+00  0.00000e+00  0.00000e+00  0.00000e-
VDataType          IS2          IS2          IS2          IS2
VUnit              V            V            V            V
VPlusOverData      ?            ?            ?            ?
VMinusOverData     ?            ?            ?            ?
VIllegalData       -32768        -32768        -32768        -32768
VMaxData           32736        32736        32736        32736
VMinData           -32736        -32736        -32736        -32736
HResolution        1.00000e-06  1.00000e-06  1.00000e-06  1.00000e-
HOffset            0.00000e+00  0.00000e+00  0.00000e+00  0.00000e-
HUnit              s            s            s            s
Date               94/10/23      94/10/23      94/10/23      94/10/23
Time               05:09:36      05:09:36      05:09:36      05:09:36

$PrivateInfo
ModelVersion
MathBlockNo.      ?
FormMath1         ?
FormMath2         ?
FormMath3         ?
FormMath4         ?
DisplayPointNo.   9
DisplayBlockSize  10020
TriggerPointNo.   4992
PhaseShift        0            0            0            0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• Example of Header File of the DL2700

#YOKOGAWA ASCII FILE FORMAT

\$PublicInfo

```
FormatVersion 1.01
Model DL2700
Endian Big
DataFormat Block
GroupNumber 2
TraceTotalNumber 8
DataOffset 0
```

\$Group1

```
TraceNumber 4
BlockNumber 1
TraceName CH1 CH2 CH3 CH4
BlockSize 1002 1002 1002 1002
VResolution 1.5625000E+00 1.5625000E+00 1.5625000E+00 1.5625000E+00
VOffset 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
VDataType IS1 IS1 IS1 IS1
VUnit V V V V
VPlusOverData 128 128 128 128
VMinusOverData -129 -129 -129 -129
VIllegalData ? ? ? ?
VMaxData 127 127 127 127
VMinData -128 -128 -128 -128
HResolution 5.0000000E-09 5.0000000E-09 5.0000000E-09 5.0000000E-09
HOffset -2.5000000E-06 -2.5000000E-06 -2.5000000E-06 -2.5000000E-06
HUnit s s s s
Date 97/12/04 97/12/04 97/12/04 97/12/04
Time 14:35:50 14:35:50 14:35:50 14:35:50
```

\$Group2

```
TraceNumber 4
BlockNumber 1
TraceName CH5 CH6 CH7 CH8
BlockSize 1002 1002 1002 1002
VResolution 1.5625000E+00 1.5625000E+00 1.5625000E+00 1.5625000E+00
VOffset 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
VDataType IS1 IS1 IS1 IS1
VUnit V V V V
VPlusOverData 128 128 128 128
VMinusOverData -129 -129 -129 -129
VIllegalData ? ? ? ?
VMaxData 127 127 127 127
VMinData -128 -128 -128 -128
HResolution 5.0000000E-09 5.0000000E-09 5.0000000E-09 5.0000000E-09
HOffset -2.5000000E-06 -2.5000000E-06 -2.5000000E-06 -2.5000000E-06
HUnit s s s s
Date 97/12/04 97/12/04 97/12/04 97/12/04
Time 14:35:50 14:35:50 14:35:50 14:35:50
```

\$PrivateInfo

```
ModelVersion 1.20
DisplayBlockSize 1002 1002 1002 1002 1002 1002 1002 1002
DisplayPointNo. 1 11 1 1 1 1 1
PhaseShift 0 00 0 0 0 0 0
PTraceName CH1 CH2 CH3 CH4 CH5 CH6 CH7 CH8
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• Example of Header File of the DL708

//YOKOGAWA ASCII FILE FORMAT

\$PublicInfo

FormatVersion	1.01
Model	DL700
Endian	Big
DataFormat	Block
GroupNumber	1
TraceTotalNumber	3
DataOffset	0

\$Group1

TraceNumber	3		
BlockNumber	10		
TraceName	CH1	CH2	CH3
BlockSize	1002	1002	1002
VResolution	6.2500000E-05	6.2500000E-03	6.2500000E
VOffset	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E
VDataType	IS2	IS2	IS2
VUnit	V	V	V
VPlusOverData	32768	32768	32768
VMinusOverData	-32769	-32769	-32769
VIllegalData	?	?	?
VMaxData	32767	32767	32767
VMinData	-32768	-32768	-32768
HResolution	5.0000000E-06	5.0000000E-06	5.0000000E
HOOffset	-2.5000000E-03	-2.5000000E-03	-2.5000000E
HUnit	s	s	s
Date1	97/12/04	97/12/04	97/12/04
Date2	97/12/04	97/12/04	97/12/04
Date3	97/12/04	97/12/04	97/12/04
Date4	97/12/04	97/12/04	97/12/04
Date5	97/12/04	97/12/04	97/12/04
Date6	97/12/04	97/12/04	97/12/04
Date7	97/12/04	97/12/04	97/12/04
Date8	97/12/04	97/12/04	97/12/04
Date9	97/12/04	97/12/04	97/12/04
Date10	97/12/04	97/12/04	97/12/04
Time1	15:13:06	15:13:06	15:13:06
Time2	15:13:06	15:13:06	15:13:06
Time3	15:13:06	15:13:06	15:13:06
Time4	15:13:06	15:13:06	15:13:06
Time5	15:13:06	15:13:06	15:13:06
Time6	15:13:06	15:13:06	15:13:06
Time7	15:13:06	15:13:06	15:13:06
Time8	15:13:06	15:13:06	15:13:06
Time9	15:13:06	15:13:06	15:13:06
Time10	15:13:06	15:13:06	15:13:06

\$PrivateInfo

ModelVersion	2.06		
DisplayBlockSize	1002	1002	1002
DisplayPointNo.	1	1	1
PhaseShift	0	0	0
InputModule	HS-ISOL	HS-ISOL	HS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• Example of Header File of the AR4400 / AR48000

#YOKOGAWA ASCII FILE FORMAT

\$PublicInfo

```
FormatVersion 1.01
Model AR4000
Endian Big
DataFormat Trace
GroupNumber 1
TraceTotalNumber 4
DataOffset 0
```

\$Group1

```
TraceNumber 4
BlockNumber 1
TraceName ch1 ch2 ch3 ch4
BlockSize 1001 1001 1001 1001
VResolution 2.0816850E-03 2.0814249E-03 3.9672852E-02 1.5258789E-02
VOffset -6.8156449E-01 -6.8164585E-01 -1.3000000E-03 -5.0000000E-02
VDataType IU2 IU2 IU2 IU2
VUnit V V C C
VPlusOverData 56769 56769 65535 65535
VMinusOverData 8767 8767 0 0
VIllegalData 59569 59569 65535 65535
VMaxData 56768 56768 65535 65535
VMinData 8768 8768 0 0
HResolution 1.0000000E-05 1.0000000E-05 1.0000000E-05 1.0000000E-05
HOffset 0.0000000E-00 0.0000000E-00 0.0000000E-00 0.0000000E-00
HUnit s s s s
Date 97/12/11 97/12/11 97/12/11 97/12/11
Time 10:18:30 10:18:30 10:18:30 10:18:30
```

\$PrivateInfo

```
ModelVersion 5.01
MaskData 65535 65535 65535 65535
PTraceName ch1 ch2 ch3 ch4
LinearMode ON OFF ON OFF
LinearSlope 3.500E-04 1.000E-00 5.500E-01 1.000E-00
LinearIntercept 0.000E+00 0.000E-00 0.000E-00 0.000E-00
LinearUnit FED V KL C
```

\$MediaInfo

```
MediaNo. 1
MGroupNumber 1
MTraceTotalNumber 4
$MGroup 1
MTraceNumber 4
MBlockNumber 1
MTraceName ch1 ch2 ch3 ch4
StartBlockNo. 1 1 1 1
StartPointNo. 1 1 1 1
EndBlockNo. 1 1 1 1
EndPointNo. 1001 1001 1001 1001
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2-2: Common Information "PublicInfo"

2-2-1: Example of Common Information (PublicInfo)

//YOKOGAWA ASCII FILE FORMAT

\$PublicInfo				
FormatVersion	xxx			
Model	xxx			
Endian	xxx			
DataFormat	xxx			
GroupNumber	xxx			
TraceTotalNumber	xxx			
DataOffset	xxx			
\$Group1				
TraceNumber	xxx			
BlockNumber	xxx			
TraceName	xxx	xxx	xxx	xxx
BlockSize	xxx	xxx	xxx	xxx
VResolution	xxx	xxx	xxx	xxx
VOffset	xxx	xxx	xxx	xxx
VDataType	xxx	xxx	xxx	xxx
VUnit	xxx	xxx	xxx	xxx
VPlusOverData	xxx	xxx	xxx	xxx
VMinusOverData	xxx	xxx	xxx	xxx
VIllegalData	xxx	xxx	xxx	xxx
VMaxData	xxx	xxx	xxx	xxx
VMinData	xxx	xxx	xxx	xxx
HResolution	xxx	xxx	xxx	xxx
HOffset	xxx	xxx	xxx	xxx
HUnit	xxx	xxx	xxx	xxx
Date	xxx	xxx	xxx	xxx
Time	xxx	xxx	xxx	xxx

2-2-2: Description of Each Parameter of the Common Information "PublicInfo"

(In subsequent data, some items do not exist depending on the model and they are represented by "?")

"//YOKOGAWA ASCII FILE FORMAT"

A line that begins with (//) is a comment. At the head of an ASCII file, this comment line indicates an attribution of the file.

"\$PublicInfo"

A label to indicate common information. The label name is always headed by the dollar sign (\$). The character code of the "\$" is "0x24".

"FormatVersion"

This shows the version number of the ASCII HEADER FILE itself.

"Model"

This shows the model of the measuring instrument which created this ASCII file data. The version number of the ROM (firmware version) is mentioned in the model-specific information "\$PrivateInfo".

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"Endian"

The high-low byte order for data differs depending on CPU. The "Endian" is provided to absorb this difference.

680XX (Motorola): Big Endian

80X86 (Intel) : Little Endian

These two are "Endian" modes. If the "Endian" mode of a saved file differs from the computer to process the data, reverse the high and low order.

"DataFormat"

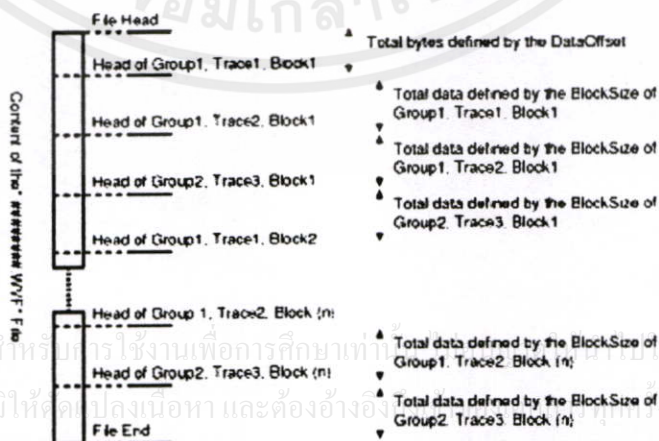
This defines the method for describing waveform data saved in the binary format. One of the following two styles are used depending on the model.

Trace: Blocks of the same trace number are grouped.
Block: Traces of the same block number are grouped.

Trace format style



Block format style



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิง

"GroupNumber"

If the number of display traces becomes larger than what can be shown on the 1 line of a PC display, header is divided into several groups. This parameter shows number of groups in the ASCII HEADER FILE.

"TraceTotalNumber"

This shows the total number of traces in this header file.

"DataOffset"

This shows how many bytes there are from the head of the data file saved in binary from (with extension "WVF") to the start of the captured data. If the captured data begins immediately in the file, "DataOffset" is "0".

"\$Group"

A Label attached to the head of a group. The group label begins with "\$Group1" and increases to "\$Group2", "\$Group3", etc, as the number of traces increases. The following parameters from "Trace Number" to "Time" are those within the group.

"TraceNumber"

This shows the number of traces in the group. In some DL series, traces which were not saved are expressed by the "?".

The TotalTraceNumber counts "?".

"BlockNumber"

This shows the number of blocks in the group. When the sequential store (SGL(N)) or the history memory function is used in the DL series, more than one block is created. If the number of blocks is different between traces, the maximum number of blocks is displayed.

"TraceName"

This indicates the trace names for each trace. If two or more traces are in the group, new columns are added horizontally by the number of traces. The following items from "BlockSize" to "Time" correspond to traces. If the parameters from "BlockSize" to "Time" are different between blocks of the same trace, new lines are added vertically.

"BlockSize"

This shows the number of data points in each block of trace names. Note that this size means the number of data points and NOT the number of total bytes.

"VResolution"

This indicates the coefficients of Y axis conversion equations for each trace. The values of the Y axis (values of the vertical axis) can be determined using the following conversion equation:

$$Y \text{ axis value} = "VResolution" \times \text{Data value} + "VOffset"$$

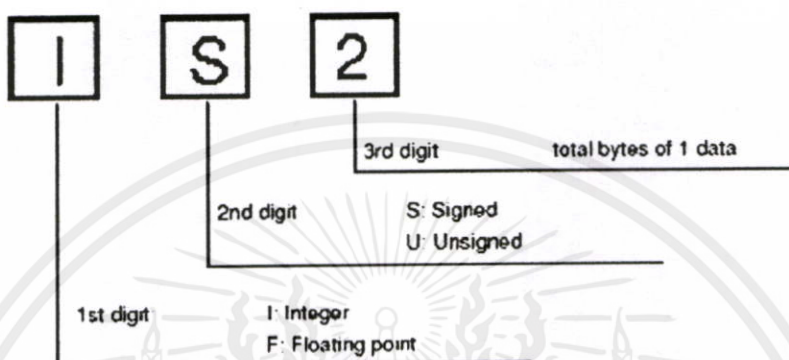
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"VOffset"

This indicates the Y axis offset values for each trace.

"VDataType"

This shows the type of data sent in the binary format. The data format is composed of three digits. Meaning of each digit is as follows.



Note: Bit data is expressed by
B + 2 digits (decimal)

Note: Binary data description

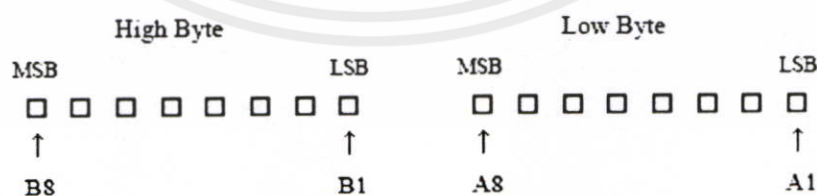
1) DL2700

The output data type (VDataType) is B08. 8 bit data has the following structure, where B07 to B00 are default name of the bit trace.



2) DL708

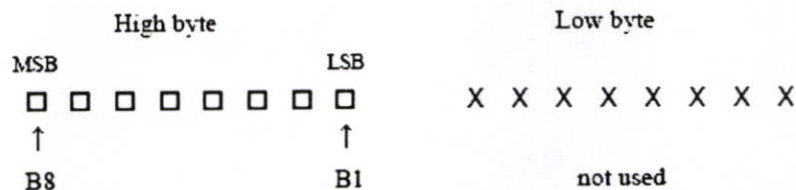
The output data type (VDataType) is B16. 16 bit data has the following structure.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) AR4400 / AR4800

The output data type (VDataType) is B16. The high byte contains 8 bit trace information.

**"VUnit"**

This shows the unit used for the Y axis. Mainly, the SI unit system is employed.

"VPlusOverData" & "VMinusOverData"

If binary data exceeds "VPlusOverData" or falls below "VMinusOverData, it is error data.

"VIllegalData"

Division by 0 or the non-indication code for hiding the data from the display is represented by this parameter.

"VMaxData" & "VMinData"

The maximum or minimum value of data of the corresponding trace in this block is represented by this parameter.

"HResolution" & "HOffset"

This indicates coefficients of the X axis conversion equation for each trace.

DL5100 series, DL2700, DL708, AR4400 / AR4800:

$$\text{X axis value} = \text{"HResolution"} \times (\text{data no.} - 1) + \text{"HOffset"}$$

DL4100 series, DL1500 series:

$$\begin{aligned} \text{X axis value} = & \text{"HResolution"} \\ & \times (\text{data no.} - (\text{DisplayPointNo.} + \text{TriggerPointNo.})) \\ & + \text{"HOffset"} \end{aligned}$$

The data number starts at 1 and "HOffset" can be calculated from the equation by assigning 0 to the "X axis value" and the trigger point no. to the "data no."

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"HUnit"

This shows the unit used for the X axis. Basically, the SI unit system is used. This is used mainly for the X axis dimension (unit).

"Date"

Depending on the model, the meaning differs.

DL1500 series:	The date when the header file was created
DL4000 series:	The date when the header file was created
DL5100:	The date when the signal was triggered
DL2700:	The date when the signal was triggered
DL708:	The date when the acquisition was completed
AR4400 / AR4800:	The date when the signal was triggered

"Time"

Depending on the model, the meaning differs.

DL1500 series:	The time when the header file was created
DL4000 series:	The time when the header file was created
DL5100:	The time when the signal was triggered
DL2700:	The time when the signal was triggered
DL708:	The time when the acquisition was completed
AR4400 / AR4800:	The time when the signal was triggered

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2-3: Instrument specific information "PrivateInfo"

(1) DL1500 series

"ModelVersion"

This indicates the DL1500 series firmware version number.

"MathBlockNo."

The target block of the computation is shown.

"FormMath"

This shows the type of the "Math" computation.

"DisplayPointNo."

This shows starting point number in the saved file, with which a waveform display begins the instrument.

"DisplayBlockSize"

This shows the memory length corresponding to the display waveform when a signal is observed.

"TriggerPointNo."

This shows trigger position in the displayed data.

"PhaseShift"

This shows the shift if "Phase Shift" is implemented when "Math" is executed. In BIN saving Data Type is ACQ, the shift that is converted to the number of data points is displayed, while in P-P saving, it is displayed as "?".

"DCOffset"

This value shows DC offset value applied to each channel. When the DC offset is used in the DL1500 series, the DL1500 series subtract this value shows the result. This value can be used to derive the absolute value in measurement. (The parameter is added after firmware version 1.12.)

"DCUnit"

This represents the unit used for the DC offset. (The parameter is added after firmware version 1.12.)

"RefFileNumber"

When the Action Trigger or Go-Nogo function is used, multiple number of waveform files are created for one ASCII header file. The number shows number of corresponding waveform files generated based on this ASCII header file. (The parameter is added after firmware version 1.31.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) DL4000

"ModelVersion"

This indicates the DL4000 firmware version number.

"MathBlockNo"

The target block of the computation is shown.

"FormMath1"

This shows the type of the "Math1" computation.

"FormMath2"

This shows the type of the "Math2" computation.

"FormMath3"

This shows the type of the "Math3" computation.

"FormMath4"

This shows the type of the "Math4" computation.

"DisplayPointNo."

This shows starting point number in the saved file, with which a waveform display begins in the instrument.

"DisplayBlockSize"

This shows the memory length corresponding to the display waveform when a signal is observed.

"TriggerPointNo."

This shows trigger position in the displayed data.

"PhaseShift"

This shows the shift if "PhaseShift" is implemented in the "Math". In BIN saving, the shift that is converted to the number of data points is displayed. In P-P saving, it is displayed as "°".

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) DL5100

"ModelVersion"

This indicates the DL5100 firmware version number.

"MathBlockNo"

The target block of the computation is shown. In the DL5100, if "Math" is not used, following "FormMath1" and "FormMath2" are not displayed.

"FormMath1"

This shows the type of the "Math1" computation.

"FormMath2"

This shows the type of the "Math2" computation.

"DisplayPointNo."

This shows starting point number in the saved file, with which a waveform display begins in the instrument.

(4) DL2700

"ModelVersion"

This indicates the DL2700 firmware version number.

"DisplayBlockSize"

This shows the memory length corresponding to the display waveform when a signal is observed.

"DisplayPointNo."

This shows starting point number in the saved file, with which a waveform display begins in the instrument.

"PhaseShift"

This shows the shift if "PhaseShift" is implemented in the "Math". In BIN saving, the shift that is converted to the number of data points is displayed. In P-P saving, it is displayed as "?".

"PTTraceName"

This shows the trace label that a user defined in the DL2700. The default name is from CH1 to CH8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5) DL708

"ModelVersion"

This indicates the DL708 firmware version number.

"DisplayBlockSize"

This shows the memory length corresponding to the display waveform when a signal is observed.

"DisplayPointNo."

This shows starting point number in the saved file, with which a waveform display begins in the instrument.

"PhaseShift"

This shows the shift if "PhaseShift" is implemented in the "Math". In BIN saving, the shift that is converted to the number of data points is displayed. In P-P saving, it is displayed as "?".

"InputModule"

This shows the type of plug-in module used for the measurement.

HS-ISOL:	High speed isolation module
HS:	High speed module
HR-HV:	High resolution high voltage module
HR:	High resolution module
TEMP:	Temperature module
LOGIC:	Logic Input module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6) AR4400 / AR4800

"ModelVersion"

This indicates the AR4400 / AR4800 firmware version number.

"MaskData"

The value is used to derive physical value from Logic unit or Frequency unit. The following calculation is used to derive the value. (The "data" used in the following equation is measurement value obtained from WVF file based on the information described in the before mentioned public information.)

[Logic Unit]

Execute 8 bit rightward shift after taking logic AND with this MaskData.

$$\text{Physical Value} = \text{VResolution} \times ((\text{data} \& \text{MaskData}) \gg 8) + \text{VOffset}$$

[Frequency Unit]

Derive the compensation value (Comp). The value can be derived from the following sequence.

- 1) Take 1's complementary value of the MaskData
- 2) Take logic AND between the result of 1) the Data
- 3) Execute 13 bit rightward shift of the 2) then multiply 3
- 4) Take 2 to the power of 3)
- 5) Multiply the constant

$$\text{Comp} = 2^{\left((((1's \text{ complementary value of MaskData}) \& \text{Data}) \gg 13) \times 3 \right)} \times 1.0\text{E-}6 \times 0.0625 [\text{sec}]$$

The equation to derive physical value varies depending on the measurement range.

1. sec (range)

$$\text{Physical Value} = \text{VResolution} \times (\text{data} \& \text{MaskData}) \times \text{Comp} - \text{VOffset}$$

2. Hz (range)

$$\text{Physical Value} = 1 / (\text{VResolution} \times (\text{data} \& \text{MaskData}) \times \text{Comp}) + \text{VOffset}$$

3. rpm (range)

$$\text{Physical Value} = (\text{VResolution} / (\text{data} \& \text{MaskData} \times \text{Comp})) + \text{VOffset}$$

"PTraceName"

This shows the trace label that an user defined in the AR4400 / AR4800. The default name is from CH1 to CH32.

"LinearMode"

ON / OFF status of the linear scale function.

"LinearSlope"

Coefficient of the linear scale function.

"LinearIntercept"

Y axis interception value of the linear scale function.

"LinearUnit"

The unit defined in the linear scale function.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2-4: Media Information "MediaInfo"

2-4-1: Abstract of the MediaInfo

If a file is saved onto multiple number of media (e.g. FD), the information is added. (In case of the AR4400 / AR4800 the information is always added to the header file.)

2-4-2: Description of Each Parameter of the "MediaInfo"

"\$MediaInfo"

A label to indicate media information.

"MediaNo."

This indicates the number of this media. The initial number is 1.

"MGroupNumber"

If the number of display traces becomes larger than what can be shown on the 1 line of a PC display, header is divided into several groups. This parameter shows number of groups in this media.

"MTraceTotalNumber"

This shows total number of traces in this media.

"\$MGroup"

A label created at the head of each group. The initial number is 1.

"MTraceNumber"

The number of traces treated within this group.

"MBlockNumber"

The maximum number of blocks within this group. If the block size varies depending on traces, the maximum number is represented.

"MTraceName"

Name of traces treated in this media.

"StartBlockNo."

The start block number of the trace within this media.

"StartPointNo."

The start point number of the trace within this media.

"EndBlockNo."

The last block number of the trace within this media.

"EndPointNo."

The last point number of the trace within this media.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 - Example of Creating an Analysis Program

In order to analyze information saved on a floppy disk in binary format, it is at first necessary to get information from the ASCII HEADER FILE. In the following procedure, though this is only one example, a procedure to read the binary data is introduced.

STEP1: Decide whether the data format is the "Trace" format or the "Block" format from "PublicInfo".

STEP2: From "PublicInfo" take out following parameters.

DataOffset, GroupNumber, TraceNumber, BlockNumber, BlockSize, VDataType

From these, it is possible to know location of the starting point of a certain block of a certain trace from the head of the "#####.WVF" file.

<A method to calculate the SP Byte of the Trace format>

The SP Byte

of the "Block b"

of the "Trace a"

can be calculated from the following equation, where

BlockSize (m,n)

indicates the number of data in the "Block n" of the "Trace m".

VDataType(m,n)

indicates the number of bytes per data of the "Block n" of the "Trace m".

BlockNumber(m)

indicates the number of blocks in the "Trace m".

SP = DataOffset

$$+ \sum_{m=1}^{a-1} \left[\sum_{n=1}^{\text{BlockNumber}(m)} \{ \text{BlockSize}(m,n) \times \text{VDataType}(m,n) \} \right] \\ + \sum_{n=1}^{b-1} \{ \text{BlockSize}(a,n) \times \text{VDataType}(a,n) \}$$

<A method to calculate the SP Byte of the Block format>

The SP Byte

of the "Block b"

of the "Trace a"

can be calculated from the following equation, where

BlockSize (m,n)

indicates the number of data in the "Block n" of the "Trace m".

VDataType(m,n)

indicates the number of bytes per data of the "Block n" of the "Trace m".

BlockNumber(m)

indicates the number of blocks in the "Trace m".

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายใน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาเอกสารอย่างใดซึ่งอาจถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SP = DataOffset

$$\begin{aligned}
 &+ \sum_{p=1}^{b-1} \left(\sum_{m=1}^{\text{TraceTotalNumber}} \{ \text{BlockSize}(m,p) \times \text{VDataType}(m,p) \} \right) \\
 &+ \sum_{m=1}^{a-1} \{ \text{BlockSize}(m,b) \times \text{VDataType}(m,b) \}
 \end{aligned}$$

STEP3: Fetch the necessary data from the position determined in STEP2. If the Endian mode of the file differs from the computer, convert the high low byte order.

4 - Sample Program

Outline of Sample program

Sample program is written in the C language. The program uses the structure of the C to obtain information from the PublicInfo and PrivateInfo. The following is the source file and header files of this sample program.

ANALIZE.C
ANALIZE.H
SOKUTEI.H
ANRZSTR.H

Two other files (ANALIZE.DSK & ANALIZE.PRJ) are specific files that belong to the Turbo C. This program is copy right free. Users can modify the program without consent from Yokogawa Electric. Co.

Execution of the sample program

The following file is self executable.

ANALIZE.EXE

The file has been compiled and linked by the Turbo C. For example if you save a waveform in the binary format with the file name of "SAMP1", the following 2 files are saved in to the FD either in the directory of the DL_WAVE or the DL_MISC.

"SAMP1.HDR" . "SAMP1.WVF"

Copy these 2 to the same directory where there is ANALIZE.EXE file. Type the following command and you can convert the binary file to ASCII file named "TEMP.TXT".

>ANALYZE SAMP1>TEMP.TXT

Note:

This program is to help users develop the program of their own. Yokogawa Electric does not bear any responsibility that derives from use of this software.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสั่งที่ใช้ในโปรแกรม Lab VIEW

Editing, Execution, and Debugging Tools

	Show Context Help Window —Displays the Context Help window.		Resize Objects —Resizes multiple front panel objects to the same size.
	Run —Runs the VI.		Reorder —Reorders objects if they overlap, including moving forward and moving backward.
	Broken Run —Indicates that the VI contains errors. Click the button to list errors.		Highlight Execution —Shows the flow of data through the block diagram.
	Run Continuously —Runs the VI until you abort or pause it.		Step Into —Steps into a node, which blinks when ready to execute.
	Abort Execution —Stops the VI immediately.		Step Over —Executes a node and pauses at the next node.
	Pause —Pauses or resumes a running VI.		Step Out —Steps out of a node and continues to the next node.
	Align Objects —Aligns objects along axes.		Breakpoint Tool —Sets breakpoints on nodes to pause execution.
	Distribute Objects —Spaces objects evenly.		Probe Tool —Creates probes on wires to display intermediate values in a running VI.
	Text Settings —Changes the attributes of text in the VI.		Call Chain —Lists all the callers from the top-level VI to the opened subVI.

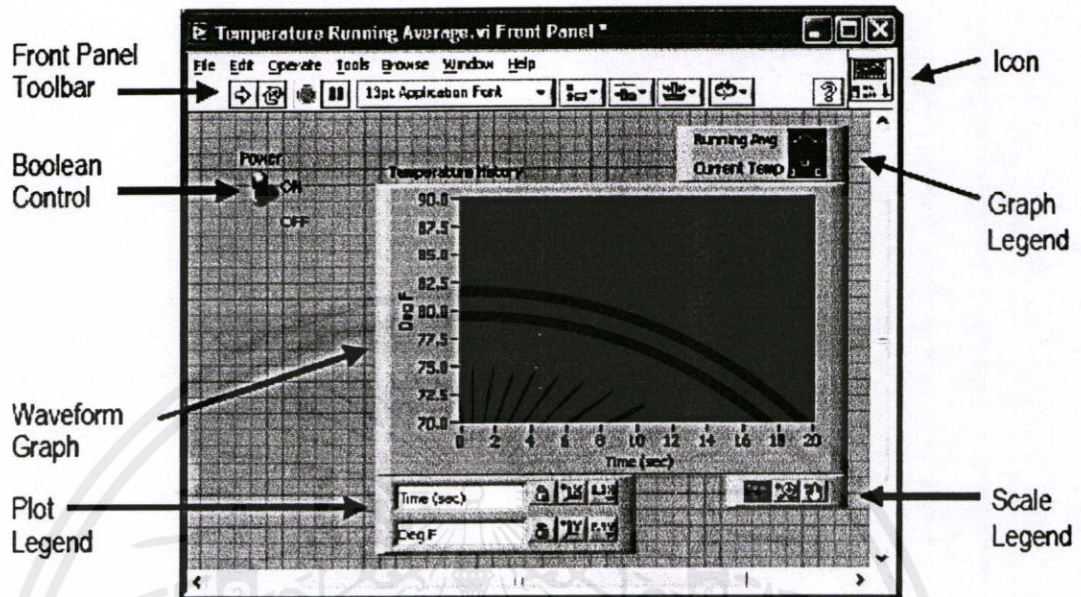
Terminal Data Types

Signed Integers	8-bit		Boolean			Waveform
	16-bit		(FALSE)			
	32-bit		String			Digital waveform
			(empty string)			
Unsigned Integers	8-bit		Path			Digital
	16-bit		(<Not A Path>)			
	32-bit		Reference number			I/O name
Floating-Point	Single		Enumerated type			Time stamp
	Double					
	Extended		Cluster	Numeric		Dynamic
Complex Floating-Point	Single			Mixed data		Picture
	Double		Array	1D		Variant
	Extended			2D		

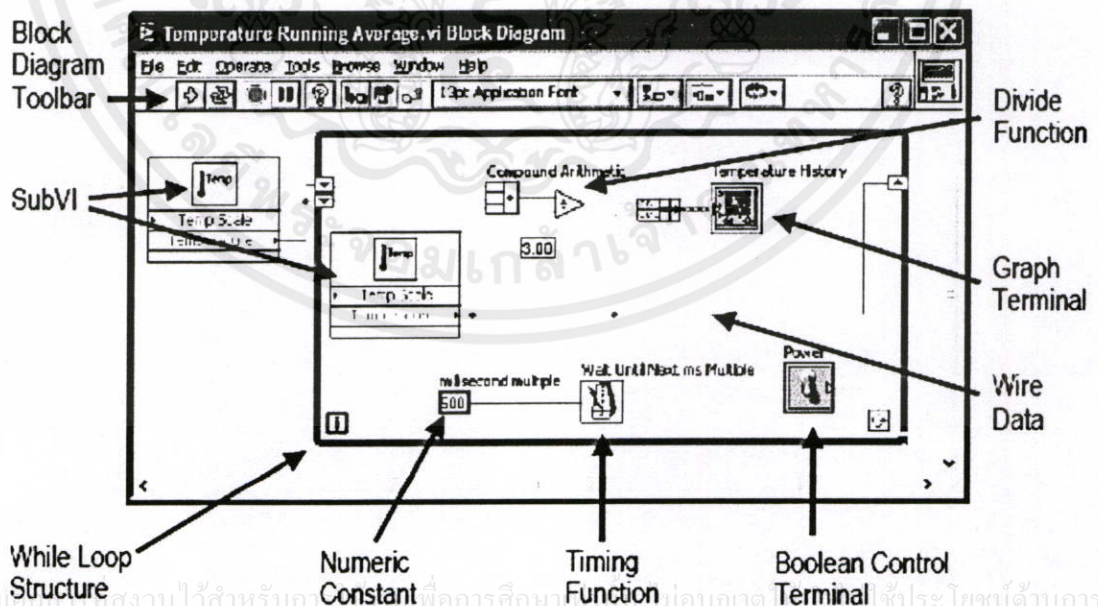
Note Default values appear in ().

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VI Front Panel



VI Block Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ส่วนตัวไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

PASSONI & VILLA

20162 MILANO - Viale Suzzani, 229

 IM 1178e
page 1

INSTRUCTION MANUAL

 Impulse Generator type GTU
200 kV - 5 kJ

 Customer
Internal order

 KING MONGKUT'S
74029

SCHEMATIC	AUTHOR	CHECKED BY	DATE	N° OF PAGES
75	Enzo Rinaldi	Ing. Bertolotto	November 1994	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPULSE GENERATOR

Type	GTU 2-2-5								
Rated charging voltage	200 kV								
Rated energy	5 kJ								
Repetition rate at max rating energy	30 s								
Number of stages	2								
Capacitors	0,5 μ F - 100 kV								
Resistors for L.I.	<table> <tr> <td>Front</td><td>12 ohm</td></tr> <tr> <td>Tail</td><td>150 ohm</td></tr> <tr> <td>Charging</td><td>25000 ohm</td></tr> <tr> <td>Output</td><td>100 ohm (65+35)</td></tr> </table>	Front	12 ohm	Tail	150 ohm	Charging	25000 ohm	Output	100 ohm (65+35)
Front	12 ohm								
Tail	150 ohm								
Charging	25000 ohm								
Output	100 ohm (65+35)								
DC Generator	<table> <tr> <td>Rated voltage</td><td>100 kV - DC</td></tr> <tr> <td>Charging Current</td><td>15 mA</td></tr> <tr> <td>Change polarity</td><td>manual</td></tr> </table>	Rated voltage	100 kV - DC	Charging Current	15 mA	Change polarity	manual		
Rated voltage	100 kV - DC								
Charging Current	15 mA								
Change polarity	manual								
Voltage divider	<table> <tr> <td>Rated voltage</td><td>200 kV</td></tr> <tr> <td>Rated capacitance</td><td>4200 pF</td></tr> </table>	Rated voltage	200 kV	Rated capacitance	4200 pF				
Rated voltage	200 kV								
Rated capacitance	4200 pF								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

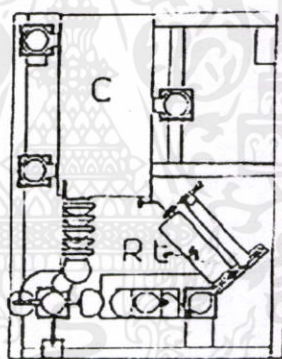
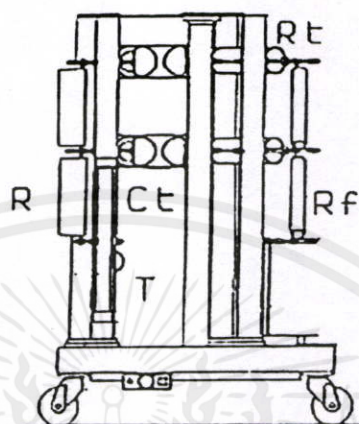


Fig. 1 - generator overall dimensions

G	DC Generator	Rt	Tail Resistor
T	Ground System	Rf	Front Resistor
R	Charging Resistor	Rm	Measuring Resistor
Ct	Trigger Capacitor	C	Main Capacitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

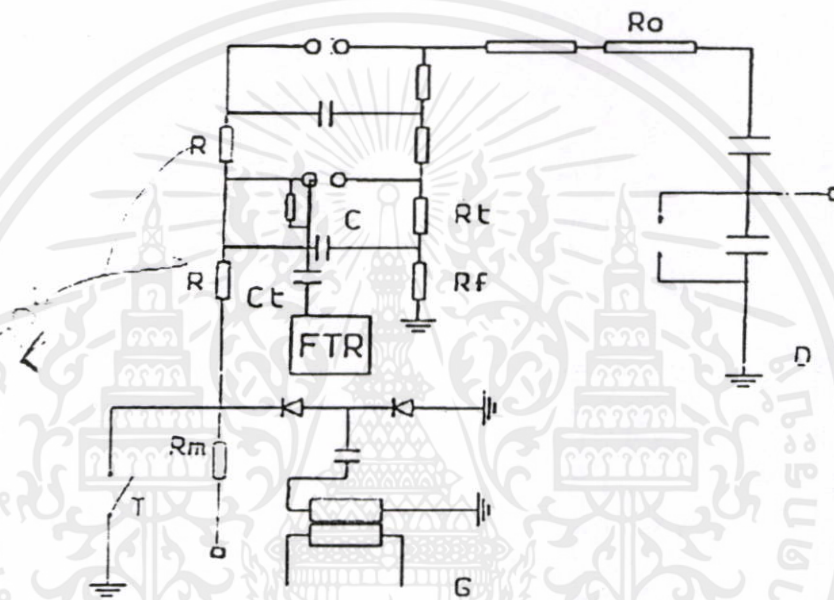


Fig 2 - electrical scheme

G	DC Generator	Rt	Tail Resistor
T	Ground System	Rm	Measuring Resistor
R	Charging Resistor	C	Main Capacitor
Ct	Trigger Capacitor	D	Voltage Divider
Rf	Front Resistor	Ro	Output Resistor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองระบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อใช้ในการทดสอบและศึกษาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

The Simulation of Impulse Voltage Generator System for Testing and Education in HV Engineering

ปานพงษ์ พินทุณ*, ศิริวัฒน์ โพธิ์วชกุล*, นครเศรษฐ์ พัฒนเดช* และ ไชยพร หล่อทองคำ**

*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

โทรศัพท์ 0-2737-3000 ต่อ 3315 ; โทรสาร 0-2326-4550 ; E-mail: panupongpingish@hotmail.com, kpsiriwa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองการสร้างรูปคลื่นอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบเต็มระบบ ด้วยโปรแกรม OrCAD การจำลองได้กำหนดค่าองค์ประกอบตามเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีอยู่จริง โดยกล่าวถึงการศึกษาการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และรูปคลื่นที่สร้างได้ภายใต้สภาวะเงื่อนไขต่างๆ รวมถึงระบบวัดรูปคลื่นซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความถูกต้องในการทดสอบโดยใช้กรณีสมมุติตัวอย่างขึ้น ผลที่ได้ไม่เพียงแต่จะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับค่าองค์ประกอบภายในของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบไม่สอดคล้องตามมาตรฐานที่กำหนดแล้วยังสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับศึกษาวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ รวมทั้งยังสามารถนำไปประกอบการเรียนการสอนทำให้ให้นักศึกษาเข้าใจหลักการของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: แรงดันอิมพัลส์, แบบจำลอง, รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

Abstract

This paper presents simulation of generating impulse waveform in full system of impulse voltage generator system using an OrCAD program to duplicate the equivalent circuit of impulse voltage generator. The article refers the study of generating impulse voltage waveform, behaviour of impulse voltage generator, and existent waveshape under the specified condition on the study cases. Furthermore this paper includes the measurement system that causes accuracy tested results. The experiment not only yield tendency will be taken to adjust the components of impulse voltage generator in practical in high voltage testing procedure which is not met the testing standards but also capable using an information for research to find suitable element of impulse voltage generator. Moreover, this result can be used in high voltage education for students to understand theory of impulse voltage generator.

Keywords: Impulse Voltage, Simulation and Standard Impulse Waveform

1. บทนำ

ปัจจุบันการศึกษาด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจำลองสร้างแรงดันอิมพัลส์และผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ คือรูปคลื่น [1-2] ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการจำลองเป็นชุดย่อยต่างๆ โดยจะทำการวิเคราะห์ในส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ [3] บทความนี้ได้จำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์โดยรวมทั้งระบบประเด็นที่น่าสนใจคือการปรับค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีที่เป็นต้องปรับรูปคลื่นให้ได้ตามต้องการ เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดในมาตรฐานที่จะใช้ในการทดสอบ [4] นอกจากนี้การจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ยังสามารถนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์ โดยที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีราคาค่อนข้างสูงรวมถึงความซับซ้อนในการอธิบายให้เห็นผลของรูปคลื่นจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ส่งผลต่อความถูกต้องในการทดสอบ ดังนั้นการจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทำให้นักศึกษาสามารถเห็นภาพอย่างชัดเจนและสามารถเข้าใจพฤติกรรมของวงจรได้โดยง่าย อีกทั้งยังให้เห็นถึงสิ่งที่ควรระวังในการทดสอบไว้ด้วย โดยวงจรที่ใช้ในการจำลองได้นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ปฏิบัติงานจริง

2. หลักการสร้างแรงดันอิมพัลส์

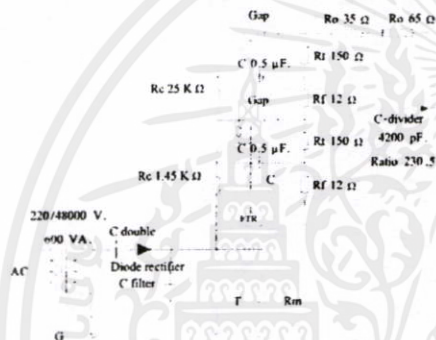
รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ สร้างจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Generator) โดยอาศัยหลักการของวงจร RC-Transient [5] หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เริ่มจากแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง ที่อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์ (C_0) จนถึงค่าแรงดันอัดประจุ โดยเวลาอัดประจุจะขึ้นอยู่กับความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_0) ทั้งนี้ค่าระดับแรงดันจะขึ้นอยู่กักระยะห่างของสปริงเกอเพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้มากขึ้นตามต้องการ หลังจากเกิดการสปริงเกอที่เกอ (G) แรงดันอัดประจุจะลดพร้อมกับความต้านทานหน้าคลื่น (R_f) ความต้านทานหน้าภายนอก (R_o) และตัวเก็บประจุรวม (C_o) ซึ่งช่วงเวลาในการคายประจุหรือช่วงเวลาหน้าคลื่นจะขึ้นอยู่กับความต้านทานหน้าคลื่นและตัวเก็บประจุรวม สุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON-28) 20-21 ตุลาคม 2548 ภูเก็ต มธ.

เมื่อตัวเก็บประจุรวมได้รับการถ่ายประจุจากตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์แล้วก็จะคายประจุผ่านความต้านทานคายประจุ (R_d) และความต้านทานหน่วงภายนอก (R_o) ลงสู่กราวด์ของระบบซึ่งก็คือช่วงเวลาที่คลื่น ดังนั้นช่วงเวลาทางคลื่นจึงขึ้นอยู่กับ R_o , R_d และ C_o ในกรณีที่ต้องการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขนาดสูงอาจสร้างด้วยการนำวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์มาต่อหลายชั้นตามหลักการวงจรมาร์กซ์ (Marx's circuit) ดังรูปที่ 1 [6] เป็นวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ถังอิงในบทความนี้ อย่างไรก็ตามส่วนประกอบของการทดสอบแรงดันอิมพัลส์สามารถจำแนกส่วนประกอบสำคัญออกได้เป็น 4 ส่วน ได้แก่ แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง, ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์, ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ และ อุปกรณ์ทดสอบ โดยแต่ละส่วนจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องและรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นหากต้องการปรับเปลี่ยนหรือแก้ไขรูปคลื่นสามารถปรับได้จากองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

3 การจำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์

บทความนี้ได้จำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์เต็มระบบโดยใช้โปรแกรม OrCAD Release 9 เพื่อใช้ในการศึกษาวิธีการปรับค่าองค์ประกอบภายในของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ รวมทั้งข้อผิดพลาดของการเรียนการสอน โดยได้ดำเนินการตรวจสอบเปรียบเทียบการจำลองระหว่างรูปคลื่นที่ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ของ Passoni & Villa 2 stages 200 kV 5 kJ กับรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม OrCAD โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ที่ได้มาจากค่าจริงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ซึ่งระบุในเอกสารที่แนบมาด้วยสวิตช์ใช้การกำหนดระยะจากค่าความต้านทานของสวิตช์ในวงจรเพื่อให้การสวิตช์เป็นตามลำดับ ดังปรากฏในรูปที่ 2 โดยไม่คิดผลของค่าเก็บประจุครอสส์ส่วนค่า R_{div} จำเป็นต้องใส่ไว้ในภาคแรงต่ำของคาปาซิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเพื่อไม่ให้โปรแกรมฟ้อง error เนื่องจากโปรแกรมจะมองเห็นคาปาซิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งว่าวงจร ซึ่งผลที่ได้เป็นตามตารางที่ 1 และ 2 ซึ่งผลการจำลองต่างจากการวัดจริงประมาณ 28 % เพราะค่าความละเอียดของการวัดยังไม่ละเอียดพอ สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นจากการทดสอบจริงกับรูปคลื่นจากการจำลองเป็นดังรูปที่ 3 และ 4 จุดเด่น

ของการจำลองนั้นนอกจากสามารถนำไปศึกษาผลขององค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์, การต่อความต้านทานสมมูลกัน, ผลกระทบจากอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบและยังสามารถเลือกวิเคราะห์ผลในแต่ละส่วนของวงจรที่สนใจก็ได้ เช่นต้องการที่จะศึกษาการสร้างแรงดันสูงกระแสตรง, วงจรกรองกระแส หรือวงจรเรียงกระแส เป็นต้น

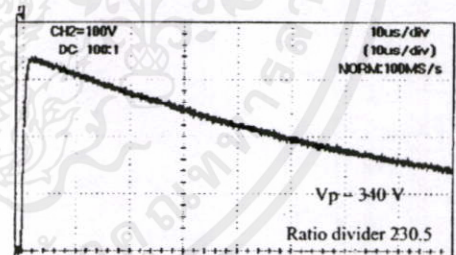
รูปที่ 2 วงจรจำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์ด้วย OrCAD

ตารางที่ 1 การทดสอบด้วยรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ค่ารูปคลื่นเต็ม

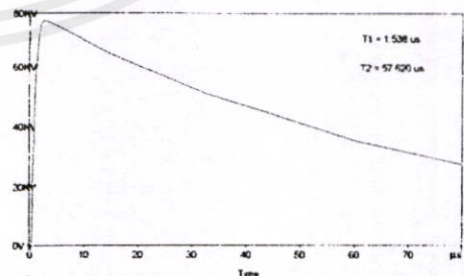
ผลการวัดจริง			ผลจากการจำลอง		
T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)	T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)
1.183	57.995	78.37	1.525	56.987	77.09

ตารางที่ 2 การทดสอบด้วยรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์

ผลการวัดจริง			ผลจากการจำลอง		
T_{cr} (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)	T_{cr} (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)
258.5	2267.5	88.512	204.7	2671.1	90.81



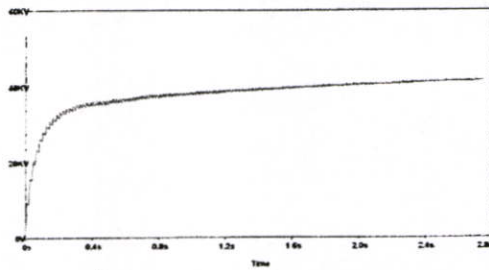
รูปที่ 3 รูปคลื่นอิมพัลส์ที่ค่าจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 4 รูปคลื่นอิมพัลส์ที่ค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรม OrCAD

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

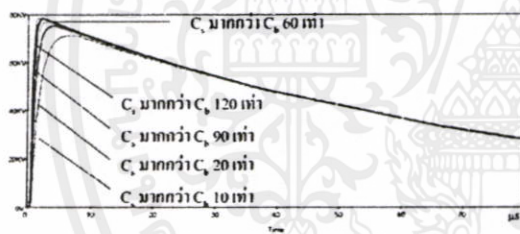
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON-28) 20-21 ตุลาคม 2548 กรุงเทพฯ.



รูปที่ 5 ผลการจำลองชุดแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง

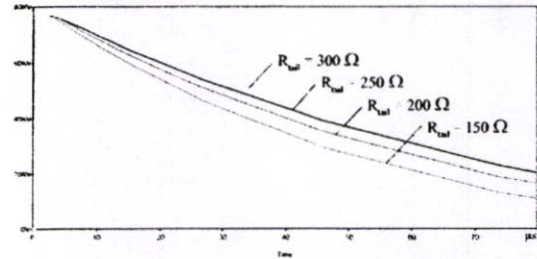
4 ผลการทดสอบ

การทดสอบได้จำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ยังคงเป็นชุดเดิมยกเว้นพารามิเตอร์ตัวที่กำกับพิจารณา ซึ่งจะทำให้ทราบผลของพารามิเตอร์ดังกล่าวในช่วงที่สนใจ เพื่อจะชี้ให้เห็นถึงสิ่งที่อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดและใช้เป็นตัวอย่างสำหรับอธิบายพฤติกรรมของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หรือใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาต่อไป เป็นที่ทราบกันว่าสัดส่วนระหว่าง C_s กับ C_b ส่งผลต่อคุณลักษณะของรูปคลื่นที่ทดสอบดังนั้นจึงทำการจำลองการปรับเปลี่ยนสัดส่วนระหว่าง C_s กับ C_b สำหรับนำไปศึกษาข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แต่ละเครื่องซึ่งมีองค์ประกอบภายในแตกต่างกัน ดังรูปที่ 6 และ ตารางที่ 3

รูปที่ 6 ผลของรูปคลื่นจากการปรับเปลี่ยนสัดส่วนระหว่าง C_s กับ C_b ตารางที่ 3 ผลการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนระหว่าง C_s กับ C_b

C_s มากกว่า C_b	T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)
10 เท่า	6.96	68.57	65.31
20 เท่า	3.92	61.43	71.60
40 เท่า	2.14	57.81	75.41
60 เท่า	1.54	56.37	77.05
90 เท่า	1.05	55.27	78.31
120 เท่า	0.79	54.76	78.85

ในวงจรหมักอุปกรณ์ที่ทดสอบมีความเหนี่ยวนำสูงเป็นผลให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีหางคลื่นที่สั้นกว่าค่าที่ต้องการซึ่งแก้ไขได้โดยการปรับค่า R_s ในวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ดังผลที่ได้จากการจำลองรูปที่ 7 และตารางที่ 4

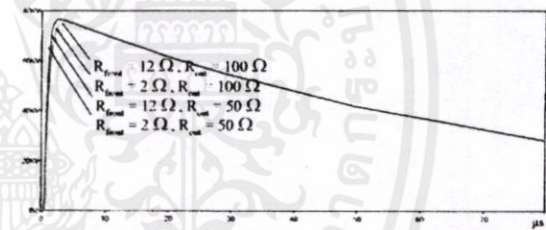


รูปที่ 7 ผลการปรับหางคลื่นกรณีหางคลื่นไม่ได้มาตรฐาน

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของหางคลื่นเนื่องจากการปรับค่า R_s

R_s	T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)
150 Ω	1.53	36.42	76.35
200 Ω	1.53	42.23	76.82
250 Ω	1.53	47.23	76.94
300 Ω	1.53	51.78	77.30

กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความประจุไฟฟ้าเนื่องจากผลของอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบอาจทำให้น้ำหนักคลื่นแรงดันทดสอบไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ดังนั้นการปรับน้ำหนักคลื่นให้ได้มาตรฐานสามารถปรับค่าองค์ประกอบภายในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จาก R_f และ R_o ดังรูปที่ 8 และ ตารางที่ 5



รูปที่ 8 ผลการปรับน้ำหนักคลื่นกรณีน้ำหนักคลื่นไม่ได้มาตรฐาน

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคลื่นจากผลการปรับค่า R_f และ R_o

R_f	R_o	T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	U_{peak} (kV)
12 Ω	100 Ω	2.15	59.28	75.55
2 Ω	100 Ω	1.85	59.28	76.01
12 Ω	50 Ω	1.32	57.58	76.57
2 Ω	50 Ω	0.99	56.69	77.12

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เมื่อใช้งานไปมีผลทำให้ค่าองค์ประกอบต่างๆภายในวงจรเปลี่ยนไปตามอายุการใช้งาน ดังรูปที่ 9 เกิดการแกว่งบริเวณขดคลื่นซึ่งเป็นผลเนื่องจากภายในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีองค์ประกอบความเหนี่ยวนำผสมอยู่ ในการจำลองนี้ได้กำหนดให้มีตัวเหนี่ยวนำค่ออนุกรมกับความต้านทาน R_o ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ อย่างไรก็ตามวิธีแก้ไขในตัวอย่างนี้ใช้การเพิ่มความต้านทานหน่วง (Damping resistor) บริเวณปลายด้านแรงดันออกerc

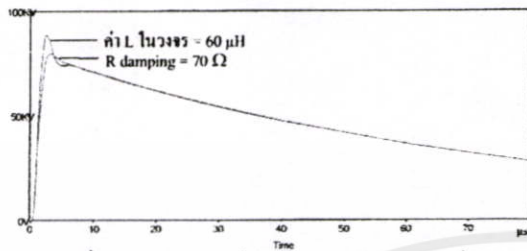
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON-28) 20-21 ตุลาคม 2548 กรุงเทพมหานคร

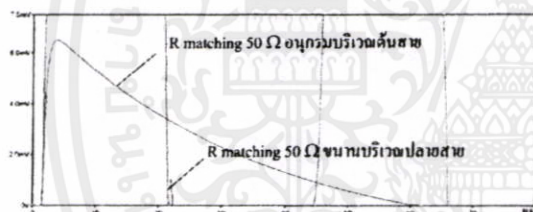
ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งค่าความต้านทานหน่วงคำนวณได้จากสมการที่ (1) [7]

$$R_d \geq 2 \times \sqrt{L \times \frac{C_s + C_b}{C_s \times C_b}} \quad (1)$$

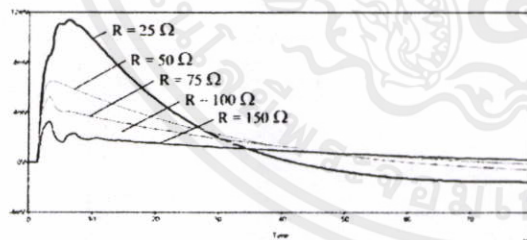


รูปที่ 9 ผลการปรับรูปคลื่นจากการแก้วงจรด้วยขดลวด

การต่อความต้านทานสมมูลกันเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความถูกต้องของรูปคลื่นที่วัด โดยเหตุที่ต้องต่อความต้านทานสมมูลกันเพื่อขจัดผลของคลื่นจร ดังนั้นจึงจำลองการวัดสัญญาณก่อนเข้าออสซิลโลสโคป ในรูปที่ 10 ผลของตำแหน่งการต่อความต้านทานสมมูลกันทั้งการต่ออนุกรมที่ต้นสายสัญญาณและการต่อขนานที่ปลายสายสัญญาณ ในรูปที่ 11 ผลการจำลองการปรับค่าความต้านทานสมมูลกันซึ่งต่ออนุกรมบริเวณต้นสายสัญญาณ โดยจำลองเปลี่ยนค่าความต้านทานสมมูลกันที่ไม่ตรงกับสายสัญญาณจริง ทั้งนี้สายสัญญาณที่ใช้จริงมีค่าเสถียรจิมที่แคช 50 Ω



รูปที่ 10 ผลของตำแหน่งการต่อความต้านทานสมมูลกัน



รูปที่ 11 ผลของการเปลี่ยนค่าความต้านทานสมมูลกัน

5 บทสรุป

การจำลองสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบเต็มชุด เริ่มจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านหม้อแปลงยกระดับแรงดัน วงจรทวีแรงดัน วงจรเรียงกระแส วงจรกรองกระแส ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และภาคการวัดแรงดันอิมพัลส์ โดยการใช้โปรแกรม OrCAD รวมทั้งจำลองกรณีตัวอย่างที่น่าสนใจ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้ใน

การศึกษาวิธีการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างออกมาสอดคล้องกับมาตรฐานและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดสอบ อีกทั้งสามารถนำมาใช้ในการศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากสามารถจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้อย่างหลากหลายตามค่าองค์ประกอบซึ่งสามารถกำหนดได้เองทำให้อธิบายพฤติกรรมรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ให้เห็นภาพอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากสถานการณ์ที่ขาดอุปกรณ์สำหรับศึกษาด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงสามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์ได้สำหรับวงจรที่จำลองขึ้นนี้ สามารถแยกวิเคราะห์แต่ละส่วนที่สนใจได้จากผลการทดสอบวงจรที่จำลองขึ้นกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จริง พบว่ารูปคลื่นมีความคลาดเคลื่อนบ้างเนื่องจากค่าพารามิเตอร์อาจมีค่าที่เปลี่ยนไปแต่โดยรวมแล้วถือว่าใกล้เคียงกันพอสมควร

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.L. Suther, J.R. Laghari, T.J. Saluzzo, "Usefulness of spice in high voltage engineering education", IEEE Trans. Power systems, Vol.6, August, 1991
- [2] C. Yu, N. Petcharaks, P. Sakarung, "The simulation of high voltage test equipment", Suddhiparitad, 2001, pp. 111-117
- [3] S.E. Meiners, "An impulse generator simulation circuit", Faculty of Electrical engineering, University of Pittsburgh, 2002
- [4] IEC.60060-1, "High Voltage Test Techniques Part 1", 1989
- [5] F. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, "High Voltage Engineering Fundamentals", Newnes, 2000, pp. 708-715.
- [6] Instruction manual "Impulse Generator type GTU 200 kV- 5 kJ", Passoni & Villa, 1994
- [7] สัรวช สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547, หน้า 2-47

ประวัติผู้เขียน



ดร.พิเชษฐ์ พิชิตกุล สำเร็จการศึกษา ทยบ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และทำงานในตำแหน่งวิศวกรนิเทศน์ สำนักรับประกันคุณภาพผลิตภัณฑ์ สนใจงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



ดร.ศิริวัฒน์ โพธิ์พุดอง สำเร็จการศึกษา ทยบ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง และสารกึ่งตัวนำพิเศษ มีผลงานตีพิมพ์ทั้งในระดับประเทศและนานาชาติหลายบทความ



นรเศรษฐ พัฒนเดช สำเร็จการศึกษา ทยบ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ทยบ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, EMC, การออกแบบและทดสอบอุปกรณ์



ไพฑูรย์ หล่อทองคำ สำเร็จการศึกษา ทยบ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารบทความที่มีการนำไปใช้
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON-28) 20-21 ตุลาคม 2548 ภูเก็ต มข.

การศึกษาการแตกตัวเป็นช่องแคบอากาศเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น

Experimental Studies of Breakdown Characteristics of Air-Gap with Short Tail Lightning Impulse

ไชยพร นิลน้อยน้อย*, อรุณพร นิลน้อย, จิรวัฒน์ ไชยธรรมะ

* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคโนโลยีพระยาภิรมย์ภักดี

51 หมู่ 1 ต.จอมจวน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30530 โทร. 02-9883696-6 ต่อ 256, โทรสาร 02-9883694, E-mail: chayapornil@ic.ac.th

** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคโนโลยีพระยาภิรมย์ภักดี จ.นครราชสีมา

อรุณพร นิลน้อย, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคโนโลยีพระยาภิรมย์ภักดี จ.นครราชสีมา 30530 โทร. 02-9883696-6 ต่อ 3515, 393, โทรสาร 02-9883694, E-mail: kpsriw@ic.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาการแตกตัวเป็นช่องแคบอากาศเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI) รูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ที่ใช้ความถี่การสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์เป็นมาตรฐาน 1.2/50 μ s โดยได้ใช้ขนาดของช่องว่างที่แตกต่างกันคือ 10, 15 และ 20 cm ตามผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันการแตกตัว (V_{50%}) และรูปคลื่นการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ (V_{10%} curve) ของช่องแคบอากาศ การสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น มีค่าสูงกว่าการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นยาว โดยค่าแรงดันการแตกตัวจะสูงขึ้นตามขนาดของช่องว่างอากาศ โดยรูปคลื่น 1.2/4 μ s จะมีค่าสูงสุด คือ 1.2/50 μ s จะให้ค่าต่ำสุด ผลการวิจัยในการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นจะสอดคล้องกับผลการทดลองการทดลองการทดลอง

คำสำคัญ: แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า, แรงดันการแตกตัว, อิมพัลส์ฟ้าผ่า

Abstract

This paper deals with the experimental studies of breakdown characteristics of air-gap with the Short Tail Lightning Impulse (STLI), i.e. 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s and 1.2/10 μ s waveform, and the standard lightning impulse (SLI) voltage, i.e. 1.2/50 μ s waveform. These study are provided for comparison with the results of previous studies. The test electrodes are brass rod electrodes with the symmetry shape. Three shapes or not were used for investigated the effects of electrodes configuration among the gap space of 10, 15 and 20 cm respectively. The results show that both V_{50%} and V_{10%} curve of STLI voltages are higher than the SLI voltages. It is also found that the V_{50%} and V_{10%} curves are not dependent on the electrode configurations and polarity of test voltages. The results in case of 1.2/4 μ s are highest, in the opposite way 1.2/50 μ s are lowest which achieve the same characteristics in all case of study. The advantages of this research are indicated that the STLI voltage can detect the breakdown characteristics of test gap.

Keywords: Lightning Impulse Voltage, Breakdown Voltage, V_{10%} curve

1. บทนำ

บทนำ การศึกษาการแตกตัวเป็นช่องแคบอากาศเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI) รูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ที่ใช้ความถี่การสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์เป็นมาตรฐาน 1.2/50 μ s โดยได้ใช้ขนาดของช่องว่างที่แตกต่างกันคือ 10, 15 และ 20 cm ตามผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันการแตกตัว (V_{50%}) และรูปคลื่นการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ (V_{10%} curve) ของช่องแคบอากาศ การสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น มีค่าสูงกว่าการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นยาว โดยค่าแรงดันการแตกตัวจะสูงขึ้นตามขนาดของช่องว่างอากาศ โดยรูปคลื่น 1.2/4 μ s จะมีค่าสูงสุด คือ 1.2/50 μ s จะให้ค่าต่ำสุด ผลการวิจัยในการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นจะสอดคล้องกับผลการทดลองการทดลองการทดลอง

การแตกตัวเป็นช่องแคบอากาศเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI) รูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ที่ใช้ความถี่การสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์เป็นมาตรฐาน 1.2/50 μ s โดยได้ใช้ขนาดของช่องว่างที่แตกต่างกันคือ 10, 15 และ 20 cm ตามผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันการแตกตัว (V_{50%}) และรูปคลื่นการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ (V_{10%} curve) ของช่องแคบอากาศ การสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น มีค่าสูงกว่าการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นยาว โดยค่าแรงดันการแตกตัวจะสูงขึ้นตามขนาดของช่องว่างอากาศ โดยรูปคลื่น 1.2/4 μ s จะมีค่าสูงสุด คือ 1.2/50 μ s จะให้ค่าต่ำสุด ผลการวิจัยในการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นจะสอดคล้องกับผลการทดลองการทดลองการทดลอง

การแตกตัวเป็นช่องแคบอากาศเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI) รูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ที่ใช้ความถี่การสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์เป็นมาตรฐาน 1.2/50 μ s โดยได้ใช้ขนาดของช่องว่างที่แตกต่างกันคือ 10, 15 และ 20 cm ตามผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันการแตกตัว (V_{50%}) และรูปคลื่นการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ (V_{10%} curve) ของช่องแคบอากาศ การสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น มีค่าสูงกว่าการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นยาว โดยค่าแรงดันการแตกตัวจะสูงขึ้นตามขนาดของช่องว่างอากาศ โดยรูปคลื่น 1.2/4 μ s จะมีค่าสูงสุด คือ 1.2/50 μ s จะให้ค่าต่ำสุด ผลการวิจัยในการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นจะสอดคล้องกับผลการทดลองการทดลองการทดลอง

2. หลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI)

การสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI) รูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ที่ใช้ความถี่การสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์เป็นมาตรฐาน 1.2/50 μ s โดยได้ใช้ขนาดของช่องว่างที่แตกต่างกันคือ 10, 15 และ 20 cm ตามผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันการแตกตัว (V_{50%}) และรูปคลื่นการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ (V_{10%} curve) ของช่องแคบอากาศ การสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น มีค่าสูงกว่าการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นยาว โดยค่าแรงดันการแตกตัวจะสูงขึ้นตามขนาดของช่องว่างอากาศ โดยรูปคลื่น 1.2/4 μ s จะมีค่าสูงสุด คือ 1.2/50 μ s จะให้ค่าต่ำสุด ผลการวิจัยในการสั่นพ้องคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นจะสอดคล้องกับผลการทดลองการทดลองการทดลอง

ตารางที่ 1 ค่าแรงดันการแตกตัวตามขนาดของช่องว่างอากาศ

รูปคลื่นอิมพัลส์	ค่าแรงดันการแตกตัวตามขนาดของช่องว่าง		หมายเหตุ
T ₁ (μs)	Front Resistor (Ω)	Tail Resistor (Ω)	
1.2/4	10	10	ค่าแรงดันการแตกตัวสูง
1.2/8	10	10	ค่าแรงดันการแตกตัวสูง
1.2/10	10	10	ค่าแรงดันการแตกตัวสูง
1.2/10	10	10	ค่าแรงดันการแตกตัวสูง

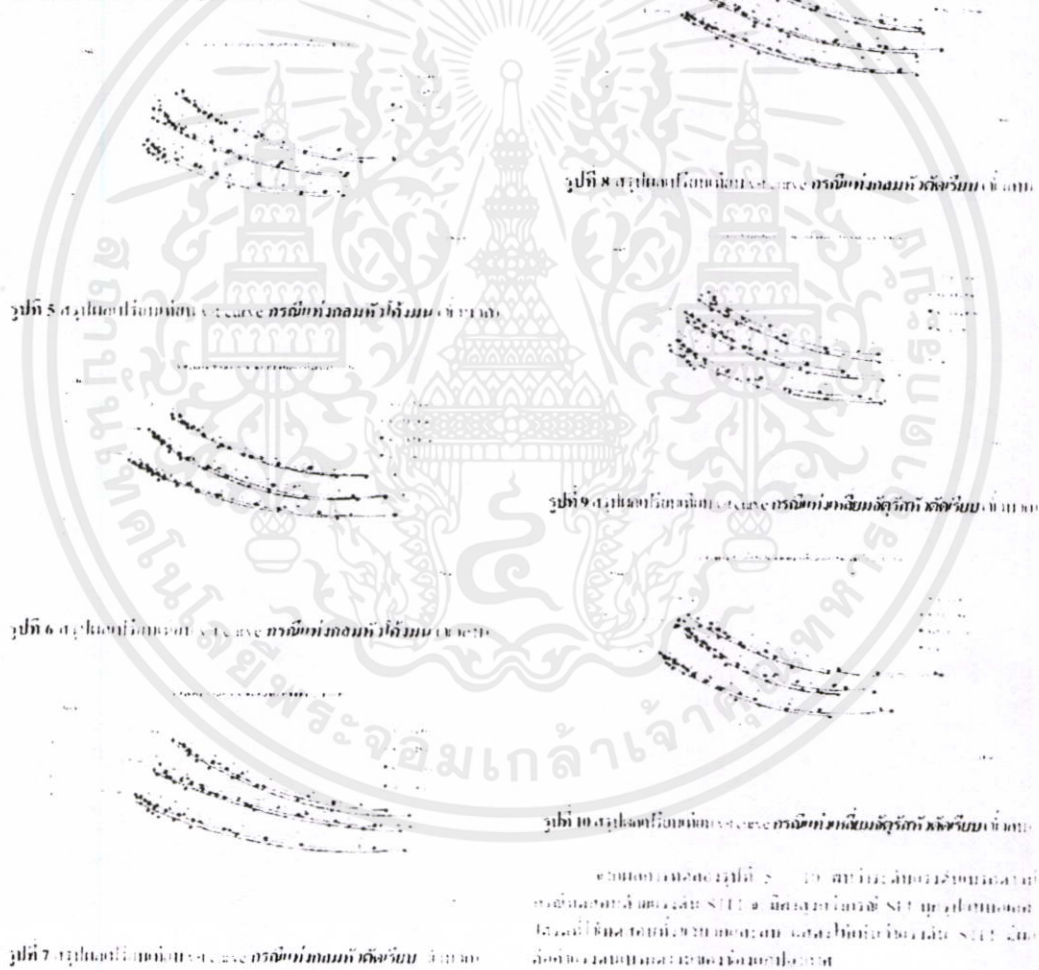
ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำที่ปล่อยจากรันเวย์ตามค่าเฉลี่ย $\bar{V}_{avg}$ กรณีขบวน SET กับ SET1

แบบฝึกหัดโครง		น้ำที่ปล่อยจากรันเวย์ตามค่าเฉลี่ย $\bar{V}_{avg}$ (% ΔV_{avg})								
		STLL 1.2/4 μs			STLL 1.2/8 μs			STLL 1.2/10 μs		
		10 cm	15 cm	20 cm	10 cm	15 cm	20 cm	10 cm	15 cm	20 cm
ขบวนรถ หัวขบวน	+	5.67	7.67	9.61	3.34	5.43	7.70	1.86	4.96	7.16
	-	5.71	7.69	9.95	6.56	6.83	3.76	3.10	4.91	1.79
ขบวนรถ หัวขบวน	+	3.99	9.38	3.21	5.64	8.47	2.11	4.13	5.88	1.28
	-	6.87	7.07	5.68	7.99	6.88	4.34	4.78	5.70	3.89
ขบวนรถขบวนสุดท้าย หัวขบวน	+	16.95	6.07	8.40	4.27	8.07	5.11	3.08	2.22	2.87
	-	9.37	7.48	10.85	4.79	6.88	4.07	2.64	3.41	5.70

$$\text{หมายเหตุ: } V_{avg} = \frac{V_{max} + V_{min}}{2}$$

4.2 ผลการทดสอบการรบกวนขบวนรถ (IV-t curve)

ผลการทดสอบการรบกวน IV-t curve ที่ระบุค่าไว้บนรูป เมื่อ
ขบวนรถขบวน SET1 ปริมาณน้ำที่ปล่อย SET1 และขบวนรถขบวน SET1
กับขบวนรถขบวน SET1 ปริมาณน้ำที่ปล่อย SET1



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON-27) 11-12 พฤศจิกายน 2547 ณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายภานุพงศ์ พินกฤษ เกิดเมื่อวันที่ 4 มีนาคม 2517 ที่อำเภอสรรพทพ จังหวัดชัยนาท สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปี การศึกษา 2543 สำเร็จการศึกษาระดับ ปวช. และ ปวส. จากวิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์ สาขาช่างไฟฟ้า กำลัง ปีการศึกษา 2538

ในปี พ.ศ. 2543 เข้ารับราชการในตำแหน่งช่างไฟฟ้า 1 สังกัดกองเคมี สำนักงานพลังงาน ปริมาณเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกร นิเวศลิษฐ์ 5 สำนักกำกับดูแลความปลอดภัยทางนิเวศลิษฐ์ สำนักงานปริมาณเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้