

ระบบวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

Evaluation System of Lightning Impulse Voltage Waveform



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ระบบวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

Evaluation System of Lightning Impulse Voltage Waveform



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์และบุคลากรที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Evaluation System of Lightning Impulse Voltage Waveforms



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 2020 อย่างไม่อ้อมค้อมถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

Evaluation System of Lightning Impulse Voltage Waveforms

ผู้จัดทำ

1. นายภาณุวัฒน์ จำเริญ รหัสนักศึกษา 60010779
2. นายภูมิ อยู่สอน รหัสนักศึกษา 60010798
3. นางสาวสุธาสิณี แวงโสธรณ์ รหัสนักศึกษา 60011094



 อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. พีรุฒิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ระบบวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

นายภาณุวัฒน์ จำเริญ

นายภูมิ อยู่สอน

นางสาวสุธาสิณี แวงโสธรณ์

รศ.ดร. พีรุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา2563

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบโปรแกรม เพื่อใช้สำหรับการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ในขณะที่ทำการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่จะติดตั้งใช้งานในระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งใช้งานจริง ซึ่งการออกแบบพัฒนาโปรแกรมจะช่วยพัฒนาให้ดิจิทัลออสซิลโลสโคปสามารถวิเคราะห์และคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ด้วยตนเอง ทำให้การคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบอุปกรณ์มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น การออกแบบดังกล่าวมีขั้นตอนและวิธีในการคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060 – 1 และมาตรฐาน IEC 60060- 2 ดังต่อไปนี้ ได้แก่ การพัฒนาเป็นโปรแกรมสำหรับการใช้งานบนดิจิทัลออสซิลโลสโคปด้วยโปรแกรมภาษา Visual Basic 6.0 ที่ผ่านการทดสอบความแม่นยำของการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานทั้ง 29 รูปคลื่น ตามที่มาตรฐาน IEC 61083 - 2 กำหนด และการทดสอบความแม่นยำของการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก (KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS) ก่อนที่จะมีการนำไปใช้งานจริงในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะติดตั้งใช้งานในระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งใช้งานจริงต่อไป ผลลัพธ์จากการศึกษาออกแบบโปรแกรมที่จัดทำขึ้น สามารถนำไปใช้งานได้จริง มีประสิทธิภาพและสามารถช่วยประหยัดเวลาต่อการประเมินหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Evaluation System of Lightning Impulse Voltage Waveforms

Panuwat Jamroen

Poom Yoosorn

Suthasinee Waengsothorn

Assoc.Prof.Dr. Peerawut Yutthagowith Advisor

Year 2020

Abstract

This thesis aims to research and design the software for evaluation of lightning impulse voltage parameters while testing impulse withstand voltage of high voltage equipment is installed in the electrical system before the actual installation, the software development will allow the digital oscilloscope to analyze and evaluate the lightning impulse voltage parameters by itself. Therefore, it is faster to evaluate the lightning impulse voltage parameters in testing devices. The software design mentioned above includes the following procedures and methods for evaluation of lightning impulse voltage parameters according to IEC 60060-1 and IEC 60060-2 : software development for use on the digital oscilloscope, it was developed by using Visual Basic 6.0 programming language that passed the accuracy test of evaluation of 29 standard lightning impulse voltage waveforms parameters according to IEC 61083 – 2 and accuracy test of evaluation of lightning impulse voltage parameters with a small impulse voltage waveform generator (KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS) before it is implemented in the test of impulse withstand voltage of high voltage equipment is installed in the electrical system before the actual installation. The results from research and design of the software are practical, efficient and save time for evaluation of lightning impulse voltage parameters.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำปรึกษา อบรมสั่งสอน ให้คำชี้แนะต่าง ๆ ตลอดมา ส่งผลให้เกิดประโยชน์อย่างยิ่งในการทำปริญญาานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ คุณสุมิตตา คงลายทอง ที่คอยให้ความรู้เกี่ยวกับออสซิลโลสโคปและแนะนำการใช้งานของฟังก์ชันต่าง ๆ ในออสซิลโลสโคป รวมไปถึงช่วยให้คำปรึกษาในด้านการเขียนโปรแกรม

ขอขอบคุณ ดร.ปุณยวีร์ ฉายศิริ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และพี่ ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ให้ความรู้แนะนำการใช้งานอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และแสดงความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุคคลที่ทำให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในด้านการเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันของผู้วิจัยเป็นอย่างดี ได้แก่ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพภักดีของผู้วิจัย รวมไปถึงกำลังใจดี ๆ จากเพื่อน ๆ พี่ ๆ ที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจ ทำให้การทำโครงการครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ.....	2
1.5 แผนการดำเนินงานและการปฏิบัติงานจริง.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์.....	5
2.2 วงจรพื้นฐานของการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	7
2.3 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	10
2.3.1 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์.....	10
2.3.2 ตัวเก็บประจุไหลต.....	10
2.3.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ.....	10
2.3.4 สปาร์กแกปและไกสวิตช์.....	11
2.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์.....	12
2.4.1 การแปรของแรงดันในเทอมของเวลา.....	12
2.4.2 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร.....	15
2.4.3 ประสิทธิภาพของวงจร.....	16
2.4.4 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่น.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2.4.3 ประสิทธิภาพของวงจรเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 16
การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 2.4.4 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่น 17

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และการเปรียบเทียบกับรูปคลื่นตามที่มาตราฐานกำหนด.....	19
2.5.1 การคำนวณช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่น.....	19
2.5.2 กรณีเกิดการแกว่ง.....	20
2.6 การประมาณหากราฟที่เหมาะสม.....	22
2.6.1 การวิเคราะห์การถดถอย.....	22
2.6.2 วิธีการประมาณแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง.....	22
2.6.3 วิธี Gauss-Newton.....	23
2.7 ข้อกำหนดสำหรับเครื่องมือวัดและเครื่องบันทึกแรงดันและกระแสอิมพัลส์.....	25
2.7.1 นิยามที่เกี่ยวข้องบางส่วน.....	25
2.7.2 ข้อกำหนดสำหรับการวัดอิมพัลส์.....	25
2.7.3 เครื่องมือวัดและบันทึกแรงดันและกระแสอิมพัลส์.....	27
2.8 ภาษาคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง.....	30
2.8.1 ภาษา Visual basic.....	31
2.8.2 ภาษา Visual Basic Scripting Edition.....	31
2.8.3 โปรแกรม Matlab.....	32
2.8.4 โปรแกรม Portable visual basic 6.....	33
บทที่ 3 การออกแบบโปรแกรม.....	34
3.1 การออกแบบและเขียนโปรแกรมคำนวณหาค่าองค์ประกอบสำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	34
3.1.1 ขั้นตอนการตัดข้อมูลเพื่อลดสัญญาณรบกวนหรือการแกว่งของสัญญาณบางส่วน.....	34
3.1.2 ขั้นตอนการหากราฟที่เหมาะสมสำหรับข้อมูล.....	36
3.1.3 ขั้นตอนการสร้างรูปคลื่นทดสอบ.....	38
3.1.4 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	39
3.1.4.1 เวลาช่วงหน้าคลื่น.....	39
3.1.4.2 เวลาช่วงหลังคลื่น.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามนำไปเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ
ไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.4.3 อัตราการเกิดการแกว่ง.....	39
3.2 การออกแบบรูปแบบโปรแกรมสำหรับการทำงานบนออสซิลโลสโคป.....	41
3.2.1 การออกแบบรูปแบบโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Visual basic 6 portable.....	41
3.2.1.1 การออกแบบการตั้งค่าหน้าจอแสดงผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ของ ออสซิลโลสโคป.....	41
3.2.1.2 การออกแบบการตั้งค่าการคำนวณองค์ประกอบรูปคลื่น แรงดันอิมพัลส์.....	42
3.2.2 การติดตั้งโปรแกรมที่ออกแบบบนออสซิลโลสโคป.....	42
3.3 การทดลองการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	43
3.3.1 การทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบกับข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ตามมาตรฐาน IEC61083-2.....	43
3.3.2 การทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์กับ การทดสอบโดยเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก.....	43
บทที่ 4 การทดสอบและการประมวลผล.....	44
4.1 บทนำ.....	44
4.2 การทดสอบหาค่าตัวประกอบความหน่วง.....	44
4.3 การทดสอบโปรแกรมการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่น แรงดันอิมพัลส์.....	46
4.3.1 การออกแบบและเขียนโปรแกรมคำนวณหาค่าองค์ประกอบสำหรับ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	46
4.3.2 การทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.1 สรุปผล.....	51
เอกสารนี้เป็นเอกสาร 5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อเพื่อการศึกษานี้ ไม่นับค่าให้ประโยชน์ใด ๆ 52	52
ไม่ว่าการแก้ไขข้อบกพร่องอื่น ๆ อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข 53	53

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, or to cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ.....	56
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์.....	62
ภาคผนวก ค การใช้งานโปรแกรมคำนวณรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	66
ภาคผนวก ง หลักการทำงานของโปรแกรม.....	69
ประวัติผู้จัดทำ.....	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, or **vii** cite the document when use.

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ.....	3
ตารางที่ 2.1 ค่าองค์ประกอบของ B_1 , B_0 และ K สำหรับวงจร A และวงจร B.....	14
ตารางที่ 2.2 ค่าองค์ประกอบเวลา T_1 , T_2 และประสิทธิภาพของวงจร A และวงจร B.....	17
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการหาค่าตัวประกอบความหน่วงที่เหมาะสม.....	44
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าองค์ประกอบของสมการที่คำนวณได้จากโปรแกรม.....	47
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม.....	48
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม ซึ่งทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก....	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, or VIII cite the document when use.

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	6
รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง.....	7
รูปที่ 2.3 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	7
รูปที่ 2.4 อิเล็กโทรดสปาร์กแก๊ป.....	12
รูปที่ 2.5 สปาร์กแก๊ปมีไกสวิตซ์.....	12
รูปที่ 2.6 ลาปลาซทรานฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน.....	12
รูปที่ 2.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม.....	15
รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	17
รูปที่ 2.9 วงจรพื้นฐานในการสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	18
รูปที่ 2.10 กระบวนการที่ใช้ในการหาค่ารูปคลื่นทดสอบ.....	21
รูปที่ 2.11 ดิจิตอลออสซิลโลสโคปรุ่น HDO6054A.....	27
รูปที่ 2.12 เทคโนโลยี HD4096.....	28
รูปที่ 2.13 เทคโนโลยี MAUL.....	29
รูปที่ 2.14 เครื่องมือข้อมูลอนุกรม.....	29
รูปที่ 2.15 กล้องเครื่องมือของออสซิลโลสโคป.....	30
รูปที่ 2.16 โปรแกรม Visual basic.....	31
รูปที่ 2.17 โปรแกรม Visual Basic Scripting Edition.....	32
รูปที่ 2.18 โปรแกรม Matlab.....	32
รูปที่ 2.19 โปรแกรม Portable Visual Basic 6.....	33
รูปที่ 3.1 รูปแบบของโปรแกรมที่ทำการออกแบบและนำไปใช้.....	41
รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบการตั้งค่าหน้าจอแสดงผลใน ส่วนที่1และส่วนที่2.....	41
รูปที่ 3.3 แสดงการออกแบบการตั้งค่าในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่น แรงดันอิมพัลส์ส่วนที่1และส่วนที่2.....	42
รูปที่ 3.4 แสดงการออกแบบการแสดงผลพัลซ์ของค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.5 รูปแบบของการติดตั้งโปรแกรมที่จะใช้งานบนออสซิลโลสโคป..... 42
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, anIX cite the document when use.

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 เครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก (KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS).....	43
รูปที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ LI-M4 จากมาตรฐาน IEC 61083-2 ที่แสดงบนดิจิตอล ออสซิลโลสโคป.....	46
รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ LI-M4 จากมาตรฐาน IEC 61083-2 ที่นำออกมาจาก ดิจิตอลออสซิลโลสโคป.....	46
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นฐานที่ผ่านการหากราฟที่เหมาะสม ซึ่งจากโปรแกรมคำนวณค่าองค์ประกอบ ของรูปคลื่นที่นำออกมาจากดิจิตอลออสซิลโลสโคป.....	47
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นเหลือที่ได้จากการนำรูปคลื่นบันทึกด้วยรูปคลื่นฐาน ที่นำออกมาจาก ดิจิตอลออสซิลโลสโคป.....	47
รูปที่ 4.5 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปคลื่นทั้งสามรูป ที่นำออกมาจากดิจิตอลออสซิลโลสโคป....	48
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่ายอดแรงดัน (Vpeak) ของแต่ละรูปคลื่น.....	49
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าเวลาช่วงหน้าคลื่น (Front time) ของแต่ละรูปคลื่น.....	49
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าเวลาช่วงหลังคลื่น (Time to half) ของแต่ละรูปคลื่น.....	49
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าส่วนพุ่งเกิน (Overshoot rate) ของแต่ละรูปคลื่น.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

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

ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของอุปกรณ์ ประกอบด้วยการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และการวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า เพื่อตรวจสอบระดับแรงดัน และรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ทำการทดสอบให้กับอุปกรณ์ เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC60060-1(2010) โดยรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานกำหนดให้มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ $1.2 \mu s \pm 30\%$ เวลาหลังคลื่น $50 \mu s \pm 20\%$ และค่ายอดแรงดัน ยอมให้ผิดพลาดได้ $\pm 3\%$ ของค่าแรงดันทดสอบที่ระบุ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งในการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า จะต้องทำการวัดโดยใช้ ออสซิลโลสโคป (CRO) และมีการนำข้อมูลจากออสซิลโลสโคป ไปทำการวิเคราะห์รูปคลื่นผ่านโปรแกรมภายนอก เพื่อทำการหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่น และช่วงเวลาหลังคลื่น พร้อมทั้งตรวจสอบลักษณะรูปคลื่นว่าเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่ แต่เดิมการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นั้น เราจะต้องอาศัยอุปกรณ์ภายนอก เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ PC หรือ Notebook เป็นต้น ในการทำงานของโปรแกรม ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้เกิดความล่าช้าในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ และอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงจากแรงดันเกินที่มาจากการทดสอบเข้าสู่อุปกรณ์ที่ใช้ทำการวิเคราะห์ ทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย

เนื่องจากเทคโนโลยีในปัจจุบันออสซิลโลสโคปได้มีการพัฒนาระบบการประมวลผล และการทำงานได้เหมือนกับระบบปฏิบัติการ Windows ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้ออสซิลโลสโคป มีฟังก์ชันในการทำงานที่หลากหลายมากขึ้น ประกอบกับปัญหาในการวัดรูปคลื่นอิมพัลส์แบบเดิม ที่

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยทำให้ออสซิลโลสโคปสามารถวิเคราะห์ และคำนวณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ด้วยตัวเอง โดยที่ไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งสามารถช่วยลดระยะเวลาในการทำการทดสอบอุปกรณ์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

1. เพื่อพัฒนาดีจิตอลออสซิลโลสโคป ให้สามารถวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ในตัวสโคปเอง
2. เพื่อลดการนำเข้าระบบประเมินค่าองค์ประกอบของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากต่างประเทศ
3. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านไฟฟ้าแรงสูงให้กับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

ในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ คณะผู้จัดทำได้ออกแบบโปรแกรมเพื่อในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าบนออสซิลโลสโคป สำหรับการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของอุปกรณ์ ได้แก่ การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ของหม้อแปลงด้านแรงดันสูง แรงดันอิมพัลส์ของหม้อแปลงด้านแรงดันต่ำ การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของสายเคเบิล และการทดสอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่เป็นไปตามขีดความสามารถของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยคณะผู้ทำวิจัยได้ออกแบบโปรแกรม โดยใช้โปรแกรมภาษา VBscript ในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และทำการติดตั้งลงบนออสซิลโลสโคปยี่ห้อ TELEDYNE LECROY

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. ศึกษาการเขียนโปรแกรม VBscript
2. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า
3. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง
4. ศึกษาการใช้งาน TELEDYNE LECROY SCOPE
5. ทำการเขียนโปรแกรมวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.5 แผนการดำเนินงานและการปฏิบัติงานจริง

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

ลำดับ	ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ.2563					พ.ศ.2564		
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1	ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	■	■						
2	ออกแบบโปรแกรมวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า		■	■	■				
3	ทำการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากมาตรฐาน				■	■			
4	นำโปรแกรมไปทดสอบกับการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า					■	■		
5	ปรับปรุงและพัฒนาโปรแกรมให้สมบูรณ์						■	■	
6	สรุปโครงการและนำเสนอ								■

หมายเหตุ

■ คือ แผนการดำเนินโครงการที่ได้กำหนดไว้

↔ คือ แผนการดำเนินโครงการที่ดำเนินจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถพัฒนาดีจิตอลออสซิลโลสโคป ให้วิเคราะห์องค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าได้ในตัวดีจิตอลออสซิลโลสโคปเอง
2. สามารถลดการนำเข้าระบบประเมินค่าองค์ประกอบของแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าจากต่างประเทศ
3. สามารถส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านไฟฟ้าแรงสูงให้กับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินทรานเซียนต์ ซึ่งเกิดจากสาเหตุภายนอก ที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง อันเนื่องมาจากการทำงานของสวิตช์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซึ่ง สำหรับการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นในห้องทดสอบนั้น มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาวิจัย หรือทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ก่อนที่จะถูกนำไปติดตั้ง เพื่อยืนยันความสามารถของ ความคงทนต่อแรงดันเกินเหล่านี้ที่เกิดขึ้น ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์ ไม่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันสูงเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับการแปรของแรงดันไปตามเวลาอีกด้วย ฉะนั้น เพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จึงกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานขึ้น โดยยึดถือเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์

2.1 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานจะกำหนดลักษณะของรูปคลื่น คือ

1. ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มีคลื่นระลอกซ้อน ซึ่งเกิดจากการแกว่งไกว ๆ ยอดรูปคลื่นให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
2. ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
3. เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 คือ ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึงค่ายอด
4. เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 คือ ช่วงเวลาตั้งแต่แรงดันต้นเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด
5. แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะเรียกว่า รูปคลื่น 1.2/50 us
6. แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตช์ซึ่งจะเรียกว่า รูปคลื่น 250/2500 us

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งเป็น

- รูปคลื่นเต็ม (Full wave) หมายถึง รูปคลื่นที่ขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด แล้วค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อการค้าไม่ว่ากรณีใดก็ตามหากฉนวนของวัสดุทดสอบทนไม่ได้ จะเกิดการสปาร์กผ่าน เกิดความไหม้ไหม้หรือเกิด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเบรกดาวนจ์จะทะเลาะ ทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น การเกิดคลื่นตัดนี้ อาจเกิดขึ้นที่ส่วนหลังคลื่นดังรูปที่ 2.2 หรือส่วนหน้าคลื่นดังรูปที่ 2.3

- รูปคลื่นตัดมีส่วนกำหนดสำคัญ คือ เวลาช่วงคลื่นตัด (Chopped time) T_c

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เวลาหลังคลื่น T_2 และค่ายอด U_p ไว้คือ

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \text{ us} + 30 \%$

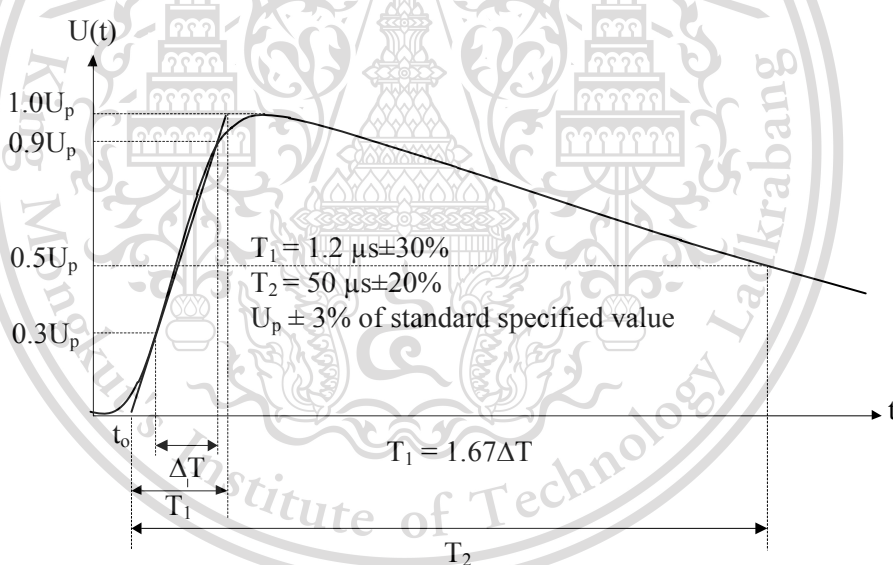
เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 50 \text{ us} + 20 \%$

ค่ายอดแรงดัน $U_p \pm 3 \%$

ส่วนแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตซ์ซิ่ง 250/2500 us ดังรูปที่ 2.4 กำหนดด้วยเวลา คือ

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_{cr} = 250 \text{ us} + 20 \%$

เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 2500 \text{ us} + 60 \%$



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

เมื่อ T_1 คือ ช่วงเวลาหน้าคลื่น

T_2 คือ ช่วงเวลาหลังคลื่น

U_p คือ ค่ายอดแรงดัน

ΔT คือ ผลต่างของเวลาที่ค่าแรงดัน 90% ของค่ายอด กับเวลาที่ค่าแรงดัน 30% ของค่ายอด

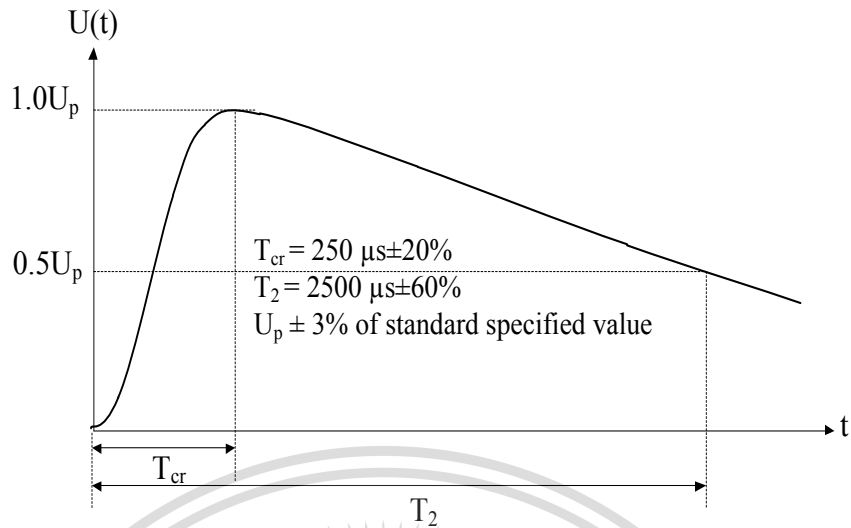
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีเหตุอันสมควร และต้องขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ก่อนนำไปใช้

แกน t

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง

เมื่อ T_{cr} คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น

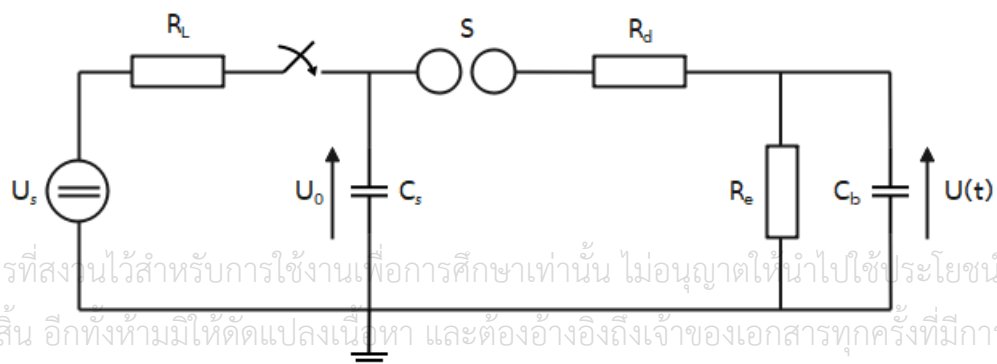
T_2 คือ เวลาช่วงหลังคลื่น

U_p คือ ค่ายอดแรงดัน

2.2 วงจรพื้นฐานของการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

การสร้างแรงดันอิมพัลส์จะอาศัยหลักการของวงจรสภาวะชั่วคราว R_c โดยการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการแล้วปล่อยให้คายประจุผ่านวงจร R_c ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้มีรูปคลื่นตามต้องการได้ วงจรพื้นฐานที่นิยมใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วยองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ก) วงจร A

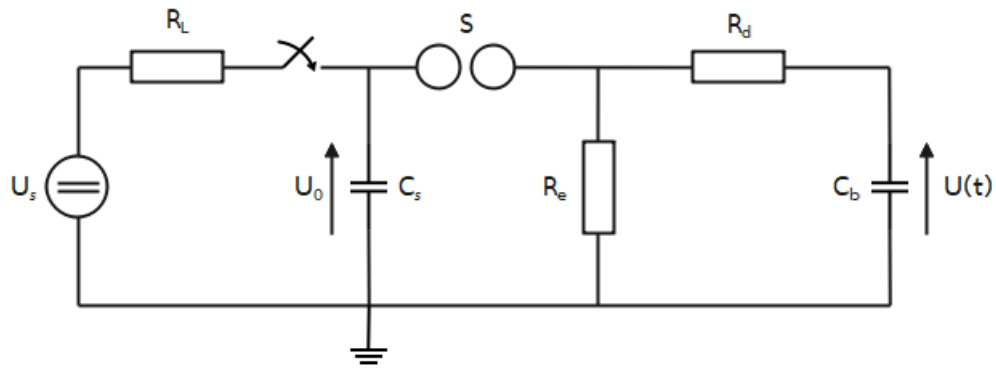


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ข) วงจร B



รูปที่ 2.3 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจร A และวงจร B

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

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจร คือ แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง U_s เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่เป็นตัวเก็บพลังงาน มีค่าแรงดันที่กำหนด U_0 การอัดประจุนี้จะผ่านความต้านทาน R_L ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมเวลาและกระแสในการอัดประจุ ระยะห่างของสปาร์กแกป S จะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันที่เริ่มทำงานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่ายอดตามต้องการ สปาร์กแกปจึงต้องทำงานร่วมกับไกสวิตช์ (Trigger) ที่มีลักษณะเป็นแกปช่วย (Auxiliary gap) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ C_s ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดสปาร์กในช่องสปาร์กแกปจะดำเนินไปด้วยความรวดเร็ว ในขณะที่เกิดสปาร์กที่สปาร์กแกป S แรงดันอัดประจุ U_0 จะตกคร่อม R_d และ C_b ประจุจะถ่ายเทไปยังวัสดุทดสอบ ซึ่งแทนด้วย C_b สำหรับเวลาในการปล่อยประจุจาก C_s ไปยัง C_b จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ R_d และ C_b ซึ่งนับเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายเทประจุให้ C_b

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นหากมีเหตุสุดวิสัย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้
ไปยัง C_b จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ R_d และ C_b ซึ่งนับเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายเทประจุให้ C_b

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จนกระทั่งแรงดันตกคร่อม C_s เท่ากับแรงดันที่ตกคร่อม C_b ซึ่งจะไม่มีการถ่ายเทประจุระหว่าง C_s กับ C_b จากนั้น C_s และ C_b จะทำการปล่อยประจุผ่าน R_e จึงกล่าวได้ว่า R_e ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหลังคลื่น T_2

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกจากปลายแรงสูง U จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ U_0 เพราะมีการถ่ายเท ประจุระหว่าง C_s และ C_b ฉะนั้นอัตราส่วนของ U ต่อ U_0 จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็น ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ประสิทธิภาพของวงจรสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

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

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูง และให้ได้รูปคลื่นตามมาตรฐานกำหนดควรเลือกให้ C_s มีค่าสูงกว่าโหลด C_b มาก ๆ โดยทั่วไปจะให้ $C_s \geq 10C_b$

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด U_n (kV)
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด U_0 (kV)
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_s (μF)
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด W_e (kJ)
- อัตราการดีสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่า หรือแบบสวิตซ์ซึ่ง

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้า C_s และแรงดันอัดประจุ U_0 ซึ่งค่าพลังงานคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

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

เมื่อ W คือ พลังงานอัดประจุเป็น kJ

C_s คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็น μF

U_0 คือ แรงดันอัดประจุเป็น kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วย องค์ประกอบดังนี้

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

2.3.1 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ทำหน้าที่เก็บพลังงานไว้ในรูปสนามไฟฟ้า โดยการอัดประจุด้วยแรงดันสูงกระแสตรง แล้วคายพลังงานออกไปอย่างรวดเร็ว ตัวเก็บประจุอิมพัลส์จึงต้องเป็นประเภทที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันที่สร้างขึ้นไม่เกิดการแกว่ง (Oscillation)

ค่าความจุไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน (1.2/50 us) ได้ โดยปกติค่าตัวเก็บประจุ (C_s) จะต้องมีค่ามากกว่าค่าตัวเก็บประจุโหลด (C_b) อย่างน้อย 10 เท่า นั่นคือ

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

2.3.2 ตัวเก็บประจุโหลด (C_b) ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโหลด (C_b) หมายถึง ผลรวมของความจุไฟฟ้าของวัสดุ และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ปลอกฉนวนนำสายหม้อแปลงวัดแรงดันและกระแสโวลต์เตจตีไวเตอร์ รวมทั้งตัวเก็บประจุที่ต่อเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อปรับรูปคลื่นให้ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งตัวเก็บประจุโหลด (C_b) มีส่วนสำคัญในการปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กับช่วงเวลาหน้าคลื่น แต่จะมีผลน้อยต่อช่วงเวลาหลังคลื่น คุณสมบัติของตัวเก็บประจุโหลดจะต้องมีค่าพิคัดแรงดันมากกว่าค่าแรงดันทดสอบของวัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบ และควรมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s)

2.3.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะมีการกำหนดความถี่ของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไว้ เช่น 3 ครั้งต่อนาทีเพราะการใช้เครื่องกำเนิดให้ทำการคายประจุ และอัดประจุด้วยอัตราเร็วมากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสียต่อองค์ประกอบต่างๆ เช่น วงจรเรียงกระแส (ไดโอดแรงสูง และตัวเก็บประจุกรองกระแส) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ และความต้านทานปรับรูปคลื่น เพราะว่าการคายประจุจะเป็นแบบสภาวะทรานเซียนต์ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสอย่างรวดเร็ว นั่นก็คือ การเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของสนามไฟฟ้า ซึ่งมีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ในวงจรของเครื่องกำเนิดในด้านความคงทน

ต่อแรงดันไฟฟ้า หรือความเครียดสนามไฟฟ้าอันจะทำให้อายุการใช้งานขององค์ประกอบสั้นลง หากใช้งานอย่างต่อเนื่อง ฉะนั้นจึงต้องไม่ให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ ทำการอัดประจุหรือคายประจุมากเกินไป ซึ่งการจำกัดอัตราการอัดประจุอาจทำได้โดยใช้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ซึ่งจะต่ออนุกรมคั่นอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) เพื่อให้กระแสอัดประจุมีค่าไม่เกินค่า พิกัดกระแสของแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง (i) ซึ่งขึ้นอยู่กับ อัตราการเพิ่มแรงดันอัดประจุ du/dt จะต้องไม่ควรเร็วเกินไป ดังนั้น ค่ากระแสอัดประจุจึงเขียนได้ตามสมการที่ 2.4

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

นอกจากนี้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ต้องมีความคงทนต่อแรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ได้ เพราะความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) จะต้องรับแรงดันเท่ากับพิกัดของแรงดันอัดประจุเมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุเต็ม นอกจากการพิจารณาเลือกค่าความต้านทานและความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์แล้วยังต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุที่มีค่าสูงพอ เมื่อต้องรับกระแสอัดประจุตลอดเวลาที่อัดประจุได้

2.3.4 สปาร์กแกปและไกสวิตช์ แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบหรือการศึกษาวิจัยจะต้องสามารถสร้างให้มีขนาดเท่าเดิมกี่ครั้งก็ได้ ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 60060-1 ได้กำหนดให้มีค่าคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน $\pm 3\%$ การควบคุมให้ขนาดแรงดันเท่าเดิมดังกล่าวนี้ ทำได้โดยใช้ ไกสวิตช์บังคับให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เริ่มต้นปล่อยประจุที่แรงดันอัดประจุที่กำหนด ไกสวิตช์จะเป็นตัวทำให้เกิดการสปาร์กที่แกปช่วย (Auxiliary gap) ซึ่งเป็นแกปแคบ ๆ ขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร อยู่ที่ด้านหนึ่งของสปาร์กแกปคู่แรกของเครื่องกำเนิดดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 แกปช่วยนี้จะเป็นสัญญาณพัลส์ซึ่งทำให้เกิดการสปาร์กขึ้นในแกปช่วยก่อน ผลของการเกิดสปาร์กในแกปช่วยนี้ทำให้เกิดการไอออไนเซชันของอากาศและเกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นระหว่างสปาร์กแกปคู่แรก และเกิดการปล่อยประจุที่สปาร์กแกป เป็นผลให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวแรกต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวที่สอง และเกิดสปาร์กที่แกปถัดไปเป็นลำดับจนถึงแกปคู่สุดท้ายหรือคู่บนสุดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และเป็นการเริ่มต้นคายพลังงานให้กับตัวเก็บประจุโหลด ซึ่งจะได้แรงดันอิมพัลส์ตามที่ต้องการ ฉะนั้นการใช้ไกสวิตช์ช่วยเริ่มต้นจุดสปาร์ก จึงทำให้สามารถกำหนดแรงดันคายประจุได้อย่างแม่นยำ

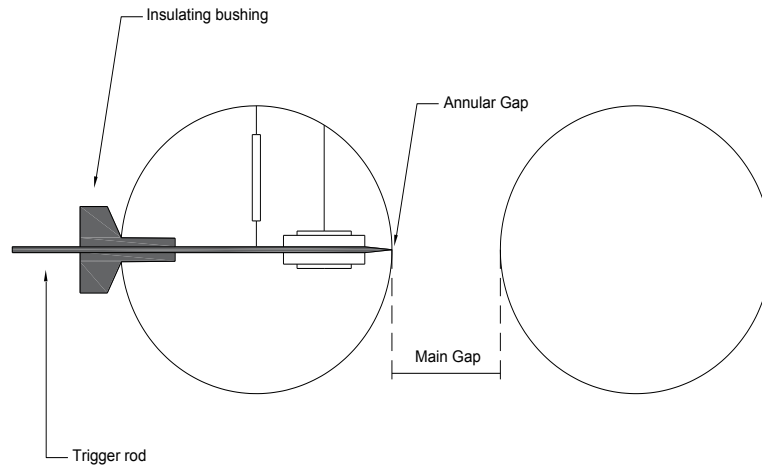
สัญญาณพัลส์ที่ใช้สำหรับทำให้เกิดสปาร์กในแกปช่วยนั้น โดยทั่วไปจะใช้สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์

ความเร็วสูงร่วมกับวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์สร้างพัลส์ โดยแรงดันของพัลส์นี้มีค่าประมาณ 5 - 10 kV และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จะต้องทำให้เกิดสปาร์กแกปภายในเวลา 10 - 100 ns

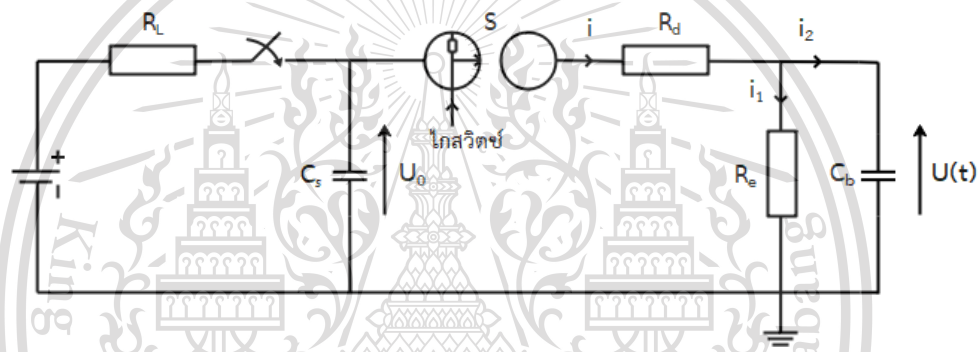
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



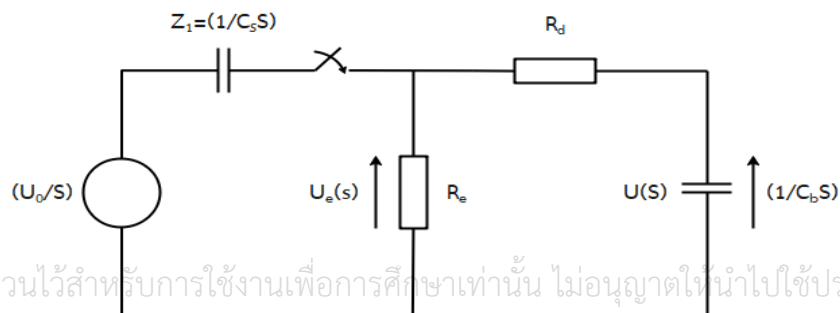
รูปที่ 2.4 อิเล็กโทรดสปาร์กแกป



รูปที่ 2.5 สปาร์กแกปมีเกสวิตช์

2.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์

2.4.1 การแปรของแรงดันในเทอมของเวลา อาศัยการวิเคราะห์จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์ เช่น วงจรพื้นฐาน B ในรูปที่ 2.3 ข) เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ด้วยแรงดันอัดประจุ (U_0) และเกิดสปาร์กที่สปาร์กแกป S จะทำให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ต่อกับวงจรปรับรูปคลื่น การวิเคราะห์ที่ใช้ Laplace transform เขียนวงจรสร้างแรงดันได้ดังรูปที่ 2.



รูปที่ 2.6 ลาปลาซทรานฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากวงจรในรูปที่ 2.6 ค่าแรงดันตกคร่อม R_e จะเขียนได้ดังสมการที่ 2.6

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

เมื่อ
$$Z_1 = \frac{1}{C_s s} \quad (2.7)$$

$$Z_1 = \frac{R_e(R_d + \frac{1}{C_b s})}{R_e + R_d + \frac{1}{C_b s}} \quad (2.8)$$

นำสมการ (2.7) และ (2.8) แทน (2.6)

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

แรงดันที่จ่ายออกจากโหนดคิดจาก $U_e(s)$ ตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์จะได้

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

แทน $U_e(s)$ ด้วยสมการ (2.9)

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

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

ซึ่งอาจเขียนได้ในภาพแบบง่าย ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$U(s) = \frac{U_0}{K} \frac{1}{S^2 + BS + B_0}$$
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และห้องเรียนของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$= \frac{U_0}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[\frac{1}{(S - \alpha_1)} - \frac{1}{(S - \alpha_2)} \right] \quad (2.10)$$

เมื่อกำหนดให้

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

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

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

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

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

จึงเขียนค่าแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลาได้ดังนี้

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

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

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

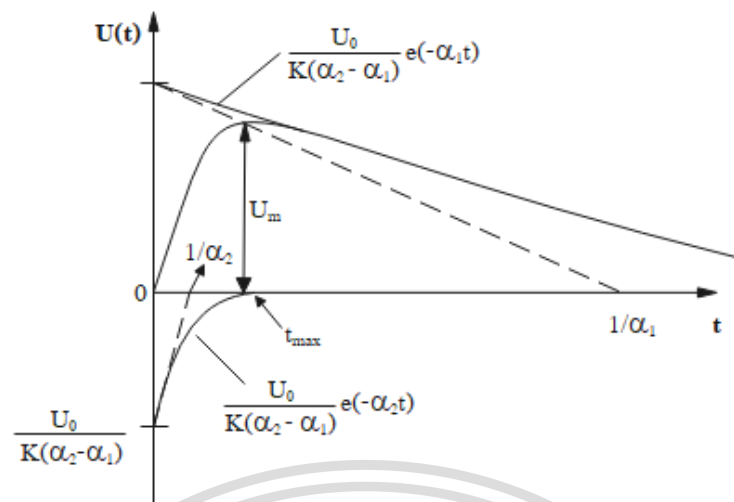
	B_1	B_0	K
วงจร A	$\frac{R_d C_s + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_s C_b}$	$\frac{1}{R_d R_e C_b C_s}$	$R_d C_b$
วงจร B	$\frac{R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s}{R_d R_e C_s C_b}$	$\frac{1}{R_d R_e C_b C_s}$	$R_d C_b$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม

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

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

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

กรณีของรูปคลื่น 1.2/50 μs ค่าคงตัวจะมีค่า

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

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

2.4.2 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร การสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นใด กำหนดด้วยค่า T_1 และ T_2 ปกติเราจะเริ่มต้นมาจากค่าความจุไฟฟ้าของโหลด (C_b) ก่อนและเลือกตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ให้สอดคล้องกับตัวเก็บประจุโหลด (C_b) กล่าวคือตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) เป็นตัวเก็บพลังงานได้มากพอที่จะจ่ายถ่ายเทให้กับโหลด ดังนั้นเมื่อทราบค่าตัวเก็บประจุโหลด (C_b) และตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) แล้ว องค์ประกอบที่เหลือต้องคำนวณคือความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) และความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e) ซึ่งอาจหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงตัวเวลา

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

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จะได้ $\alpha_1 + \alpha_2 = B_1$

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 = B_1$$

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

วงจร A

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

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

วงจร B

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

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

2.4.3 ประสิทธิภาพของวงจร (η) เมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ หมายถึง อัตราส่วนค่ายอดของแรงดันที่สร้างขึ้นออกมาได้ ต่อค่าแรงดันอัดประจุปกติ จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอทั้งวงจร A หรือวงจร B

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

เมื่อ U_m คือค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ $u(t)$

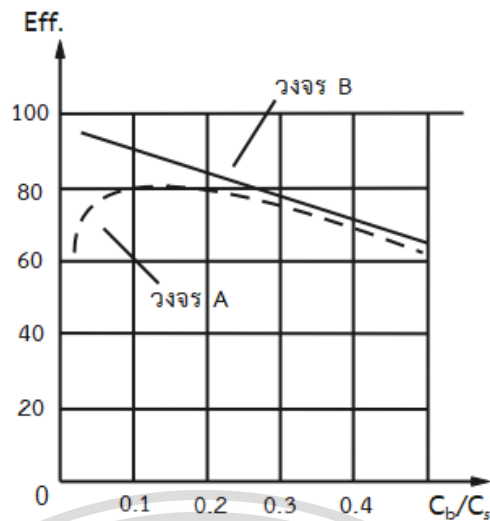
U_0 คือแรงดันอัดประจุให้กับ C_s

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

2.4.4 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่น T_1 และ T_2 ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของวงจรอิมพัลส์ ถ้าจำเป็นต้องการทราบค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงหลังคลื่น อาจคำนวณค่าโดยประมาณได้จากวิธีการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าองค์ประกอบเวลา T_1, T_2 และประสิทธิภาพของวงจร A และวงจร B

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

การคำนวณที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ถือว่าวงจรที่ใช้คำนวณ ไม่มีค่าความเหนี่ยวนำในทางปฏิบัติ

รูปคลื่นที่ได้มักจะแตกต่างไปจากทฤษฎี โดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและค่ายอดของแรงดัน ทั้งนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรู๊โงวาว เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า เนื่องจากในวงจรมีความเหนี่ยวนำซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ อาจทำให้เกิดการแกว่งบริเวณยอดคลื่นขึ้นได้ ไม่ว่าจะกรณีใดข้างต้น ถือทั้งห้าเป็นห้าต้นแปลงเป็นห้า และต้องควมถึงถึงเจ้าของ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ดังนั้นความต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d ต้องมีค่ามากกว่าวิกฤตของวงจร ดังสมการที่ 2.23

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

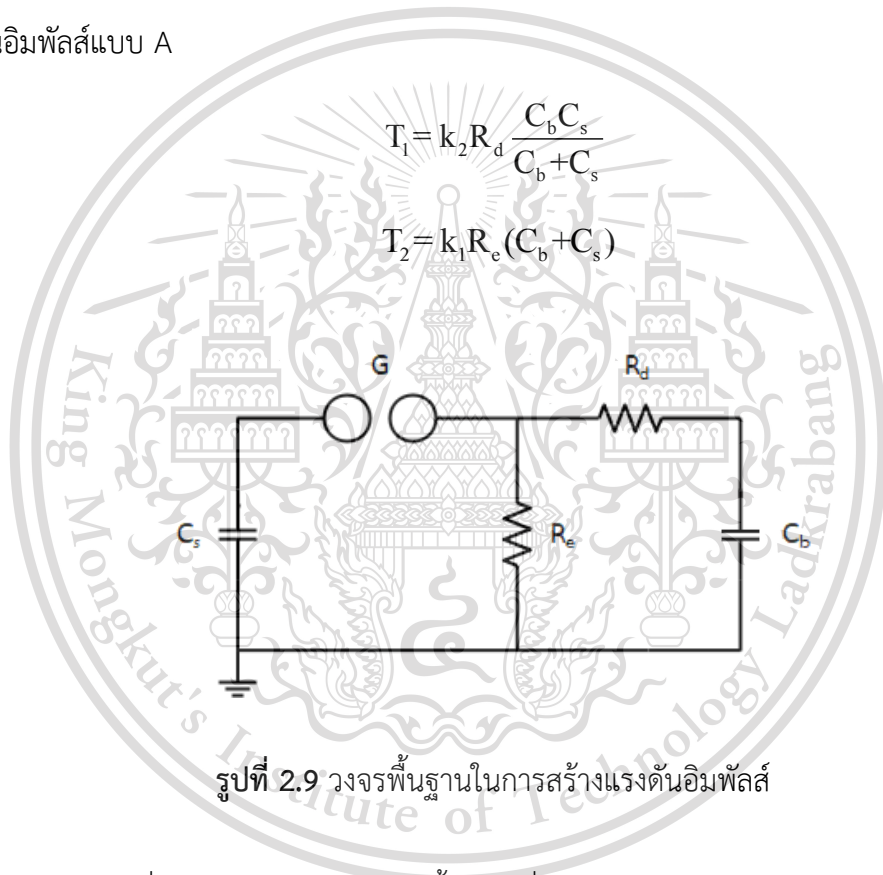
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ส่วนใหญ่จะเลือกใช้วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันพื้นฐานแบบ B หรือวงจรแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าถูกสร้างขึ้นโดยวงจรมาร์ก (Max's Circuit) ที่ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน (C_s) ตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ตัวต้านทานปรับหลังคลื่น (R_e) และตัวเก็บประจุโหลด (C_b) ซึ่งค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่นและตัวเก็บประจุโหลดจะควบคุมเวลาหน้าคลื่น (T_1) ส่วนค่าความต้านทานปรับหลังคลื่นและค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์จะควบคุมเวลาหลังคลื่น (T_2) โดยที่เวลาหน้าคลื่นและเวลาหลังคลื่นต้องสอดคล้องตามมาตรฐานซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25 ซึ่งวงจรถูกกล่าวว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ A

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

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



รูปที่ 2.9 วงจรพื้นฐานในการสร้างแรงดันอิมพัลส์

แต่วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พื้นฐานเมื่อทำการทดสอบกับโหลดชนิดตัวเหนี่ยวนำต่ำพบว่า วงจรกำเนิดแรงดันสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด โดยที่เวลาหลังคลื่นจะน้อยกว่า $40 \mu s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5 การวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ และการเปรียบเทียบกับรูปคลื่นตามที่มีมาตรฐานกำหนด

2.5.1 การคำนวณเวลาหน้าคลื่นหลังคลื่น

ในการวัดแรงดันเกินหรือสัญญาณที่เกิดขึ้นชั่วขณะ เช่น แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า สามารถวัดได้โดยใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital oscilloscope) ซึ่งมีประโยชน์ในเรื่องของการคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่น จากการบันทึกสัญญาณและวิธีการที่ได้ในดิจิตอลออสซิลโลสโคป แต่อุปกรณ์บางอย่างในดิจิตอลออสซิลโลสโคปนั้นก็อาจจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ต่อองค์ประกอบของรูปคลื่นได้

การวัดแรงดันอิมพัลส์หรือกระแสอิมพัลส์นั้น ทำเพื่อตรวจสอบว่าแรงดันอิมพัลส์ หรือกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นมานั้นเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่

แรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานกำหนด คือ มาตรฐาน IEC 60060-1

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ หมายถึง จะต้องอยู่ในช่วง 0.84-1.56 μs

เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20\%$ หมายถึง จะต้องอยู่ในช่วง 40-60 μs

ค่ายอดแรงดัน U_m ยอมให้ผิดพลาดได้ $\pm 3\%$ ของค่าระบุรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

กระแสอิมพัลส์ที่มีมาตรฐานกำหนด คือ

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 4 \mu\text{s} \pm 10\%$

เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 10 \mu\text{s} \pm 10\%$

ค่ายอดกระแส ยอมให้ผิดพลาดได้ $\pm 10\%$

ค่ายอดกระแสชั่วตรงข้าม ($-\hat{I}$) ยอมให้ผิดพลาดได้ ไม่เกิน 20% ของ \hat{I}

การทดสอบความคงทนอยู่ได้ของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์นั้น ต้องการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีลักษณะราบเรียบ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับฉนวนหรืออุปกรณ์ที่นำมาทดสอบ หากรูปคลื่นที่สร้างขึ้นเกิดการแกว่ง หรือเกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) ขึ้นมา จะสามารถคำนวณค่าองค์ประกอบได้ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 ตามที่ระบุไว้ คือ

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 คำนวณได้จาก เวลา ณ ขณะที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีค่า 90% ของ

แรงดันค่ายอด มาลบด้วยเวลา ณ รูปคลื่นแรงดันมีค่า 30% ของแรงดันค่ายอด แล้วคูณด้วย 1.67 จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ได้ดังสมการ 2.26

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_1 = 1.67(t_{90} - t_{30}) \quad (2.26)$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 คำนวณได้จาก เวลา ณ ขณะทีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ผ่านแรงดันค่า ยอดแล้วลดจนเหลือ 50 % ของแรงดันค่ายอด ลบกับเวลา ณ ขณะทีแรงดันอิมพัลส์เริ่มเกิด จะได้ ดังสมการ 2.27

$$T_2 = t_{50} - t_0 \quad (2.27)$$

$$\text{โดยที่เวลา } t_0 \text{ นั้นสามารถคำนวณได้จาก } t_0 = t_{30} - \frac{U_{30}}{U_{90} - U_{30}}(t_{90} - t_{30}) \quad (2.28)$$

2.5.2 กรณีการเกิดการแกว่ง (Oscillation)

ในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดการแกว่ง และการเกิดส่วนพุ่งเกินได้ แม้ว่า วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์จะประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) แต่ก็สามารถเกิดความเหนี่ยวนำขึ้นมาได้ ซึ่งอาจเกิดมาจากวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ หรืออุปกรณ์ที่นำมาทดสอบเป็น หม้อแปลงไฟฟ้าที่ขดลวดจะมีค่าความเหนี่ยวนำ

มาตรฐาน IEC 60016-1 จึงได้กำหนดวิธีการประเมินค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีการเกิดการแกว่ง และส่วนพุ่งเกินขึ้นมาใหม่ เพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน ที่จะใช้ไปทั่วโลก ด้วยวิธีการ k-factor filter ในการลดทอนสัญญาณการแกว่ง (Oscillator) โดยมีขั้นตอนวิธีการดังนี้

1.) ทำการตัดสัญญาณในช่วงที่มีค่าน้อยกว่า 20% ของค่ายอดทางด้านหน้าคลื่น และสัญญาณที่มีค่าน้อยกว่า 40% ของค่ายอดในช่วงหลังคลื่นออก

2.) นำรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากข้อ 1 มาทำการหากราฟที่เหมาะสมสำหรับข้อมูล (Curve fitting) โดยใช้ฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล 2 ฟังก์ชัน ดังสมการ 2.29

$$g(t) = Ae^{-\alpha t} - Be^{-\beta t} \quad (2.29)$$

ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 4 ตัว คือ A, B, α และ β ที่เกี่ยวข้องกับเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่น หลังจากผ่านการทำการหากราฟที่เหมาะสมสำหรับข้อมูล จะได้รูปคลื่นฐาน (Base curve) ออกมา

3.) นำรูปคลื่นฐานที่ได้ไปลบออกจากรูปคลื่นที่บันทึก (Recorded curve) จะได้เป็นรูปคลื่นเหลือ (Residual curve) และนำไปผ่านการกรองด้วย k-factor filter (zero-phase and IIR filter) ซึ่งมีสมการดังสมการ 2.30

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

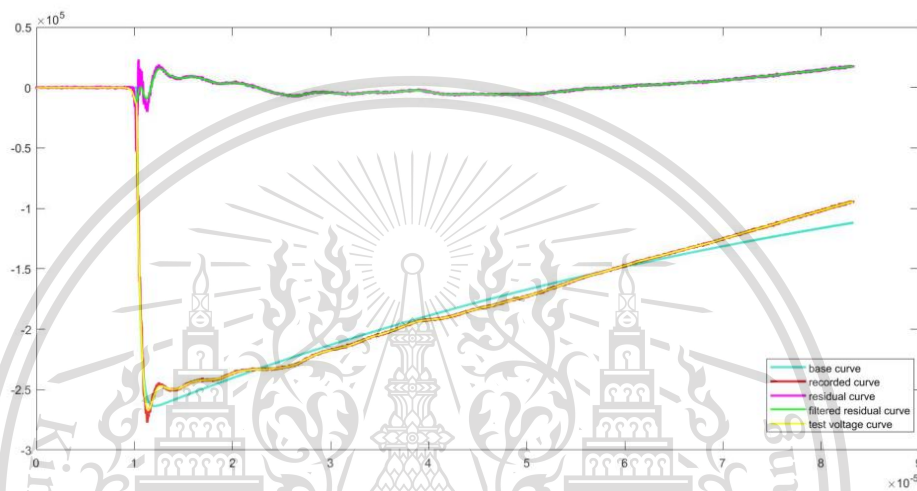
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$k(f) = \frac{1}{(1+2.2f^2)} \quad ; \quad f \text{ คือ ความถี่หน่วย MHz} \quad (2.30)$$

รูปคลื่นที่ผ่านการกรองด้วย k-factor filter จะเรียกว่า Filtered residual waveform

4.) นำสัญญาณที่ได้จากการกรองด้วยฟิลเตอร์ไปบวกกับรูปคลื่นฐาน ที่ได้จากข้อ 2 จะได้รูปคลื่นทดสอบ (Test waveform) มาใช้ในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

$$U_{\text{test}}(t) = U_{\text{base}}(t) + k(f) \cdot (u(t) - U_{\text{base}}(t)) \quad (2.31)$$



รูปที่ 2.10 กระบวนการที่ใช้ในการหาการรูปคลื่นทดสอบ

รูปคลื่นทดสอบจะใช้ในการประเมินหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ตามวิธีการของมาตรฐาน เช่น เวลาช่วงหน้าคลื่น (T_1), เวลาช่วงหลังคลื่น (T_2), เวลา ณ ขณะที่มีค่าแรงดันเป็น 50% ของค่ายอดแรงดัน และอัตราการเกิดส่วนพุ่งเกิน (β) หรือความต่างของค่ายอดแรงดันระหว่างรูปคลื่นที่บันทึก กับรูปคลื่นฐาน

โดยที่
$$\beta = U - U_b \quad (2.32)$$

$$\beta' = \frac{U - U_b}{U} \times 100\% \quad (2.33)$$

เมื่อ β คือ Overshoot magnitude

β' คือ Relative overshoot

U คือ ค่ายอดแรงดันของ Recorded voltage waveform

U_b คือ ค่ายอดแรงดันของ Base waveform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

มาตรฐาน IEC 60060-1 ได้กำหนดอัตราการเกิดการแกว่งและส่วนพุ่งเกิน ที่ยอมรับได้ว่าต้องมีค่าน้อยกว่า 5% นอกจากนี้ยังระบุไว้ว่า ถ้าเกิดการแกว่งที่มีความถี่มากกว่า 500 kHz หรือการเกิดส่วนพุ่งเกิน ที่มีระยะเวลาสั้นกว่า 1 μ s ค่ายอดแรงดันจะถูกกำหนดโดยรูปคลื่นฐาน

2.6 การประมาณหาค่ากราฟที่เหมาะสม (Curve Fitting)

การประมาณหาค่ากราฟที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลแต่ละประเภทสามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ ในที่นี้จะกล่าวถึงการประมาณค่าของข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ด้วยวิธีการของการสร้างแบบจำลองถดถอย หรือที่เรียกว่า “Nonlinear Regression”

2.6.1 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้สำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Dependent Variables) กับตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไป การวิเคราะห์การถดถอยใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายสาขาวิชา เช่น การแพทย์ วิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และทางเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น การวิเคราะห์การถดถอยระหว่างตัวแปรอิสระหนึ่งตัวและตัวแปรตามหนึ่งตัว โดยที่ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกัน เรียกรวมการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) หากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ไม่เป็นเส้นตรง เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression Analysis) หากมีตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัว แต่ตัวแปรตามเพียงตัวเดียว เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) หากมีตัวแปรตามมากกว่าหนึ่งตัว เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยพหุตัวแปร (Multivariate Regression Analysis)

2.6.2 วิธีการประมาณแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Approaches to Estimating Nonlinear Regression Models)

ในการประมาณแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงแบบพหุคูณมีหลายวิธีได้แก่ วิธีหาค่าที่เหมาะสมโดยตรง (Direct Optimization) การหาค่าอนุพันธ์เทียบกับตัวสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าและกำหนดให้เท่ากับ 0 และแก้สมการหาค่าออกมา วิธีดังกล่าวนี้ ได้แก่ วิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Nonlinear Least Square: NLS) อีกวิธีที่ใช้ประมาณแพร่หลายมากคือ วิธีการทำให้อยู่ในรูปเชิงเส้นตรงซ้ำ (Iterative Linearization Method) คือ การทำให้สมการอยู่ในรูปเส้นตรง (Linearized) รอบค่าขององค์ประกอบค่าใดค่าหนึ่งในตอนแรก โดยสมการที่ถูกทำให้อยู่ในรูปเชิงเส้นตรงจะถูกประมาณด้วยวิธี Ordinary Least Squares ผลคือ ค่าที่ถูกเลือกในตอนแรกจะถูกรับค่า โดยค่าที่ถูกปรับเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการปรับแบบจำลองให้อยู่ในรูปเชิงเส้นตรงอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หนึ่ง กระบวนการนี้จะทำต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่าที่ประมาณได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการ ปรับแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงให้เป็นเชิงเส้นตรงคือ การกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series Expansion) วิธีที่ใช้หลักการนี้ได้แก่วิธี Newton-Raphson (Newton-Raphson Method) และ วิธี Gauss-Newton (Gauss-Newton Method) นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าองค์ประกอบได้โดยวิธีภาวะน่าจะเป็นมากที่สุด (Maximum Likelihood)

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะ วิธีการประมาณแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง โดยวิธีการ Gauss-Newton

2.6.3 วิธี Gauss-Newton (The Gauss-Newton Method)

วิธีของ Gauss-Newton เป็นวิธีที่อาศัยการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์ในการประมาณแบบจำลองถดถอยที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงด้วยพจน์ที่เป็นเชิงเส้นตรง (Linear Terms) จากนั้นใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดประมาณค่าองค์ประกอบออกมา กระบวนการดังกล่าวจะทำซ้ำไปเรื่อยจนกระทั่งได้คำตอบออกมา

รูปแบบทั่วไปของสมการการวิเคราะห์ความถดถอย

$$y_i = f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_k) + e \quad (2.34)$$

เมื่อ y_i คือ พังก์ชันถดถอยของ x_i กับ a_0, a_1, \dots, a_k โดยที่ e คือ ความผิดพลาดระหว่างข้อมูลที่จำลองจากการทำการหากราฟที่เหมาะสมของข้อมูลกับค่าของข้อมูลจริง

เนื่องจากวิธีการของ Gauss - Newton อาศัยการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์ ซึ่งสามารถกระจายฟังก์ชัน $f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_k)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันเหมาะสำหรับการหากราฟที่เหมาะสมที่จำลองขึ้นมาได้ดังสมการ

$$f(x_i)_{j+1} = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + \dots + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_k} \Delta a_k \quad (2.35)$$

แทนค่าในสมการที่ 2.38 ในสมการที่ 2.37 จะได้ว่า

$$y_i - f(x_i)_j = \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + \dots + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_k} \Delta a_k \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This document is a copyrighted work of the author, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$[\Delta Y] = [J_i][\Delta A] + [E] \quad (2.37)$$

เมื่อ ΔY คือ ค่าความแตกต่างที่ระหว่างค่า Y จริงและค่า Y ที่ได้จากการประมาณค่าโดย
แบบจำลองถดถอย

J_i คือ เมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix)

ΔA คือ ความต่างระหว่างค่าองค์ประกอบของรูปคลี่พื้นฐานปัจจุบันกับค่าองค์ประกอบของ
รูปคลี่พื้นฐานครั้งก่อนหน้า

E คือ ความผิดพลาดระหว่างข้อมูลจริงกับค่าของข้อมูลที่ได้จากการหากราฟที่เหมาะสม

วิธีการของ Gauss-Newton ต้องมีการกำหนดค่าองค์ประกอบเริ่มต้นของการหากราฟที่เหมาะสม ซึ่งอาจจะได้มาจากการศึกษาในเบื้องต้นหรือจากการศึกษาจากทฤษฎี จากนั้นทำการประมาณโดยใช้พจน์ที่เป็นเชิงเส้นตรงในการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์รอบ ๆ ค่าเริ่มต้นที่กำหนด โดยมีเป้าหมาย คือ ประมาณสัมประสิทธิ์ออกมาให้ได้และใช้ค่าดังกล่าวในการปรับค่าองค์ประกอบที่ได้จากการถดถอยเริ่มแรก และจะกระทำซ้ำจนกระทั่งได้ค่า ΔA มีค่าประมาณศูนย์ ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่าขององค์ประกอบของรูปคลี่พื้นฐานได้ กระบวนการนี้จะอาศัยการดำเนินการทางเมทริกซ์ดังสมการที่

$$[\Delta A] = ([Z_i^t \ Z_i^t])^{-1} [Z_i^t \ \Delta Y] \quad (2.39)$$

การวนรอบทำซ้ำของวิธี Gauss-Newton ต้องมีการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ถดถอยที่ประมาณได้จากการปรับปรุงค่าเริ่มต้นขององค์ประกอบ ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อตรวจสอบค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าองค์ประกอบแต่ละตัว วิธีการของ Gauss-Newton จะทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์ที่ประมาณได้มีค่าน้อยหรือเข้าสู่ศูนย์

$$s_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i,\text{measured}} - y_{i,\text{model}})^2 \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.7 ข้อกำหนดสำหรับเครื่องมือวัดและเครื่องบันทึกแรงดันและกระแสอิมพัลส์

การทดสอบอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูง จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าแรงดันหรือกระแส โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งมีค่าแรงดันและกระแสสูง ดังนั้นจึงต้องใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง จึงมีการกำหนดมาตรฐานสำหรับเครื่องมือวัดและบันทึกแรงดันและกระแสอิมพัลส์ คือ มาตรฐาน IEC 61083-1 ซึ่งได้แบ่งข้อกำหนดของเครื่องมือวัดและบันทึกเป็น 3 หมวด ดังนี้

1. Digital recorders
2. Analogue oscilloscopes
3. Peak voltmeter

เนื่องจากในปัจจุบันการทดสอบอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูง อุปกรณ์ที่นิยมในการใช้วัดและบันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสอิมพัลส์ คือ ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Recorders) ดังนั้น ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเพียงข้อกำหนดตามมาตรฐานที่กล่าวถึงเฉพาะดิจิตอลออสซิลโลสโคปเท่านั้น โดยมาตรฐาน IEC 61083-1 ได้กำหนดคุณสมบัติของดิจิตอลออสซิลโลสโคปไว้ดังนี้

2.7.1 นิยามที่เกี่ยวข้องบางส่วน

Digital recorders หมายถึง ดิจิตอลออสซิลโลสโคป ที่สามารถบันทึกสัญญาณดิจิทัลของแรงดันสูงอิมพัลส์หรือกระแสสูงอิมพัลส์แบบชั่วคราวหรือสามารถเปลี่ยนเป็นการบันทึกแบบถาวรได้ โดย ดิจิตอลออสซิลโลสโคปสามารถแสดงรูปคลื่นในรูปของกราฟแบบอนาล็อกได้

ความละเอียดสูงสุด (Rated resolution) แสดงโดยกำลังสองของจำนวนบิตของการเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

Sampling rate หมายถึง อัตราการการ sampling ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

2.7.2 ข้อกำหนดสำหรับการวัดอิมพัลส์

ข้อกำหนดสำหรับการวัดอิมพัลส์ มีดังนี้

- 1.) ข้อกำหนดสำหรับเครื่องบันทึกดิจิทัลที่ใช้ในระบบการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยผู้จัดทำเอกสารนี้ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
ความไม่แน่นอนโดยรวมของเครื่องบันทึกดิจิทัลที่ใช้ในระบบการวัดที่ได้รับการรับรอง
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ใช้ควรปฏิบัติตามเงื่อนไขการใช้งานนี้ และแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 จะต้องไม่เกินค่าร้อยละดังต่อไปนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2% สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (กระแส) ของรูปคลื่นอิมพัลส์แบบเต็มและแบบตัดมาตรฐานของอิมพัลส์ฟ้าผ่า อิมพัลส์สวิตซ์ซิ่ง และอิมพัลส์แบบสี่เหลี่ยม

3% สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของอิมพัลส์ฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น

4% สำหรับการวัดค่าองค์ประกอบเวลาของรูปคลื่นอิมพัลส์ (เวลาหน้าคลื่นเวลาในการตัดรูปคลื่น เป็นต้น)

2.) Sampling rate

อัตราการสุ่มตัวอย่างต้องไม่น้อยกว่า $30 / T_x$ โดยที่ T_x คือ ช่วงเวลาในการวัด

หมายเหตุ $T_x = 0.6T_1$ คือ ช่วงเวลาระหว่าง T_{30} ถึง T_{90} ของอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่จะวัด สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น $1.2 / 50$ ค่าที่ต่ำกว่าที่อนุญาตของเวลาหน้าคลื่น T_1 คือ $0.84 \mu s$ ดังนั้น จึงต้องมีอัตราการสุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 60×10^6 S

3.) Rated resolution

ความละเอียดที่ต้องการใช้สำหรับการทดสอบที่มีการคำนวณค่าองค์ประกอบของอิมพัลส์จะต้องใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดประมาณ 2° หรือที่ดีกว่า สำหรับการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลสัญญาณ นอกเหนือจากการประเมินค่าองค์ประกอบอิมพัลส์ มาตรฐานแนะนำให้ใช้ความละเอียด 2^9 หรือที่ดีกว่า

4.) Impulse scale factor

Impulse scale factor กำหนดโดยค่าความไม่แน่นอนซึ่งไม่ควรเกิน 1% คงที่อยู่ที่ประมาณ $\pm 1\%$

5.) Rise time

Rise time ควรมีค่าไม่เกิน 3% ของ T_x โดยที่ T_x คือ ช่วงเวลาในการวัด สำหรับการวัดอิมพัลส์ฟ้าผ่า Rise time จะต้องมีค่าไม่เกิน 15 ns

6.) Interference

แอมพลิจูดสูงสุดของการเบี่ยงเบนจากขนาดมาตรฐานในการทดสอบ การรบกวนจะต้องน้อยกว่า 1% ของการเบี่ยงเบนเต็มสเกลในช่วงที่ใช้สำหรับการทดสอบอิมพัลส์

7.) Internal noise level

ระดับของสัญญาณรบกวนหมายถึงในอุปกรณ์ควรมีค่าไม่เกิน 0.4% ของการเบี่ยงเบนเต็มสเกล (Full scale deflection) สำหรับการวัดค่าองค์ประกอบของรูปคลื่น และไม่เกิน 0.1% ของการเบี่ยงเบนเต็มสเกล สำหรับการวัดที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลสัญญาณ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

8.) Operating range

ค่าต่ำสุดของช่วงเวลาในการทำเวลาควรมีน้อยกว่า $4/N$ ของการเบี่ยงเบนเต็มสเกล เมื่อ N คือ จำนวนบิต

หมายเหตุ แอมพลิจูดสูงสุดไม่น้อยกว่า 50% ของการเบี่ยงเบนเต็มสเกล (Full Scale Deflection) สำหรับเครื่องบันทึกดิจิทัล 8 บิต, 40% สำหรับเครื่องบันทึกดิจิทัล 10 บิตหรือ 33% สำหรับเครื่องบันทึกดิจิทัล 12 บิต

ข้อกำหนดสำหรับเครื่องมือวัดและบันทึกแรงดันและกระแสอิมพัลส์ ดังกล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงบางส่วนของมาตรฐาน IEC61083-1 ที่ตัดมาเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับดิจิทัลออสซิลโลสโคป

2.7.3 เครื่องมือวัดและบันทึกแรงดันและกระแสอิมพัลส์

ประเภทของเครื่องมือวัดและบันทึกแรงดันและกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการวิจัย คือดิจิทัลออสซิลโลสโคปรุ่น HDO6054A จากบริษัท Teledyne LeCroy ถือเป็นออสซิลโลสโคปที่มีความละเอียดสูง จัดเป็นหนึ่งในออสซิลโลสโคปรุ่น HDO6000A แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 ดิจิทัลออสซิลโลสโคปรุ่น HDO6054A

HDO6000A ออสซิลโลสโคปมีช่องสัญญาณเข้าอนุกรม 4 ช่อง มีค่าความละเอียด 12 bit โดยการใช้เทคโนโลยีความคมชัดสูง HD4096 ของ Teledyne LeCroy มีแบนด์วิดท์สูงถึง 1 GHz และฟอร์มแฟคเตอร์ขนาดกะทัดรัดพร้อมจอแสดงผลมัลติทัชขนาดใหญ่ 12.1 นิ้ว เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการแก้ไขจุดบกพร่อง การแก้ไขปัญหา และการวิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังการจัดการพลังงานแบบดิจิทัล หรือการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของพลังงานระบบอิเล็กทรอนิกส์ยานยนต์ และการออกแบบแบบฝังลึกหรือแบบแมคคาทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คุณสมบัติที่สำคัญ (Key features)

- 4 input channels
- 16 digital channels (with –MS models)
- 12-bit ADC resolution, up to 15 bits with enhanced resolution
- Up to 10 GS/s with Enhanced Sample Rate
- 350 MHz, 500 MHz, and 1 GHz bandwidths
- ± 10 V applied offset with high gain settings
- Long Memory - up to 250 Mpts/Ch
- MAUI with OneTouch user interface
- Exceptional Serial Data Tools
- Powerful, Deep Toolbox

HD4096 เทคโนโลยีความละเอียดสูง (HD4096 High definition technology)

HD4096 จัดเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้สามารถจับภาพและแสดงสัญญาณที่มีความละเอียดมากกว่าออสซิลโลสโคปอื่น ๆ ถึง 16 เท่า รูปคลื่นที่จับภาพได้และแสดงนั้นมีความสะอาดและคมชัด โดยปกติรายละเอียดของสัญญาณมักจะหายไปเนื่องจากสัญญาณรบกวนบนออสซิลโลสโคปอื่น ๆ แต่เมื่อมีเทคโนโลยีนี้เราสามารถมองเห็นรูปคลื่นได้อย่างชัดเจนและแยกแยะได้ง่าย ดังนั้นการมีเทคโนโลยี HD4096 จึงช่วยให้ออสซิลโลสโคปสามารถมอบความแม่นยำในการวัดโดยที่ไม่มีใครเทียบได้ สามารถแก้ไขจุดบกพร่องและสามารถวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.12 เทคโนโลยี HD4096

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

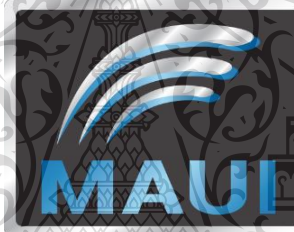
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ช่วงออฟเซตที่ใช้ขนาดใหญ่ (Huge applied offset range)

DAC ออฟเซต 16 บิตอนุญาตให้ชดเชยแรงดัน $\pm 10\text{ V}$ ที่ 20 mV/div , $\pm 4\text{ V}$ ที่ 5 mV/div และออฟเซต $\pm 1.6\text{ V}$ ความไวสูงสุด (1 mV/div) ออฟเซตที่ใช้ขนาดใหญ่เช่นนี้ (รวมกับ 12 บิต) ทำให้ง่ายต่อการรับและดูรูปแบบสัญญาณที่มีขนาดเล็ก (เช่น การกระเพื่อม สัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนชั่วคราว) บนสัญญาณ DC หรือเซ็นเซอร์ นอกจากนี้ยังมีช่วงที่ชดเชยเพิ่มเติมสำหรับหัววัด (Probes) ไฟฟ้าแรงสูงหลาย ๆ รุ่นของ Teledyne LeCroy

MAUI กับระบบสัมผัสเดียว (MAUI with Onetouch)

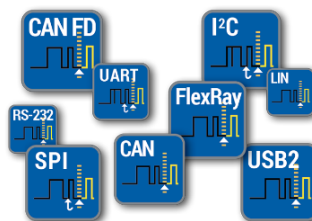
MAUI อินเทอร์เน็ตผู้ใช้ขั้นสูงสุดที่ทำให้พลังและความสามารถของออสซิลโลสโคปทั้งหมดขึ้นอยู่กับเพียงปลายนิ้วสัมผัส เทคโนโลยีนี้เป็นระบบสัมผัสที่ออกแบบมาเพื่อความเรียบง่ายและสามารถแก้ไขปัญหาได้ โดย MAUI พร้อมกับระบบ OneTouch จะประกอบไปด้วยการลาก การวาง และการปิด เพื่อให้ออสซิลโลสโคปนั้นมีประสิทธิภาพการทำงานเหนือกว่าออสซิลโลสโคปอื่น ๆ



รูปที่ 2.13 เทคโนโลยี MAUI

เครื่องมือข้อมูลอนุกรมที่ยอดเยี่ยม (Exceptional serial data tools)

รองรับมาตรฐานสูงสุด 23 มาตรฐาน โดยทั้งหมดนี้มีตัวถอดรหัสอนุกรมที่ดีที่สุด ในอุตสาหกรรมหลายตัว มาพร้อมกับทริกเกอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง มีเครื่องมือวัดและเครื่องมือสร้างกราฟที่ไม่เหมือนใคร เพื่อประสิทธิภาพในการตรวจสอบ (รวมถึง DAC แบบอนุกรมของโปรแกรม) และแผนภาพดวงตา (Eye diagrams) และเครื่องมือทดสอบทางกายภาพ



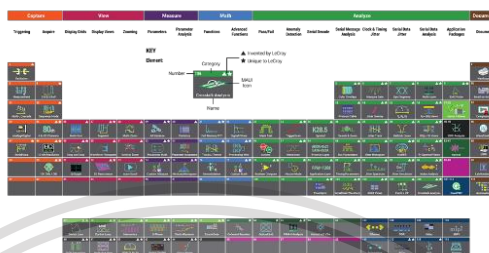
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.14 เครื่องมือข้อมูลอนุกรม
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กล่องเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและล้ำลึก (Powerful, deep toolbox)

จัดเป็นเครื่องมือวิเคราะห์รูปคลื่นและโปรแกรมสำเร็จประยุกต์ ซึ่งให้ข้อมูลในเชิงลึกที่เหนือชั้น กล่องเครื่องมือมีประสิทธิภาพและล้ำลึกนี้มีการประสานเข้ากับหน่วยความจำที่สูงสุดถึง 250 Mpts/ch และเมนบอร์ดที่มีประสิทธิภาพที่สุด ได้แก่ Intel® Core™ i7-2710QE Quad (Core), 3.0 GHz (ต่อ Core ใน Turbo mode) พร้อมกับมาตรฐานแรม 16 GB



รูปที่ 2.15 กล่องเครื่องมือของออสซิลโลสโคป

2.8 ภาษาคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 ภาษา Visual basic

Visual basic เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ (Programming language) ที่พัฒนาโดยบริษัท ไมโครซอฟท์ ซึ่งเป็นบริษัทยักษ์ใหญ่ที่สร้างระบบปฏิบัติการ Windows 95/98 และ Windows NT ที่เราใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยตัวภาษาเองมีรากฐานมาจากภาษา Basic ซึ่งย่อมาจาก Beginner's All Purpose Symbolic Instruction ถ้าแปลให้ได้ตามความหมายก็คือ “ชุดคำสั่งหรือภาษาคอมพิวเตอร์สำหรับผู้เริ่มต้น” ภาษา Basic มีจุดเด่นคือผู้ที่ไม่มีพื้นฐานเรื่องการเขียนโปรแกรมเลขก็สามารถเรียนรู้และนำไปใช้งานได้โดยง่ายตายและรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการเรียนภาษาคอมพิวเตอร์อื่นๆ เช่น ภาษาซี (C) ปาสคาล (Pascal) ฟอรัทเรน (Fortran) หรือ แอสเซมบลี (Assembler)

ไมโครซอฟท์ที่ได้พัฒนาโปรแกรมภาษา Basic มานานนับสิบปี ตั้งแต่ภาษา MBASIC (Microsoft Basic) BASICA (Basic Advanced) : GWBASIC และ Quickbasic ซึ่งได้ติดตั้งมาพร้อมกับระบบปฏิบัติการ Ms DOS ในที่สุดโดยใช้ชื่อว่า QBASIC โดยแต่ละเวอร์ชันที่ออกมานั้นได้มีการพัฒนาและเพิ่มเติมคำสั่งต่างๆเข้าไปโดยตลอด ในอดีตโปรแกรมภาษาเหล่านี้ล้วนทำงานใน Text Mode คือเป็นตัวอักษรล้วน ๆ ไม่มีภาพกราฟฟิกสวยงามแบบระบบ Windows อย่างในปัจจุบัน จนกระทั่งเมื่อระบบปฏิบัติการ Windows ได้รับความนิยมอย่างสูงและเข้ามาแทนที่ DOS ไมโครซอฟท์ก็เล็งเห็นว่าโปรแกรมภาษาใน Text mode นั้นคงถึงกาลที่หมดสมัย จึงได้พัฒนา

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.17 โปรแกรม Visual Basic Scripting Edition

2.8.3 โปรแกรม Matlab

Matlab เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่มาพร้อมด้วยสภาพแวดล้อมการทำงานเชิงโต้ตอบ ซึ่งสามารถคำนวณคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วมากกว่าภาษาคอมพิวเตอร์สมัยก่อน เช่น ภาษา C ภาษา C++ หรือ ภาษา Fortran

Matlab เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่ใช้สำหรับคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical computing) แสดงผลกราฟฟิก และเขียนแอปพลิเคชัน ทำให้เราสามารถคำนวณผลลัพธ์ พัฒนา อัลกอริทึม สร้างแบบจำลอง และแอปพลิเคชันได้ง่ายและรวดเร็วมาก ภายในตัว Matlab ประกอบด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ Toolbox กลุ่มฟังก์ชันสำเร็จรูปในแต่ละสาขาวิชา และฟังก์ชัน พื้นฐานจำนวนมาก ทำให้การวิเคราะห์ทำได้หลากหลายวิธี พร้อมกับได้คำตอบที่รวดเร็ว

Matlab ไปประยุกต์ใช้งานได้หลายสาขา ทั้ง การประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) การสื่อสาร (Communication) การประมวลผลภาพและวิดีโอ (Image and video processing) ระบบควบคุม (Control system) การวัดและควบคุม (Instruments and control) การคำนวณทาง เศรษฐศาสตร์ (Economic) การคำนวณทางชีววิทยา (Biology) และอื่น ๆ



รูปที่ 2.18 โปรแกรม Matlab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.8.4 โปรแกรม Portable visual basic 6

Portable visual basic 6 เป็นโปรแกรมสำหรับใช้เขียนโปรแกรมภาษา Visual basic 6.0 ที่เป็น Portable โปรแกรมพกพา ที่ไม่จำเป็นต้องติดตั้ง VB6 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ที่กำลังเป็นที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยโปรแกรมจะช่วยตัดปัญหาในเรื่องของการนำโปรแกรมไปใช้รันในอุปกรณ์เครื่องอื่นๆไปไม่ได้ ในปริณญาณพนธ์เรื่องนี้ได้ใช้โปรแกรม Portable visual basic 6 ในการออกแบบโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 2.19 โปรแกรม Portable Visual Basic 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

การออกแบบโปรแกรม

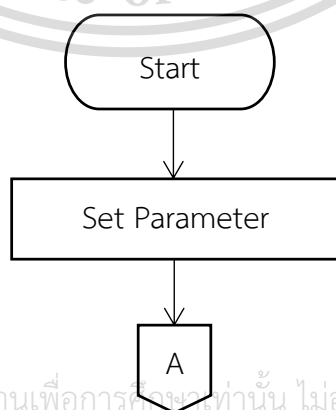
การออกแบบโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาค่าองค์ประกอบสำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบและเขียนโปรแกรมคำนวณหาค่าองค์ประกอบสำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
2. การออกแบบรูปแบบโปรแกรมสำหรับการใช้งานบนออสซิลโลสโคป
3. การทดลองการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
4. การปรับปรุงและพัฒนาโปรแกรมคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

3.1 การออกแบบและเขียนโปรแกรมคำนวณหาค่าองค์ประกอบสำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

โปรแกรมคำนวณหาค่าองค์ประกอบสำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีการเกิดการแกว่งและการเกิดส่วนฟูเกิน เนื่องจากผลจากความเหนี่ยวนำในวงจรทดสอบ หรืออุปกรณ์ที่นำมาทดสอบ ความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ มีขั้นตอนการดำเนินการอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 โดยแบ่งโปรแกรมออกเป็น 4 ส่วน หรือ 4 ขั้นตอนตามมาตรฐาน ดังนี้

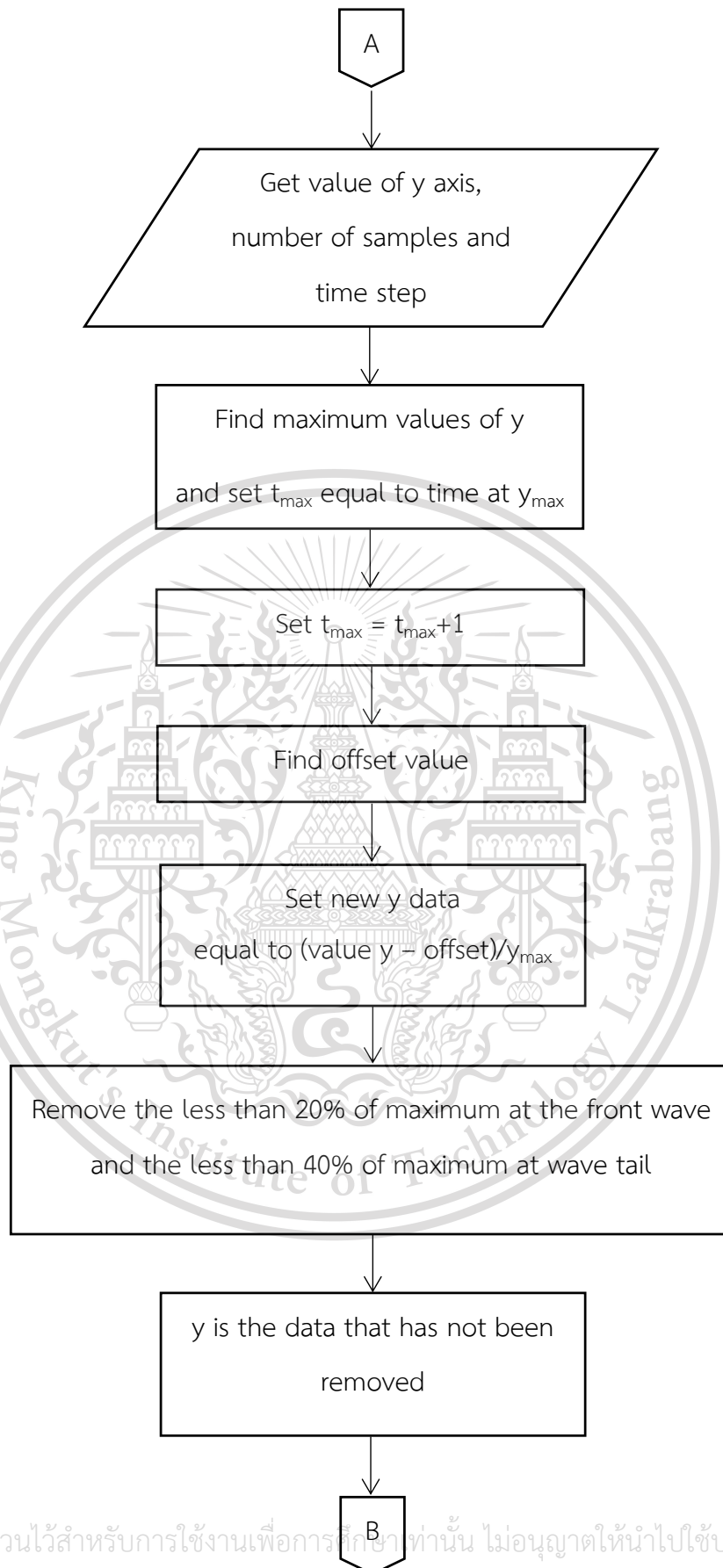
3.1.1 ขั้นตอนการตัดข้อมูลเพื่อลดสัญญาณรบกวนหรือการแกว่งของสัญญาณบางส่วนออก โดยการตัดสัญญาณที่น้อยกว่า 20% ของค่าสูงสุดในช่วงหน้าคลื่นและ 40% ของค่าสูงสุดในช่วงหลังคลื่นออกโดยมีขั้นตอนดังแผนผังแสดงการทำงานต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

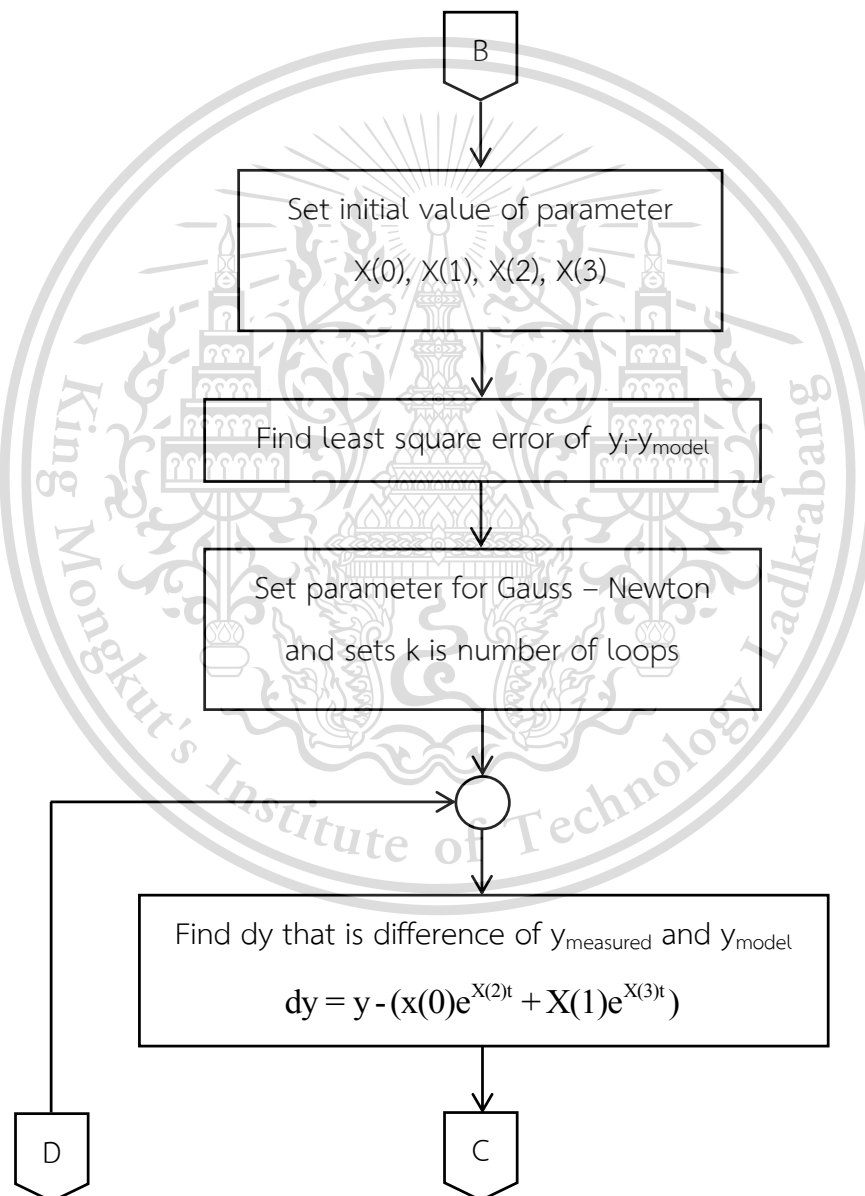
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.2 ขั้นตอนการหากราฟที่เหมาะสมสำหรับข้อมูล (Curve fitting) สำหรับสร้างรูปคลื่นฐาน โดยการใช้ฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล 2 ฟังก์ชัน ดังสมการที่ 3.1

$$g(t) = Ae^{-\alpha t} - Be^{-\beta t} \quad (3.1)$$

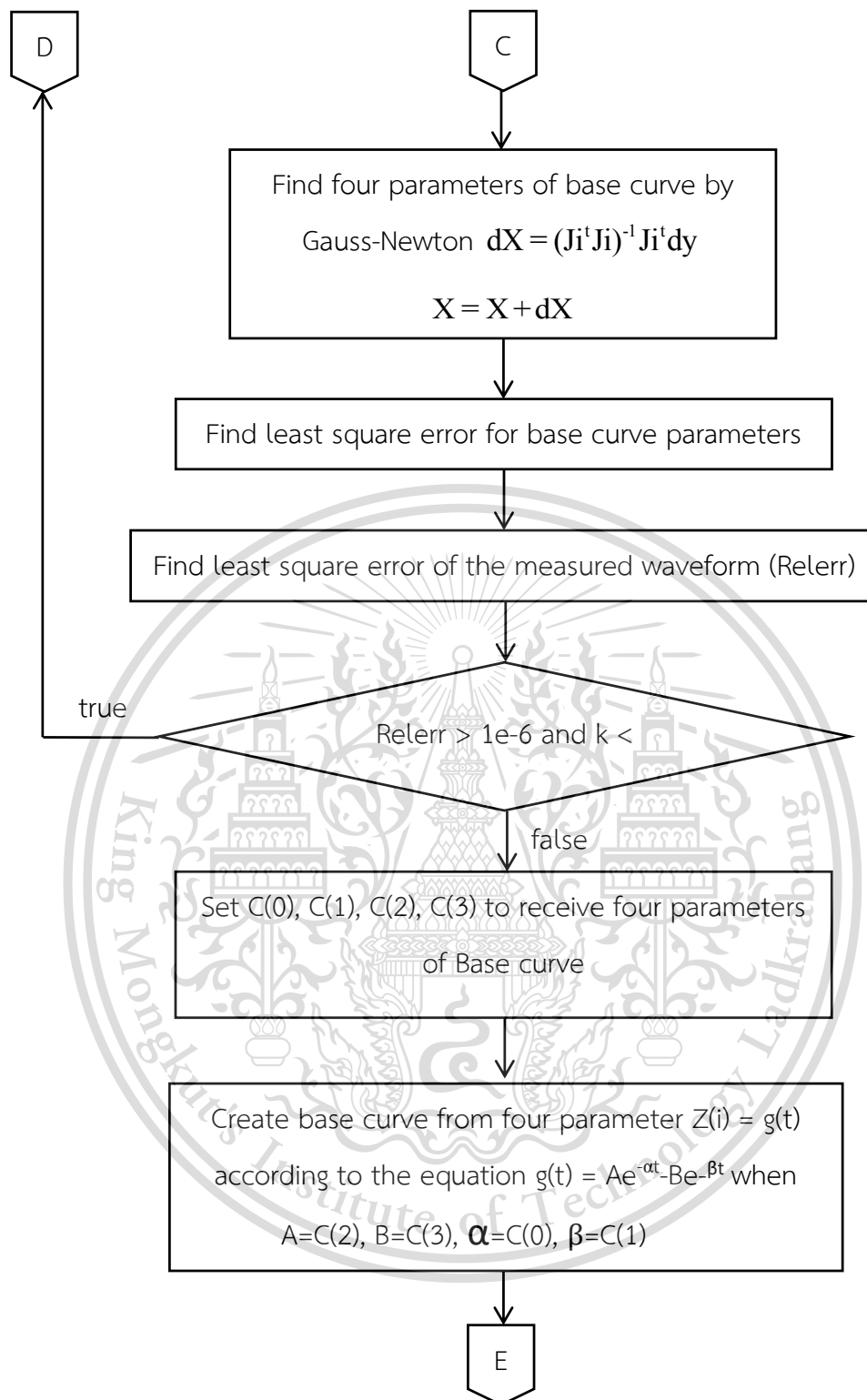
โดยขั้นตอนนี้เป็นการเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าองค์ประกอบ A, B, α และ β เพื่อใช้ในการสร้างรูปคลื่นฐาน โดยอาศัยกระบวนการทางสถิติ Nonlinear Regression ด้วยวิธี Gauss-Newton ตามทฤษฎีที่กล่าวข้างต้นตามบทที่ 2 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบและการสร้างรูปคลื่นฐาน หาได้ดังแผนผังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

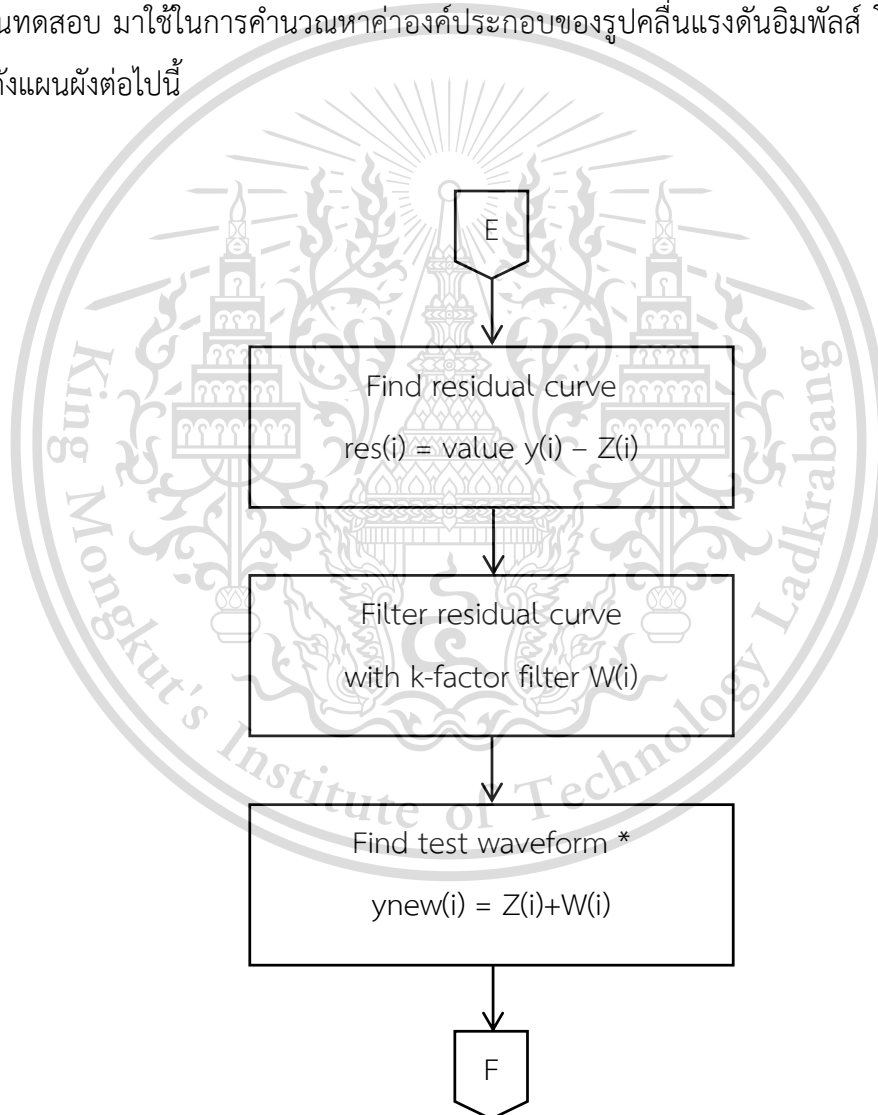
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.3 ขั้นตอนการสร้างรูปคลื่นทดสอบ (Test voltage waveform) จากมาตรฐาน IEC 60060-1 รูปคลื่นที่ใช้ในการคำนวณองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ คือรูปคลื่นทดสอบ ซึ่งเกิดจากการนำรูปคลื่นบันทึก (Record curve) ลบด้วยรูปคลื่นฐานที่สร้างขึ้น เรียกว่ารูปคลื่นเหลือ (Residual curve) จากนั้นจะนำสัญญาณที่เหลือไปผ่านการกรองด้วย k-factor filter (Zero-phase and IIR filter) ซึ่งมีสมการดังสมการที่ 3.2

$$k = \frac{1}{(1 + 2.2f)^2} \quad (3.2)$$

จากนั้นนำสัญญาณที่ได้จากการกรองด้วยฟิลเตอร์ไปบวกกับรูปคลื่นฐาน ซึ่งจะทำได้รูปคลื่นทดสอบ มาใช้ในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยมีการทำงานแสดงดังแผนผังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.4 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีการอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 ซึ่งได้กำหนดขั้นตอนในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบไว้ดังนี้

3.1.4.1 เวลาช่วงหน้าคลื่น (T_1) หาได้จากเวลา ณ ขณะที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีค่า 90 % ของแรงดันค่ายอด มาลบด้วยเวลา ณ รูปคลื่นแรงดันมีค่า 30 % ของแรงดันค่ายอด แล้วคูณด้วย 1.67 ดังสมการที่ 3.3

$$T_1 = 1.67(t_{90} - t_{30}) \quad (3.3)$$

3.1.4.2 เวลาช่วงหลังคลื่น (T_2) หาได้จาก เวลา ณ ขณะที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ผ่านแรงดันค่ายอดแล้วลดลงจนเหลือ 50 % ของแรงดันค่ายอด ลบกับเวลา ณ ขณะที่แรงดันอิมพัลส์เริ่มเกิด ดังสมการที่ 3.4

$$T_2 = t_{50} - t_0 \quad (3.4)$$

โดยที่เวลา t_0 นั้นสามารถคำนวณได้จาก $t_0 = t_{30} - \frac{U_{30}}{U_{90} - U_{30}}(t_{90} - t_{30})$ (3.5)

3.1.4.3 อัตราการเกิดการแกว่ง (Overshoot magnitude, β) หาได้จากความต่างของค่ายอดแรงดันระหว่าง รูปคลื่นที่บันทึก กับรูปคลื่นฐาน

โดยที่ $\beta = U - U_b$ (3.6)

$$\beta' = \frac{U - U_b}{U} \times 100\% \quad (3.7)$$

เมื่อ β คือ Overshoot magnitude

β' คือ Relative overshoot (%)

U คือ ค่ายอดแรงดันของ Recorded voltage waveform

U_b คือ ค่ายอดแรงดันของ Base waveform

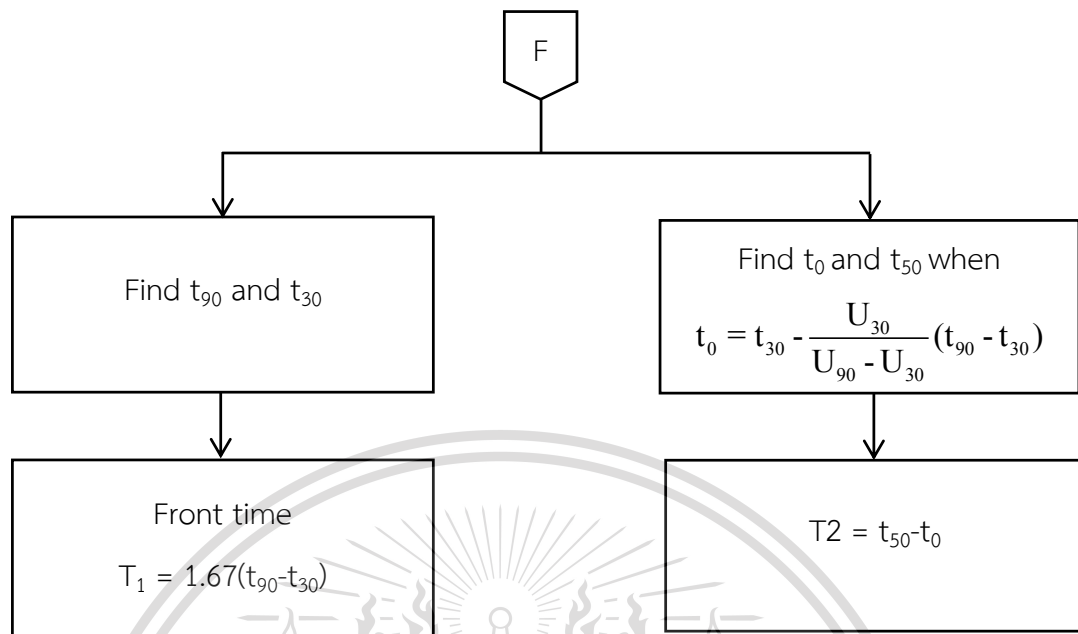
หมายเหตุ ค่าองค์ประกอบที่เราใช้คือ Relative overshoot (β')

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

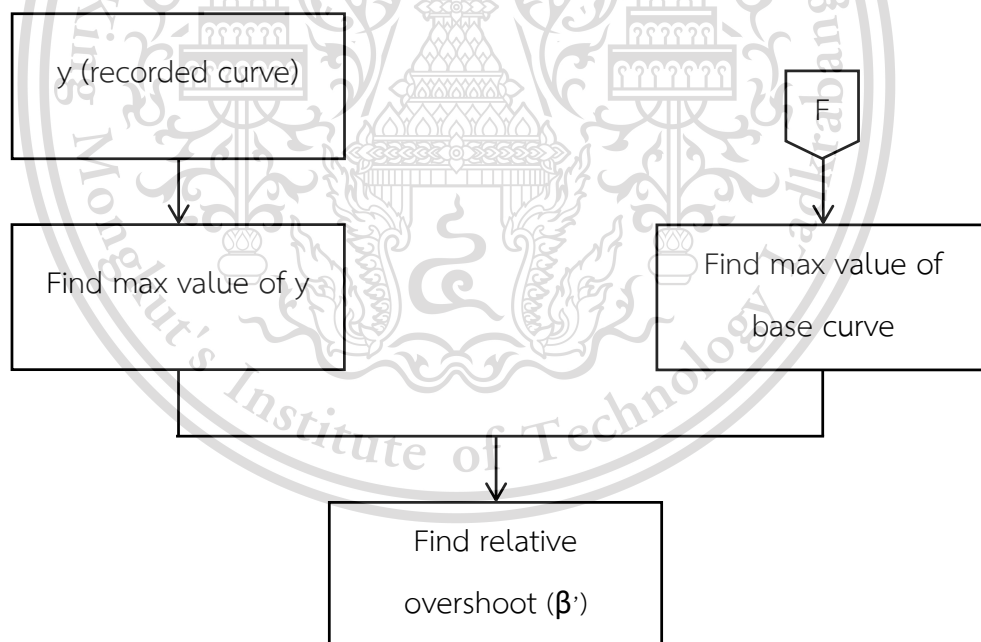
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แผนผังการคำนวณหาค่าเวลาช่วงหน้าคลื่น (T_1) และเวลาช่วงหลังคลื่น (T_2)



แผนผังการคำนวณหาค่า Relative overshoot



ดังนั้น เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนโปรแกรมจะสามารถคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่น

แรงดันอิมพัลส์ได้ทั้งหมด 4 ค่าองค์ประกอบ ได้แก่ A, B, α, β

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

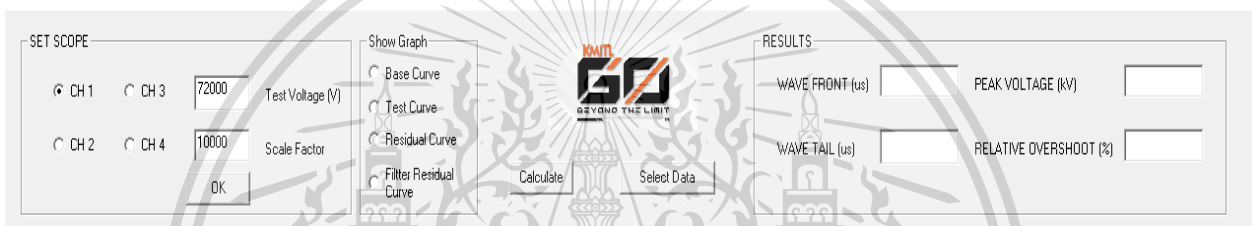
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2 การออกแบบรูปแบบโปรแกรมสำหรับการใช้งานบนออสซิลโลสโคป

ในการใช้งานโปรแกรมบนออสซิลโลสโคป จำเป็นจะต้องทำให้รูปแบบของโปรแกรมเข้าใจได้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน โดยมีการออกแบบโปรแกรมให้ทำการแสดงค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ดังนี้ ช่วงเวลานำคลื่น ช่วงเวลาหลังคลื่น อัตราการเกิดส่วนพุ่งเกิน และปุ่มควบคุมสำหรับการเริ่มต้นและหยุดการทำงานของโปรแกรม โดยการออกแบบรูปแบบโปรแกรมสำหรับการใช้งานบนออสซิลโลสโคป ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การออกแบบรูปแบบโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Visual basic 6 portable ซึ่งมีรูปแบบ ดังรูปที่ 3.1

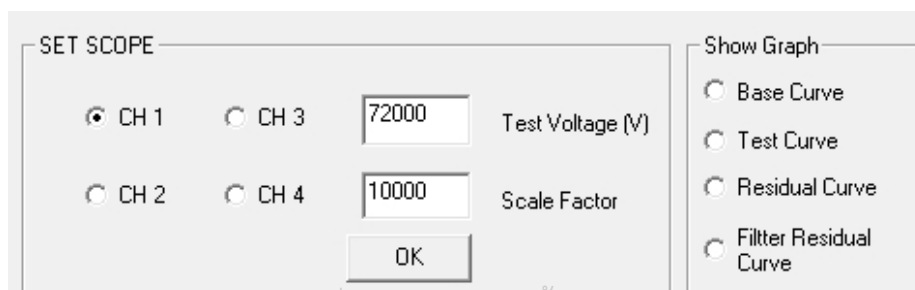


รูปที่ 3.1 รูปแบบของโปรแกรมที่ทำการออกแบบและนำไปใช้

3.2.1.1 การออกแบบการตั้งค่าหน้าจอแสดงผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ของออสซิลโลสโคป

ส่วนที่ 1 การตั้งค่าช่องสัญญาณขาเข้า (Input channel) ตั้งค่า vol/div ของช่องสัญญาณขาเข้าที่จะแสดงผล

ส่วนที่ 2 ฟังก์ชันในการเลือกแสดงผลรูปคลื่นจากโปรแกรมคำนวณองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบการตั้งค่าหน้าจอแสดงผลในส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2

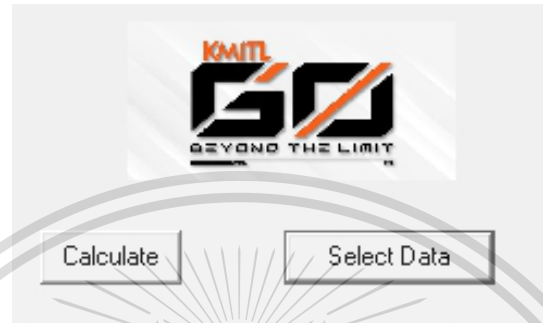
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.1.2 การออกแบบการตั้งค่าการคำนวณองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ส่วนที่1 การคำนวณองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากข้อมูลรูปคลื่นที่ได้รับจาก ออสซิลโคปโดยตรง

ส่วนที่2 การคำนวณองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากข้อมูลรูปคลื่นที่ได้รับมาจากการ ทดสอบอื่น ๆ เช่น ข้อมูลทดสอบเคเบิล ข้อมูลทดสอบจากเครื่อง TDG



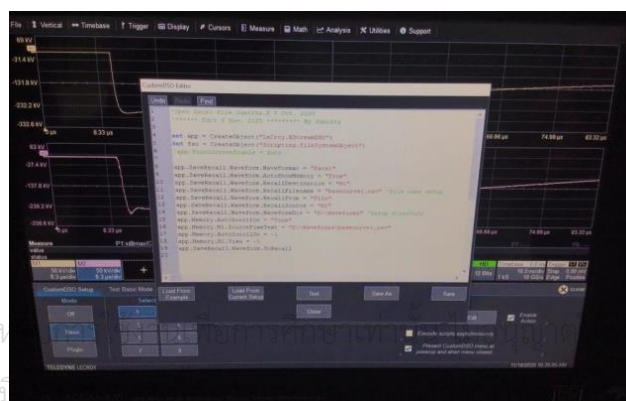
รูปที่ 3.3 แสดงการออกแบบการตั้งค่าในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2

3.2.1.3 การออกแบบการแสดงผลพอร์ของค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

RESULTS			
WAVE FRONT (us)	1.714	PEAK VOLTAGE (KV)	71.972
WAVE TAIL (us)	47.708	RELATIVE OVERSHOOT (%)	7.76

รูปที่ 3.4 แสดงการออกแบบการแสดงผลพอร์ของค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

3.2.2 การติดตั้งโปรแกรมที่ออกแบบบนออสซิลโคป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม

ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

รูปที่ 3.5 รูปแบบของการติดตั้งโปรแกรมที่จะใช้งานบนออสซิลโคป

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3 การทดลองการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ในการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

3.3.1 การทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบกับข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC61083-2 ข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบ จะประกอบไปด้วย 29 รูปคลื่น แต่ในที่นี้ ตัวอย่างรูปคลื่นที่แสดงคือ Full lightning impulse (LI-M4) ที่มีการแกว่งเกิดขึ้นในการทดสอบหม้อแปลง ซึ่งมีค่าองค์ประกอบตามมาตรฐาน ดังนี้

ค่ายอดแรงดัน (U_1)	-267.14	k
เวลาช่วงหน้าคลื่น (T_1)	0.987	μ s
เวลาช่วงหลังคลื่น (T_2)	56.22	μ s
Relative overshoot (β')	4.8	%

3.3.2 การทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์กับการทดสอบโดยเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก (KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS)



รูปที่ 3.6 เครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก (KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

การทดสอบและการประมวลผล

4.1 บทนำ

การทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ จากการออกแบบและเขียนโปรแกรมการคำนวณหาค่าองค์ประกอบ เพื่อให้ได้รูปคลื่นทดสอบ เปรียบเทียบกับข้อมูลองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากมาตรฐาน IEC 61083-2 การทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก และการทดสอบกับวงจรใช้งานจริงในห้องปฏิบัติการ

ซึ่งการทดสอบดังกล่าวนี้ได้กระทำ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4.2 การทดสอบหาค่าตัวประกอบความหน่วง (Damping Factor)

การทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ด้วยวิธีการ Gauss-Newton ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 เป็นกระบวนการทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้คำตอบออกมา ดังนั้นจำเป็นต้องมีการพิจารณาค่าตัวประกอบความหน่วง ซึ่งส่งผลกระทบต่อจำนวนรอบและประสิทธิภาพในการคำนวณของกระบวนการ Gauss-Newton การใช้ค่าตัวประกอบความหน่วงที่เหมาะสม จะช่วยให้ได้กระบวนการคำนวณที่ประสิทธิภาพและใช้จำนวนรอบที่น้อยที่สุดในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยผลการคำนวณหาค่าตัวประกอบความหน่วงที่เหมาะสม แสดงดัง ตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการหาค่าตัวประกอบความหน่วงที่เหมาะสม

Case	LM		GN ($d = 1.0$)		GN ($d = 0.8$)		GN (varied d)	
	number of iterations	Execution time (s)	number of iterations	Execution time (s)	number of iterations	Execution time (s)	number of iterations	Execution time (s)
LI-A1	5	0.02126	4	0.01073	7	0.01474	6	0.01396
LI-A2	6	0.03636	6	0.00927	6	0.00605	4	0.01119
LI-A3	4	0.01136	4	0.00579	6	0.01154	4	0.00952
LI-A4	10	0.02483	9	0.01404	6	0.00863	6	0.00892
LI-A5	10	0.02427	9	0.01515	6	0.00753	6	0.01033
LI-A6	30	0.05532	28	0.03013	6	0.02199	6	0.00744
LI-A7	13	0.02800	200 (F)	0.24233	10	0.02516	13	0.01713
LI-A8	18	0.04165	18	0.01913	6	0.01002	8	0.00933
LI-A9	5	0.01531	5	0.01279	6	0.00823	4	0.00714

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ตารางแสดงผลการหาค่าตัวประกอบความหน่วงที่เหมาะสม

Case	LM		GN ($d = 1.0$)		GN ($d = 0.8$)		GN (varied d)	
	number of iterations	Execution time (s)	number of iterations	Execution time (s)	number of iterations	Execution time (s)	number of iterations	Execution time (s)
LI-A10	13	0.02645	12	0.01728	7	0.01094	7	0.00676
LI-A11	6	0.01568	5	0.00928	7	0.01631	6	0.01289
LI-A12	7	0.01984	6	0.01108	7	0.00975	6	0.01197
LI-M1	6	0.02671	6	0.00966	7	0.01576	7	0.01213
LI-M2	7	0.01996	9	0.01014	7	0.00938	9	0.00810
LI-M3	6	0.01594	6	0.00756	7	0.00770	6	0.00710
LI-M4	4	0.00982	4	0.00441	6	0.00777	4	0.00537
LI-M5	59	0.09794	57	0.03918	11	0.01123	13	0.01508
LI-M6	4	0.01172	4	0.00742	6	0.01417	4	0.00720
LI-M7	12	0.02648	12	0.00809	6	0.00756	7	0.00841
LI-M8	4	0.01318	4	0.00787	6	0.00587	4	0.00795
LI-M9	5	0.01321	5	0.00551	6	0.00469	5	0.00549
LI-M10	4	0.00983	4	0.00996	7	0.00664	5	0.01284
LI-M11	4	0.03606	4	0.00812	7	0.01300	5	0.01332
LI-M12	5	0.01295	4	0.01078	7	0.01061	5	0.00861
LI-M13	6	0.01446	5	0.00742	6	0.03880	5	0.00791
LI-M14	6	0.01186	6	0.00706	7	0.00909	5	0.02297
LI-M15	4	0.01445	4	0.00825	7	0.01108	4	0.00934
LI-M16	5	0.01563	4	0.01062	6	0.01965	5	0.00916
LI-M17	4	0.01160	4	0.00944	8	0.01397	4	0.01488
average	9.38	0.02352	15.45	0.01960	6.79	0.01234	6.00	0.01043
max	59	0.09794	200	0.24233	11	0.03880	13	0.02297
min	4	0.00982	4	0.00441	6	0.00469	4	0.00537
median	6	0.01594	5	0.00966	7	0.01061	5	0.00933

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าตัวประกอบความหน่วงที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อจำนวนรอบและเวลาในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของกระบวนการ Gauss-Newton ที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในเอกสารฉบับนี้ คณะผู้จัดทำได้เลือกค่าตัวประกอบความหน่วงจากกรณีของ LM ซึ่งเป็นกรณีที่มีค่าตัวประกอบความหน่วง (d) เท่ากับ 0.5 สำหรับการสร้างกระบวนการ Gauss-Newton ในโปรแกรมคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

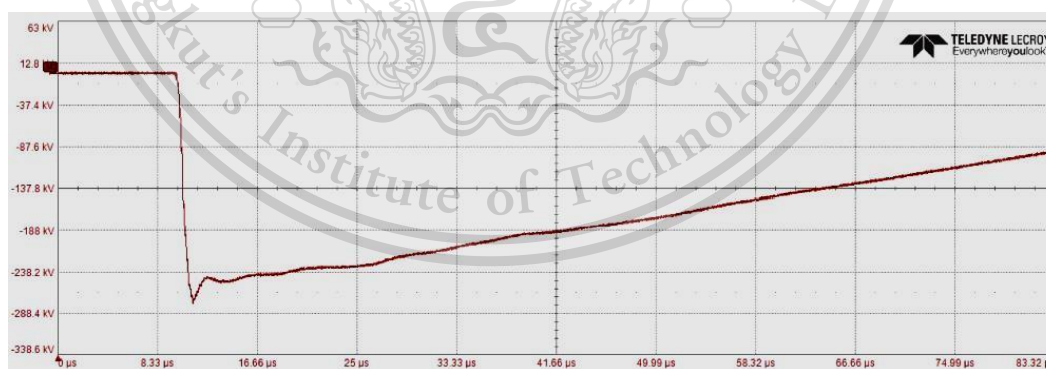
4.3 การทดสอบโปรแกรมการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ในการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

4.3.1 การออกแบบและเขียนโปรแกรมคำนวณหาค่าองค์ประกอบสำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ในขั้นตอนการตัดรูปคลื่นสัญญาณและการหากราฟเหมาะสมสำหรับหารูปคลื่นฐานโดยการทดสอบกับข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากมาตรฐาน IEC 61083-2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เต็มรูปสำหรับ การทดสอบหม้อแปลง LI-M4 ได้ผลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ LI-M4 จากมาตรฐาน IEC 61083-2 ที่แสดงบนดิจิทัลออสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ LI-M4 จากมาตรฐาน IEC 61083-2 ที่นำออกมาจากดิจิทัลออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากโปรแกรมสามารถคำนวณค่าองค์ประกอบทั้ง 4 ตัว สำหรับการหากราฟที่เหมาะสม เพื่อสร้างรูปคลื่นฐาน ดังสมการที่ 1 ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้ Gauss-Newton ได้ดังตารางที่ 4.1

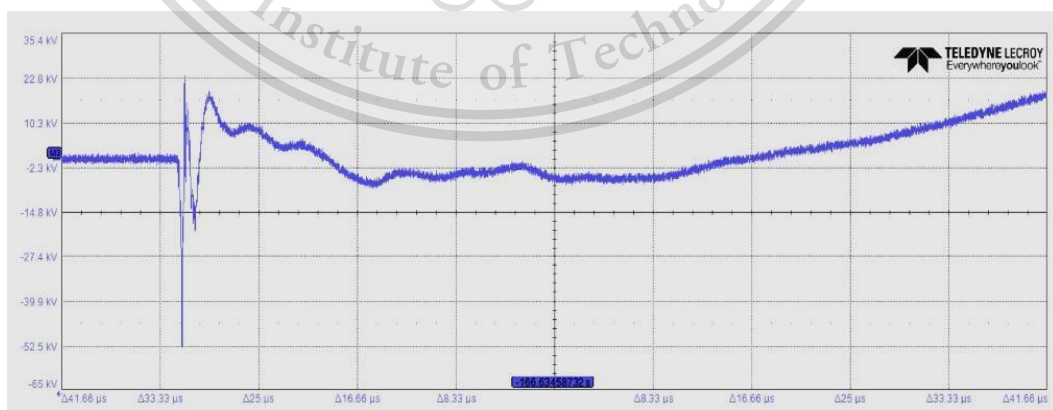
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าองค์ประกอบของสมการที่คำนวณได้จากโปรแกรม

องค์ประกอบ	ค่าขององค์ประกอบจากโปรแกรม
A	0.9743146776
B	-0.83131032906
α	-0.00012048643
β	-0.03064561543

จากค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นฐานดังตารางที่ 1 สามารถสร้างรูปคลื่นฐานได้ดังรูป



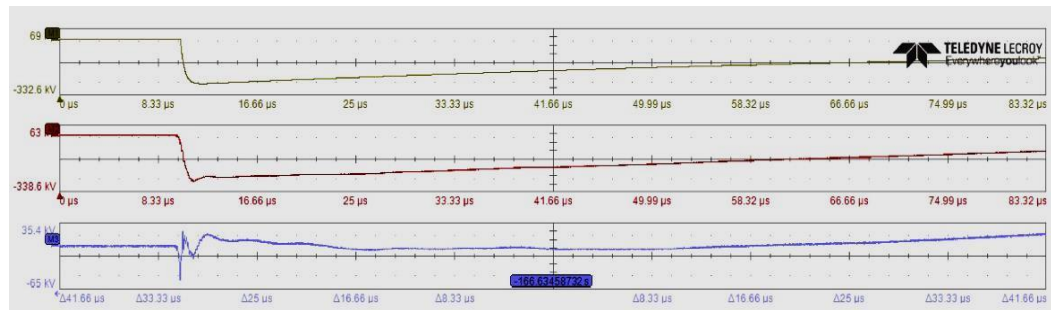
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นฐานที่ผ่านการหากราฟที่เหมาะสม ซึ่งจากโปรแกรมคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นที่นำออกมาจากดิจิตอลออสซิลโลสโคป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.4 รูปคลื่นเหลือที่ได้จากการนำรูปคลื่นบันทึกด้วยรูปคลื่นฐาน ที่นำออกมาจากดิจิตอลออสซิลโลสโคป การคำนวณค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ออสซิลโลสโคปไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.5 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปคลื่นทั้งสามรูป ที่นำออกมาจากดิจิตอลออสซิลโลสโคป

จากโปรแกรมสามารถคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งมีการทดสอบกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60183-2 ทั้ง 29 รูปคลื่น ค่าองค์ประกอบของแต่ละรูปคลื่นแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม

Reference Impulse	Peak Voltage U_t	Front time T_1	Time to half T_2	Relative overshoot β'
LI-A1	1049.63 kV	0.8399 μ s	60.158 μ s	0.00493 %
LI-A2	1037.61 kV	1.692 μ s	47.48 μ s	5.15 %
LI-A3	1000.2 kV	1.116 μ s	48.16 μ s	4.58 %
LI-A4	856.002 kV	0.840 μ s	47.80 μ s	7.89 %
LI-A5	71.972 kV	1.714 μ s	47.71 μ s	7.76 %
LI-A6	100.173 kV	1.766 μ s	41.59 μ s	18.02 %
LI-A7	104.35 kV	2.127 μ s	38.37 μ s	20.18 %
LI-A8	96.014 kV	1.506 μ s	49.93 μ s	14.77 %
LI-A9	55.926 kV	1.216 μ s	55.74 μ s	4.03 %
LI-A10	81.929 kV	0.926 μ s	42.66 μ s	12.03 %
LI-A11	86.599 kV	0.577 μ s	56.37 μ s	4.07 %
LI-A12	85.584 kV	0.588 μ s	57.36 μ s	2.26 %
LI-M1	952.03 kV	1.124 μ s	85.61 μ s	2.08 %
LI-M2	-1041.6 kV	3.354 μ s	61.25 μ s	9.19 %
LI-M3	-1026.4 kV	2.148 μ s	41.75 μ s	9.18 %
LI-M4	-26,714 kV	0.987 μ s	56.21 μ s	4.99 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา

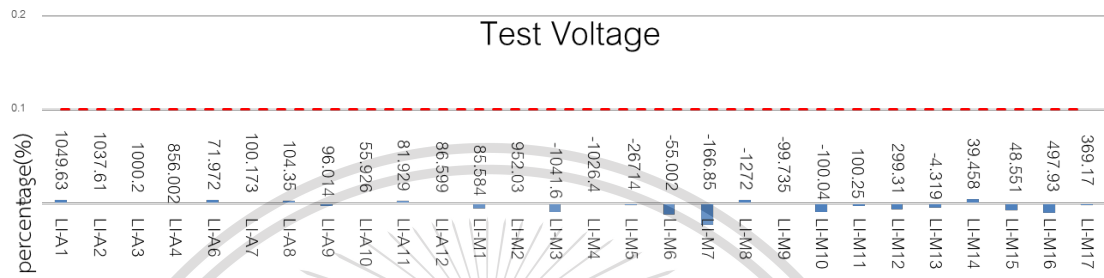
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

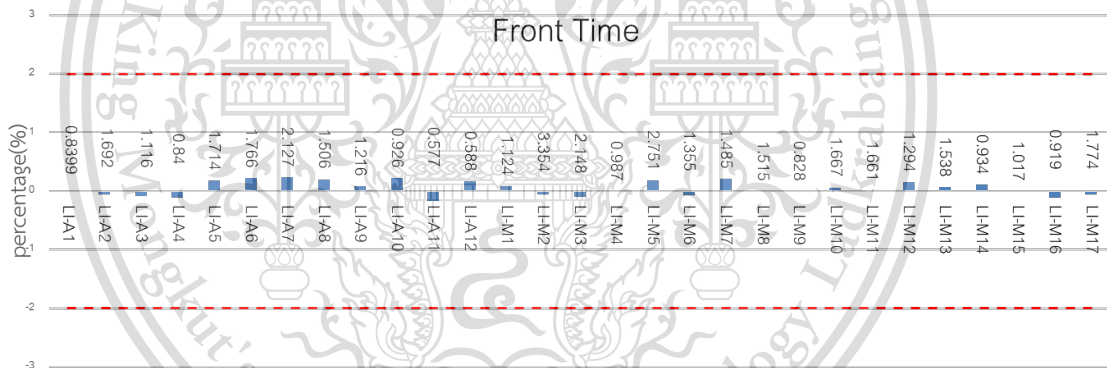
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม มีค่าใกล้เคียงกับค่าตามที่มาตรฐาน IEC 60183-2 กำหนด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่ทำการออกแบบ สามารถใช้ในการประเมินค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นได้จริง

การเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ของรูปคลื่นมาตรฐานทั้ง 29 รูปคลื่นที่คำนวณได้จากโปรแกรม กับค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่ายอดแรงดัน (V_{peak}) ของแต่ละรูปคลื่น



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าเวลาช่วงหน้าคลื่น (Front time) ของแต่ละรูปคลื่น

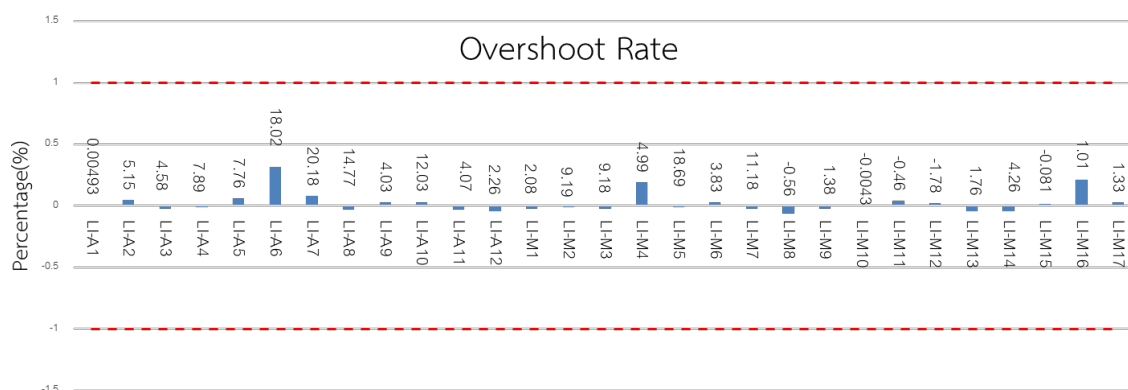


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าเวลาช่วงหลังคลื่น (Time to half) ของแต่ละรูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าส่วนพุ่งเกิน (Overshoot rate) ของแต่ละรูปคลื่น

เมื่อ เส้นสีแดง หมายถึง ค่าขององค์ประกอบของรูปคลื่นตามที่มาตราฐานกำหนด
 แท่งสีน้ำเงิน หมายถึง ค่าขององค์ประกอบของรูปคลื่นที่คำนวณได้จากโปรแกรม

4.3.2 การทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก (KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS)

เนื่องจากเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก สามารถกำเนิดได้เฉพาะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ LI – A1 ดังนั้น การทดสอบการคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ จึงเป็นการทดสอบที่มีระดับแรงดันของรูปคลื่นต่างกัน แสดงผลการทดลอง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม ซึ่งทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก

Reference Impulse	Peak Voltage U_t	Front time T_1	Time to half T_2	Relative overshoot β'
LI-A1	40.610 kV	0.836 μ s	60.848 μ s	0.836 %
LI-A1	97.581 kV	0.820 μ s	59.455 μ s	0.737 %
LI-A1	68.912 kV	0.831 μ s	59.651 μ s	0.601 %
LI-A1	58.751 kV	0.827 μ s	59.676 μ s	2.641 %

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม มีค่าใกล้เคียงกับค่าตามที่มาตราฐาน IEC 60183-2 กำหนด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่ทำการออกแบบ สามารถใช้ในการประเมินค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นได้จริง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผล

โดยทั่วไปการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นั้น เนื่องจากการวิเคราะห์ที่ซับซ้อน จึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรมวิเคราะห์ซึ่งมักจะอยู่ในอุปกรณ์แยกที่ไม่ได้อยู่ในวงจรวัด เช่น คอมพิวเตอร์ แมกบุ๊ก และโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการวิเคราะห์และเกิดความเสี่ยงในการเกิดอันตรายจากระบบแรงดันสูงต่ออุปกรณ์แยกเหล่านั้น

งานวิจัยนี้จึงได้มีการออกแบบโปรแกรมซึ่งสามารถวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และแสดงผลค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นอิมพัลส์อัตโนมัติผ่านออสซิลโลสโคปได้โดยตรงโดยเขียน อังกอร์ทิมในการวิเคราะห์ผ่านภาษาวิซวลเบสิกซึ่งเป็นภาษาที่ออสซิลโลสโคปสามารถประมวลผลได้ จากนั้นได้สร้างหน้าจอควบคุมและแสดงผลโปรแกรมในรูปแบบปลั๊กอิน และติดตั้งบนออสซิลโลสโคป เพื่อความสะดวกในการใช้งานโดยไม่ต้องเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการวัด

เพื่อให้งานวิจัยนี้ช่วยให้การทดสอบแรงดันอิมพัลส์มีความสะดวกมากยิ่งขึ้นจึงได้จัดทำ ฟังก์ชันเสริมต่างๆ ประกอบไปด้วยส่วนของฟังก์ชันที่ช่วยในการตั้งค่าออสซิลโลสโคปให้พร้อมสำหรับการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในทุกขนาดทั้งชั่วคราวและลบ ส่วนของฟังก์ชันสำหรับแสดงรูปคลื่น องค์ประกอบต่าง ๆ ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์บนช่องแสดงผลของออสซิลโลสโคป และส่วนของ ฟังก์ชันสำหรับการบันทึกค่าข้อมูลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นอิมพัลส์ ไว้ในไฟล์เฉพาะซึ่งอยู่ในออสซิลโลสโคปเพื่อให้ข้อมูลสามารถนำไปใช้ได้

จากการทดสอบการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยมีการทดสอบ 2 ประเภท ได้แก่ การทดสอบโปรแกรมด้วยรูปคลื่นแรงดันมาตรฐาน และการทดสอบการคำนวณค่า องค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก (KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS) ผลการทดสอบได้ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นอยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานทุกรูปคลื่น และการป้อนข้อมูลของโปรแกรม และแสดงผลข้อมูลของโปรแกรมมีความสะดวกต่อผู้ใช้งาน ในด้านการประมวลผลของโปรแกรมเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อ

ในการพัฒนาระบบให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากออสซิลโลสโคปรุ่นที่ใช้สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้ ควรเพิ่มการเชื่อมต่อโปรแกรมกับระบบอินเทอร์เน็ตให้สามารถวิเคราะห์ทางหน้าเว็บไซต์ได้ จะสามารถนำโปรแกรมไปใช้งานได้ในทุกอุปกรณ์โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งโปรแกรม และสามารถจัดเก็บข้อมูลไว้บนพื้นที่จัดเก็บข้อมูลออนไลน์ (Cloud storage) ส่งผลให้มีความสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น และควรลดขั้นตอนในการใช้งานลงเพื่อความสะดวกสบายและเข้าใจการใช้งานได้ง่ายของผู้ใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์, 2549.
- [2] Norasage Pattanadech and Peerawut Yutthagowith, “Fast Curve Fitting Algorithm for Parameter Evaluation Lightning Impulse Test Technique,” **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, 2015
- [3] Tsuboi, G. Ueta, S. Okabe, Y. Shimizu, T. Ishikura and E. Hino, “K - factor value and front-time-related characteristics in negative polarity lightning impulse test for UHV-class air insulation,” **IEEE Trans. Power Del.**, Vol. 28, No. 2, pp. 1148–1155, 2013.
- [4] L. Lewin, T. N. Tran, D. J. Swaffield, and J. K. Hällström, “Zero- phase filtering for lightning impulse evaluation: a k-factor filter for the revision of IEC60060-1 and - 2,” **IEEE Trans. Power Del.**, Vol. 23, No. 1, pp. 3–12, 2010
- [5] M. Hinow, W. Hauschild and E. Gockenbach, “Lightning impulse voltage and overshoot evaluation proposed in drafts of IEC 60060-1 and future UHV testing,” **IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.**, Vol. 17, No. 5, pp. 1628–1634, 2010
- [6] High-Voltage Test Techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements, IEC standard 60060-1, 2010.
- [7] Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests, IEC Standard 61083-1, 2001.
- [8] Instruments and Software Used for Measurement in High-voltage and High-current Tests Part 2: Requirements for Software for Tests with Impulse Voltages and Currents, IEC Standard 61083-2, 2010.
- [9] HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES PART 2 MEASURING SYSTEMS, IEC Standard 60060-2, 2010.
- [10] TELEDYNE LECROY, **HDO6000/HDO6000A High Definition Oscilloscopes Operator's Manual**, New York, 2020.

- [11] TELEDYNE LECROY, “Plug-ins Using VB.NET Creating CustomDSO Plug-ins Using Visual Basic.NET,” **LeCroy Application Brief**, No. LAB_WM824.

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [12] TELEDYNE LECROY, “Custom Math with VBScript Create Custom Math Functions using simple scripts,” **LeCroy Application Brief**, No. LAB 758.
- [13] Ed Wilson, **Microsoft VBSCRIPT Step by Step**, Washington, Microsoft Press, 2007.
- [14] อภิชาติ ภู่อลับ, **สนุก! กับการประยุกต์ใช้ Visual Basic : เก่ง VB แบบง่ายๆ สไตล์มือสมัครเล่น**, นนทบุรี, สำนักพิมพ์ อินโฟเพรส, 2546.
- [15] สุรศักดิ์ น้อยหอม, “วงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.
- [16] **ประวัติความเป็นมาของ Visual Basic**. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2564, จาก <https://sites.google.com/site/luxsanavathin/gui/xngkh-prakxb-phun-than>
- [17] **รูปแบบภาษาสคริปต์ฝั่งไคลแอนต์**. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2564, จาก <https://www.itgenius.co.th/article/>
- [18] **VBScript – VBScript**. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2564, จาก <https://th.wikiarabi.org/wiki/VBScript>
- [19] **สคริปต์ และ VBScript**. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2564, จาก <https://www.oocities.org/toonnok/vb1>
- [20] **Matlabคืออะไร**. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2564, จาก <https://sites.google.com/site/computerprogramming257/phas-a-c/1-1-matlab-khux-xari>
- [21] **Portable Visual Basic 6 โปรแกรมใช้เขียนโปรแกรม**. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2564, จาก <https://www.overclockzone.com/forums/forum/software/software-aa/152273-portable-visual-basic-6>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Evaluation System of Lightning Impulse Voltage Waveform

ระบบวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ภาณุวัฒน์ จำริญ ภูมิ อยู่สอน และ สุธาสินี แวงโสธรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย จลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: panuwat.jamr@gmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบโปรแกรม เพื่อใช้สำหรับการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ในขณะที่ทำการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่จะติดตั้งใช้งานในระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งใช้งานจริง ซึ่งการออกแบบพัฒนาโปรแกรมจะช่วยพัฒนาให้จิตตอลออสซิลโลสโคปสามารถวิเคราะห์และคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ด้วยตนเอง โดยจะช่วยให้การคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบอุปกรณ์มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น การออกแบบดังกล่าวมีขั้นตอนและวิธีการในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060 - 1 และมาตรฐาน IEC 60060- 2 โดยการพัฒนาเป็นโปรแกรมสำหรับการใช้งานบนจิตตอลออสซิลโลสโคปด้วยโปรแกรมภาษา Visual Basic 6.0 ที่ผ่านการทดสอบความแม่นยำของการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานทั้ง 29 รูปคลื่น ตามที่มาตรฐาน IEC 61083 - 2 กำหนด และการทดสอบความแม่นยำของการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก (KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS) ก่อนที่จะมีการนำไปใช้งานจริงในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะติดตั้งใช้งานในระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งใช้งานจริงต่อไป ผลลัพธ์จากการศึกษาออกแบบโปรแกรมที่จัดทำขึ้น สามารถนำไปใช้งานได้จริง มีประสิทธิภาพและสามารถช่วยประหยัดเวลาต่อการประเมินหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

คำสำคัญ : วิธีการหาราฟที่ที่เหมาะสม, วิธีเกาส์ - นิวตัน, รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า, ฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล 2 ฟังก์ชัน

Abstract

This thesis aims to research and design the software for evaluation of lightning impulse voltage parameters while testing impulse withstand voltage of high voltage equipment is installed in the electrical system before the actual installation, the software development will allow the digital oscilloscope to analyze and evaluate the lightning impulse voltage parameters by itself. Therefore, it is faster to evaluate the

lightning impulse voltage parameters in testing devices. The software design mentioned above includes the following procedures and methods for evaluation of lightning impulse voltage parameters according to IEC 60060-1 and IEC 60060-2 : software development for use on the digital oscilloscope, it was developed by using Visual Basic 6.0 programming language that passed the accuracy test of evaluation of 29 standard lightning impulse voltage waveforms parameters according to IEC 61083 - 2 and accuracy test of evaluation of lightning impulse voltage parameters with a small impulse voltage waveform generator (KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS) before it is implemented in the test of impulse withstand voltage of high voltage equipment is installed in the electrical system before the actual installation. The results from research and design of the software are practical, efficient and save time for evaluation of lightning impulse voltage parameters.

Keywords : Curve fitting technique, Gauss-Newton method, Lightning impulse voltage waveform, Two-exponential function

1. บทนำ

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามักจะดำเนินการกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อประเมินประสิทธิภาพของฉนวน เช่น ความสามารถในการทนต่อความเครียดชั่วคราวของแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า โดยแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบจะถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงและนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีข้อบกพร่องในการผลิตหรือมีความเป็นฉนวนไม่เพียงพอ อาจทำให้การทดสอบล้มเหลว

ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์การคำนวณหาองค์ประกอบของรูปคลื่น โดยแยกรูปคลื่นออกเป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบเรียบหรือรูปคลื่นฐานจะเป็นสิ่งที่ดี หากไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนที่ซับซ้อน แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดส่วนพุ่งเกินและการแกว่งของแรงดันได้ ในการปฏิบัติการทดสอบ ซึ่งเป็นผลของความเหนียวในวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์ นอกจากนี้ยังพบว่า การเกิดส่วนพุ่งเกินและการแกว่งของรูปคลื่นยังส่งผลต่อประสิทธิภาพของฉนวนด้วย ดังนั้น มาตรฐาน IEC และ ANSI / IEEE จึงกำหนดขั้นตอนสำหรับการคำนวณหาองค์ประกอบ

ของแรงดันอิมพัลส์ที่มีการการเกิดส่วนพุ่งเกินและการแกว่งขึ้น ซึ่งมีความจำเป็นต้องสร้างรูปคลื่นฐานและนำไปใช้กับตัวกรอง k-factor ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ โดยใช้วิธีการปรับเส้นโค้งแบบไม่เชิงเส้นตามวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ใช้ชื่อว่า วิธีการ Levenberg-Marquardt ซึ่งเป็นวิธีที่แนะนำตามมาตรฐาน

อย่างไรก็ตามวิธีการแบบไม่เชิงเส้นเหล่านี้มีประสิทธิภาพไม่มากพอ เนื่องจากอัลกอริทึมต้องการการวนซ้ำจำนวนมากในกระบวนการของวิธีการปรับเส้นโค้งที่ไม่ใช่เชิงเส้น ดังนั้น เวลาในการคำนวณจึงค่อนข้างนาน ในกรณีของรูปคลื่นที่มีจุดมากกว่าสองถึงสามพันจุด ดังนั้น อัลกอริทึมที่เหมาะสมสำหรับการประเมินค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นจึงจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงสำหรับการทดสอบแรงดันสูงในอุตสาหกรรมและการวิจัย

ในบทความนี้มีการนำเสนอเทคนิคการปรับเส้นโค้งที่มีชื่อว่าวิธีเกาส์ – นิวตัน สำหรับการประเมินรูปคลื่นฐานของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า วิธีการที่เสนอนี้แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำและการป้องกันสัญญาณรบกวนที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวิธีที่แนะนำตามมาตรฐาน และดีกว่าวิธีที่แนะนำตามมาตรฐานในเรื่องของการใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่า เนื่องจากมีความซับซ้อนในการคำนวณต่ำกว่า จากนั้นนำอัลกอริทึมดังกล่าวมาออกแบบ โปรแกรมคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรมภาษา visual basic 6.0 และติดตั้งบนดิจิทัลออสซิลโลสโคป ในลักษณะหน้าต่างแสดงผลควบคู่ไปกับหน้าต่างแสดงผลเดิมของออสซิลโลสโคป โดยอัลกอริทึมที่ได้รับการพัฒนาได้ผ่านการทดสอบกับข้อมูลรูปคลื่นมาตรฐานบางรูปคลื่น ที่จัดเตรียมโดยเครื่องกำเนิดข้อมูลทดสอบ (TDG) ที่แนบมากับ IEC 61083-2 ซึ่งมีการกำหนดขีดจำกัดการยอมรับสำหรับองค์ประกอบของรูปคลื่นด้วย

2. วัตถุประสงค์ของวิธีการหาเส้นโค้งที่เหมาะสม

ดังที่แสดงในรูปที่ 1 มาตรฐานได้แนะนำวิธีการประเมินค่าของรูปคลื่นทดสอบ (Test waveform) ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยการใช้ k-factor function ซึ่งเป็นกระบวนการกรองที่ขึ้นอยู่กับความถี่ โดยมีกระบวนการดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) ตัดข้อมูลเพื่อลดสัญญาณรบกวนหรือการแกว่งของสัญญาณบางส่วนออก โดยการตัดสัญญาณที่น้อยกว่า 20% ของค่าสูงสุดในช่วงหน้าคลื่นและ 40% ของค่าสูงสุดในช่วงหลังคลื่นของรูปคลื่นที่บันทึก (Record curve) ตามลำดับ จากนั้นแยกช่วงที่สำคัญของรูปคลื่นเอาไว้

(2) นำรูปคลื่นที่แยกไว้มาผ่านการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับข้อมูล (Curve fitting) สำหรับการสร้างรูปคลื่นฐาน (Base curve) โดยการใช้ฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล 2 ฟังก์ชัน ดังสมการ (1) ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบของฟังก์ชัน 4 องค์ประกอบ คือ α , β , A และ t_d เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้จะได้รูปคลื่นใหม่ เรียกว่า รูปคลื่นฐาน

$$g(t) = A(e^{-\alpha(t-t_d)} - e^{-\beta(t-t_d)}) \quad (1)$$

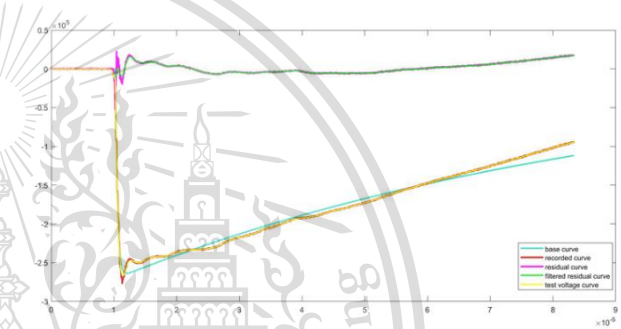
(3) นำรูปคลื่นฐานไปลบออกจากรูปคลื่นที่บันทึกไว้ จากนั้นนำรูปคลื่นที่ได้ไปผ่านการกรองสัญญาณด้วยตัวกรอง k-factor ซึ่งมีสมการดังสมการ (2);

$$k(f) = \frac{1}{(1 + 2.2f^2)} \quad (2)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ในหน่วย MHz.

ตามที่มาตรฐานแนะนำอัลกอริทึมสำหรับตัวกรอง k-factor สามารถสร้างได้อย่างง่ายโดยการใช้ ตัวกรองแบบ zero-phase และ IIR filter ซึ่งนำเสนอโดย L. Lewin [4]

(4) นำรูปคลื่นที่ผ่านการกรองด้วยขั้นตอนที่ (3) ไปบวกกับรูปคลื่นฐานจะได้รูปคลื่นใหม่ เรียกว่า รูปคลื่นแรงดันทดสอบ (Test voltage curve)



รูปที่ 1 กระบวนการที่ใช้ในการประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

รูปคลื่นแรงดันทดสอบจะถูกใช้ในการประเมินค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ เช่น เวลาช่วงหน้าคลื่น เวลาช่วงหลังคลื่น ค่ายอดแรงดัน และ อัตราการเกิดส่วนพุ่งเกินตามมาตรฐาน IEC 60060-1

ในบทความนี้มีการเสนอขั้นตอนของวิธีการ เกาส์ – นิวตันที่มีค่าตัวประกอบความหน่วง (Damping Factor) เท่ากับ 0.5 เพื่อให้ได้เส้นโค้งฐานดังนี้

ขั้นตอนแรกสำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 20% ของค่าสูงสุดในช่วงหน้าคลื่นและ 40% ของค่าสูงสุดในช่วงหลังคลื่นจะถูกลบออก รูปคลื่นด้านซ้ายจะเลื่อนไปเริ่มต้นที่เวลาของค่าที่มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลสามารถเขียนในรูปของสมการ (3)

$$f(t) = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t} \quad (3)$$

จากนั้นค่าขององค์ประกอบทั้ง 4 คือ A_1 , A_2 , α_1 และ α_2 จะถูกประมาณ

วิธีการ เกาส์ – นิวตัน เป็นหนึ่งในวิธีการหาค่าที่เหมาะสมกับข้อมูลแบบไม่เป็นเชิงเส้น และการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อความเข้าใจของพิจารณาฟังก์ชันข้อผิดพลาดกำลังสอง (square error function) ที่ระบุในสมการ (4),

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$e(A, B, \alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n (y(i) - g(i, A, B, \alpha, \beta))^2 \quad (4)$$

เมื่อ $y(i)$ คือ ค่าของรูปคลื่นที่บันทึกไว้ที่จุด i

ฟังก์ชันข้อผิดพลาดจะถูกทำให้เล็กที่สุดโดยวิธีการ เกาส์ – นิวตัน เพื่อให้ค่าของ A, B, α และ β วิธีการ เกาส์ – นิวตัน เริ่มต้นด้วยการประมาณค่าของ $G(X)$ ซึ่งถูกแสดงในสมการ (5),

$$G(X + \Delta X) \approx G(X) + J\Delta X \quad (5)$$

โดยที่ค่าจำกัดความขององค์ประกอบในสมการ (5) จะได้รับดังที่แสดงในสมการ (6) ถึง (9)

$$X = [A \ B \ \alpha \ \beta]^t \quad (6)$$

$$\Delta X = [\Delta A \ \Delta B \ \Delta \alpha \ \Delta \beta]^t \quad (7)$$

$$G(X) = [g(1, X) \ g(2, X) \ g(3, X) \ \dots \ g(n, X)]^t \quad (8)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial g(1, X)}{\partial A} & \frac{\partial g(1, X)}{\partial B} & \frac{\partial g(1, X)}{\partial \alpha} & \frac{\partial g(1, X)}{\partial \beta} \\ \frac{\partial g(2, X)}{\partial A} & \frac{\partial g(2, X)}{\partial B} & \frac{\partial g(2, X)}{\partial \alpha} & \frac{\partial g(2, X)}{\partial \beta} \\ \frac{\partial g(3, X)}{\partial A} & \frac{\partial g(3, X)}{\partial B} & \frac{\partial g(3, X)}{\partial \alpha} & \frac{\partial g(3, X)}{\partial \beta} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g(n, X)}{\partial A} & \frac{\partial g(n, X)}{\partial B} & \frac{\partial g(n, X)}{\partial \alpha} & \frac{\partial g(n, X)}{\partial \beta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

สมการ (5) สามารถเขียนใหม่ในรูปสมการ (10) โดยสมมติว่า $G(X + \Delta X)$ มีค่าเท่ากับ Y และใช้การวิเคราะห์ความถดถอยแบบเป็นเชิงเส้นกับสมการ (10) ค่า ΔX จะได้รับจากสมการที่แสดงดังสมการ (11)

$$E(X + \Delta X) = G(X + \Delta X) - G(X) = J\Delta X \quad (10)$$

$$\Delta X = (J^t J)^{-1} J^t E(X + \Delta X) \quad (11)$$

เพื่อให้เป็นไปตามค่าต่ำสุดของฟังก์ชันข้อผิดพลาด ค่า X จะถูกแทนที่โดย $X + \Delta X$ และคำนวณซ้ำจนกว่าค่าของข้อผิดพลาดสัมพัทธ์ (ϵ) จะน้อยกว่าขีดจำกัดความถูกต้องที่กำหนดโดยสมการ (12) ในบทความนี้ ขีดจำกัดความถูกต้อง คือ 10^{-6}

$$\epsilon_i = \frac{\|e(A, B, \alpha, \beta)_i - e(A, B, \alpha, \beta)_{i-1}\|}{\|e(A, B, \alpha, \beta)_{i-1}\|} \quad (12)$$

เมื่อ ϵ_i ข้อผิดพลาดสัมพัทธ์ที่การวนซ้ำรอบที่ i

จำนวนรอบของการวนซ้ำสูงสุดสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลจะถูกตั้งค่าไว้ที่ 200 รอบ

ไม่ว่าจะใช้วิธีการ เกาส์ – นิวตัน แบบดั้งเดิมในการประเมินหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นโดยใช้รูปคลื่นมาตรฐาน ในบางกรณีวิธีการที่

ใช้ค่า X ไม่สามารถจะไปถึงขีดจำกัดความถูกต้องได้ ดังนั้น จึงมีการแทนที่ค่า X ใหม่ถูกสมการที่ถูกแสดงดังสมการ (13),

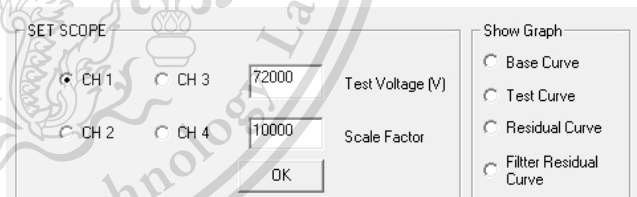
$$X_{k+1} = X_k + d\Delta X_k \quad (13)$$

เมื่อ X_{k+1} คือ ค่าที่จะแทนที่ค่าของ X ในรอบที่ k ของการวนซ้ำ d คือ ค่าตัวประกอบความหน่วง (Damping Factor)

3. ประสิทธิภาพของโปรแกรมคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

การออกแบบโปรแกรมในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงอิมพัลส์ มีการออกแบบโดยใช้วิธีการ Gauss-Newton ดังที่กล่าวมา มาใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับข้อมูล เพื่อใช้ในการสร้างรูปคลื่นแรงดันทดสอบ ด้วยวิธีการตามมาตรฐาน IEC 60060-2 แนะนำ และการประเมินหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงอิมพัลส์ กระทำตามวิธีการที่มาตรฐาน IEC 60060-1 กำหนด โดยใช้โปรแกรม Portable Visual Basic 6 ซึ่งเขียนด้วยภาษา Visual Basic 6.0 ในการสร้างและออกแบบหน้าต่างการใช้งาน โปรแกรมคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นบนดิจิตอลออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 2

การทดสอบโปรแกรมที่สร้างขึ้น ทำให้โดยการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 29 รูปคลื่น ซึ่งอาศัยข้อมูลที่แนบไว้ในมาตรฐาน IEC 61083-2 โดยมีผลการคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นจากโปรแกรมที่สร้างขึ้นกับค่าตามที่มาตรฐานกำหนด ดังรูปที่ 3

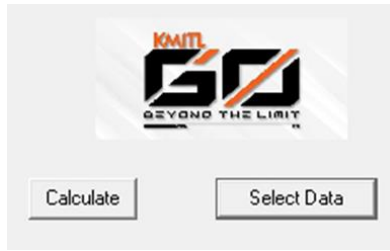


(a) ฟังก์ชันการตั้งค่าน้ำจอแสดงผลของออสซิลโลสโคปและการแสดงรูปคลื่นรูปต่างๆ

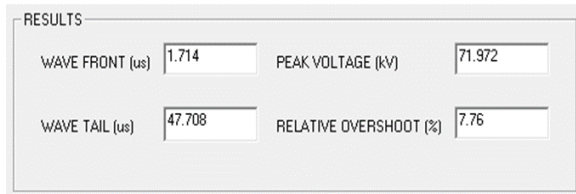
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับลิขสิทธิ์ สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าจะด้วยวิธีใดก็ตาม ห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

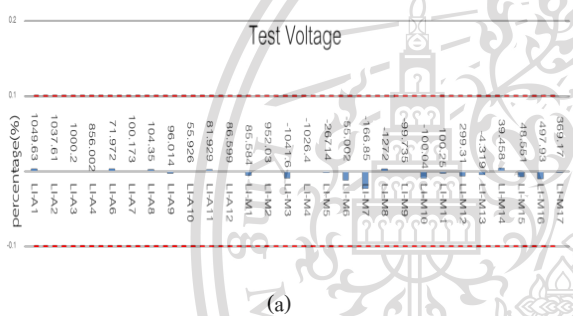
องค์ประกอบของรูปคลื่นโดยใช้รูปคลื่นมาตรฐาน ในบางกรณีวิธีการที่



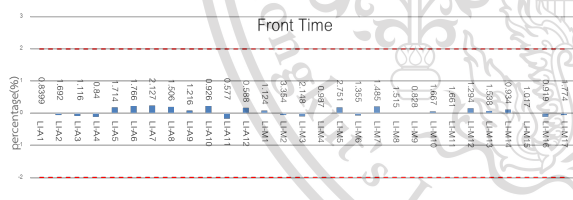
(b) ฟังก์ชันการคำนวณองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์



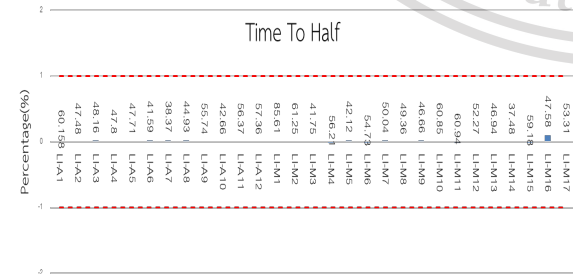
(c) ฟังก์ชันการแสดงผลการคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปที่ 2 โปรแกรมคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 3 องค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่คำนวณได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดความถูกต้องตามมาตรฐาน IEC 61083-2

4. สรุป

การคำนวณหาองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยวิธีการตามมาตรฐานที่มีการใช้วิธีการ เกาส์ – นิวตัน ดังที่กล่าวมา ซึ่งได้มีการตรวจสอบด้วยความถูกต้องในการคำนวณ โดยการใช้ข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปมาตรฐาน ทั้ง 29 รูปคลื่นตามมาตรฐาน IEC 61083-2 วิธีการและ โปรแกรมที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ในการคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานในการทดสอบอุปกรณ์ที่จะใช้ในระบบไฟฟ้าจริงได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นพิเศษในการจัดหาสิ่งอำนวยความสะดวกในงานวิจัยนี้และรศ.ดร. พีรวุฒิ ยูทธโกวิท ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำปรึกษา อบรมสั่งสอน ให้คำชี้แนะต่าง ๆ ตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำราวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์, 2549.
- [2] Norasage Pattanadech and Peerawut Yutthagowith, “Fast Curve Fitting Algorithm for Parameter Evaluation Lightning Impulse Test Technique,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015
- [3] Tsuboi, G. Ueta, S. Okabe, Y. Shimizu, T. Ishikura and E. Hino, “K-factor value and front-time-related characteristics in negative polarity lightning impulse test for UHV-class air insulation,” IEEE Trans. Power Del., Vol. 28, No. 2, pp. 1148–1155, 2013.
- [4] L. Lewin, T. N. Tran, D. J. Swaffield, and J. K. Hällström, “Zero-phase filtering for lightning impulse evaluation: a k-factor filter for the revision of IEC60060-1 and -2,” IEEE Trans. Power Del., Vol. 23, No. 1, pp. 3–12, 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ แจกจ่าย หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [5] M. Hinow, W. Hauschild and E. Gockenbach, "Lightning impulse voltage and overshoot evaluation proposed in drafts of IEC 60060-1 and future UHV testing," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, No. 5, pp. 1628–1634, 2010
- [6] High-Voltage Test Techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements, IEC standard 60060-1, 2010.
- [7] Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests, IEC Standard 61083-1, 2001.
- [8] Instruments and Software Used for Measurement in High-voltage and High-current Tests Part 2: Requirements for Software for Tests with Impulse Voltages and Currents, IEC Standard 61083-2, 2010.
- [9] HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES PART 2 MEASURING SYSTEMS, IEC Standard 60060-2, 2010.
- [10] Ed Wilson, Microsoft VBSCRIPT Step by Step, Washington, Microsoft Press, 2007.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ข้อมูลอุปกรณ์

โปรแกรมคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่จัดทำขึ้น เป็นรูปแบบเฉพาะที่ใช้ในการติดตั้งบนออสซิลโลสโคปที่เฉพาะ โดยดิจิทัลออสซิลโลสโคปที่ใช้งาน คือ TELEDYNE LECROY HDO6000A ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

- 4 input channels
- 16 digital channels (with -MS models)
- 12-bit ADC resolution, up to 15 bits with enhanced resolution
- Up to 10 GS/s with Enhanced Sample Rate
- 350 MHz, 500 MHz, and 1 GHz bandwidths
- ± 10 V applied offset with high gain settings
- Long Memory - up to 250 Mpts/Ch
- MAUI with OneTouch user interface
- Exceptional Serial Data Tools
- Powerful, Deep Toolbox



รูปที่ ข.1 TELEDYNE LECROY HDO6000A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทดสอบโปรแกรมในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ในขั้นตอนการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาดเล็ก เครื่องกำเนิดที่ใช้ คือ KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

<p>Calibrator Basic-Device KAL 1000 for supply and control of the KAL-Generators described below, rack mount with power supply, line filter, built into a 19" housing</p> <p>design cassette housing (W x H x D) 4 HE, 42 TE 500x200x320 mm weight approx. 10 kg</p> <p>H.V. Load Circuit, electronically controled design in basic device charge voltage, adjustable with 10-turn-potentiometer 0 - +1000 V positiv digital display setting-accuracy < 0.1 % LED 0-1000.0 V measuring-accuracy ±0.1 % ± 2 digit charge time moduli-dependent 1 ... 10 s output frontside coaxial measurement 2 plugs max. cable length unlimited load resistance >= 200 kOhm</p> <p>Control Electronic design in basic device releasing manual key TTL LO-level or external relais impulse output switching gap SG 5 Vp, BNC time-to-chopping adjustable 0.1 - 10 000 µs step 0.1 µs quartz-timebase 10 MHz, 100 ppm chopping gap CG 5 Vp, BNC</p> <p>Step-Voltage-Generator KAL-STEP for the step calibration of the inputs of digital impulse voltage measuring system according to IEC 1083-1 design in basic device charge voltage base-device 0...+1000 V electronically switching-device short-circuited < 10 ns (90/10%) impulse output BNC 10 ... 1000 V polarity negative step 50 Ohm load-resistance >= 200 kOhm cable-length 1.5 m accuracy step-voltage ±0.5% (± 0.2% 1)</p> <p>Lightning-Impulse-Generator KAL-LI 0.84/60 for pulse calibration of the digital impulse voltage measuring system according to IEC 1083-1 design cassette 12 TE charge voltage basic-device 0 - +1000 V switching-device electronically chopping-device electronically charge-capacity 0.6 µF impulse output BNC ±50 ... ±1000 V 2) output-resistance 20 Ohm cable-length 1.5 m shape standard 0.84/60 µs optional 1.56/60 µs chopping time selectable 0.1 ... 10 000 µs accuracy peak-voltage ± 1% / ± 0.2% 1) front-time ± 2% / ± 0.5% 1)</p>		<p>time-to-half-value ± 2% / ± 0.2% 1) time-to-chopping ± 2% / ± 1% 1) according to IEC 1083-1 table 3</p> <p>Switching-Impulse-Generator KAL-SI 20/4000 for pulse calibration of the digital impulse voltage measuring system according to IEC 1083-1. design cassette 12 TE charge voltage basic-device 0 - +1000 V switching-device electronically chopping-device electronically charge-capacity 1 µF impulse output BNC ±50 ... ±1000 V 2) output-resistance 20 Ohm cable-length 1.5 m shape standard 20/4000 µs optional 250/2500 µs chopping time selectable 0.1 ... 10 000 µs accuracy peak-voltage ± 1% / ± 0.2% 1) time-to-peak ± 2% / ± 0.2% 1) time-to-half-value ± 2% / ± 0.2% 1) time-to-chopping ± 2% / ± 1% 1) according to IEC 1083-1 table 3</p> <p>Timemark-Generator KAL-ZEIT For time calibration of the digital impulse voltage measuring system according to IEC 1083-1. design in base device output BNC time-interval 20 ms ±0.01% squarewave 0 / 5 V, TTL-level</p> <p>Unit-Step-Voltage-Generator RIG 1000 (H) for determination of the impulse scale factor and the response parameters of the high voltage impulse measuring system with the unit step method according to IEC 60-2. The generator is placed on the floor or wall in the h.v. testfield and connected to the h.v. divider. design cassette housing (60xHxD) 4 HE, 42 TE approx. 4 kg weight approx. 4 kg charge voltage coax-input 0 - +1000 V feeding basic device via coaxcable 20 m type H optionally inbuilt h.v. supply Charge capacitor charge-capacity 5.3 µF switching-device electronically output-resistance 2 Ohm rise-time < 10 ns (10/90%) releasing TTL LO-level or relay (meas.system) via coaxcable 20 m impulse output 0 ... ±1000 V polarity positive or negative to l.v. divider connection >= 5 kOhm 10 nF load peak value ± 0.1% stat. battery inside</p> <p>1) long term stability / short term stability 2) efficiency < 1 Technical data and design subject to modification without notice.</p>
--	--	---

รูปที่ ข.2 KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS Technical Data

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ข.3 KAL 1000 Impulse-Calibrator DR.STRAUSS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

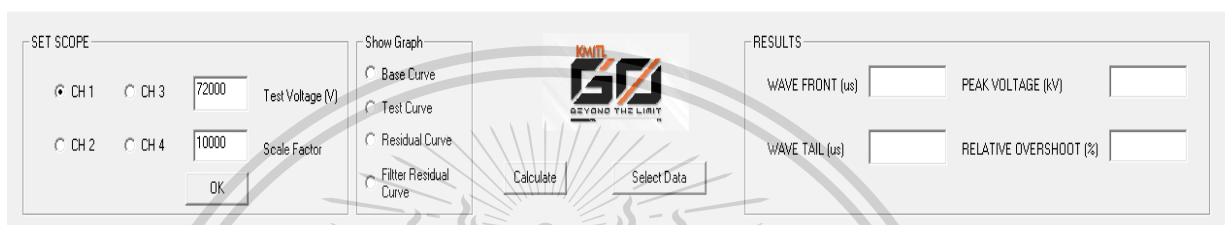
การใช้งานโปรแกรมคำนวณรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า

1. การคำนวณองค์ประกอบของรูปคลื่นสำหรับรูปคลื่นที่กำลังทดสอบ

1.1 เปิดออสซิลโลสโคปในหน้าของการวัดขึ้นมา กดปุ่ม Analysis จากนั้นกดปุ่ม CustomDSO

1.2 ในแถบ CustomDSO setup ให้กดที่ปุ่ม Plugin

1.3 จะพบแถบของโปรแกรมคำนวณอิมพัลส์ซึ่งได้ทำการติดตั้งไว้อยู่ด้านล่างจอภาพ



รูปที่ ค.1 ส่วนของโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาค่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ติดตั้งบน
ออสซิลโลสโคป

1.4 เลือกช่องสัญญาณที่ต้องการวัด ประกอบไปด้วย Channel 1, Channel 2, Channel 3 และ Channel 4 โดยเลือกมาเพียง 1 ช่องสัญญาณสำหรับนำรูปคลื่นแรงดันมาคำนวณเท่านั้น ถ้าต้องการแสดงรูปคลื่นอื่น เช่น รูปคลื่นกระแสให้เปิดช่องสัญญาณเพิ่มเติมจากแถบดั้งเดิมของออสซิลโลสโคป (อยู่ด้านบนของโปรแกรมคำนวณรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า)

1.5 กรอกค่าแรงดันทดสอบที่ต้องการ (หน่วยโวลต์) ในช่อง Test Voltage

1.6 กรอกค่าลดทอนรวมของวงจรวัดโดยทั้งลดทอนจากวงจรแบ่งแรงดัน (Divider) และจากหัววัด (Probes) ของออสซิลโลสโคปในช่อง Scale factor

1.7 กดปุ่ม OK (เป็นคำสั่งการจัดเตรียมขนาดของช่องสัญญาณและตำแหน่งจับสัญญาณให้เหมาะสมกับรูปคลื่นที่ต้องการวัดและเป็นการตั้งค่าสโคปให้อยู่ในโหมด Single โดยอัตโนมัติ)

1.8 กดปุ่ม Calculate (เป็นคำสั่งการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่น)


1.9 ค่าองค์ประกอบรูปคลื่นจะแสดงผลในส่วนของ Result ประกอบไปด้วยช่อง Wave Front แสดงเวลาหน้าคลื่น(หน่วยไมโครวินาที), ช่อง Wave Tail แสดงเวลาหลังคลื่น(หน่วยไมโครวินาที), ช่อง Peak Voltage แสดงค่ายอดแรงดัน(หน่วยกิโลโวลต์) และ ช่อง Relative Overshoot แสดงอัตราการเกิดการแกว่งสัมพันธ์(หน่วยร้อยละ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ

This material is reserved for educational use only; not allowed for commercial use.

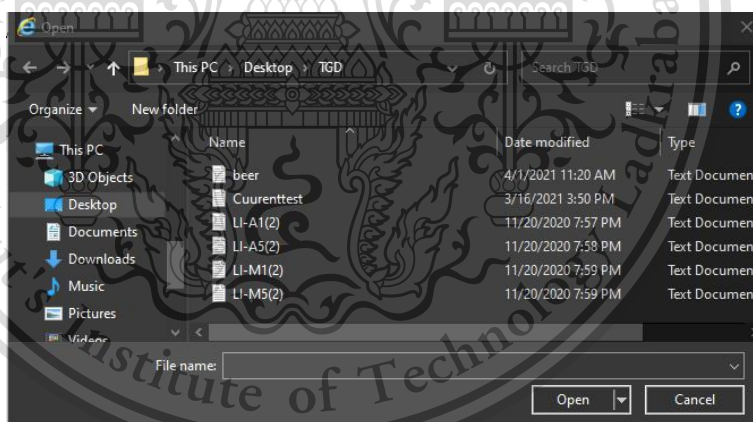
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.10 ถ้าต้องการให้หน้าจอแสดงรูปคลื่นอื่น ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ทดสอบสามารถควบคุมได้ผ่านส่วน Show graph โดยประกอบไปด้วย Base Curve, Test Curve, Residual Curve และ Filter Residual Curve โดยเลือกเฉพาะรูปคลื่นที่ต้องการให้แสดงผลในหน้าจอ

1.11 สำหรับรูปคลื่นที่ต้องการบันทึกค่าให้ทกโลกโก้  โปรแกรมจะนำค่าจำนวนจุดทดสอบ(Number of Samples), เวลาระหว่างจุดทดสอบ(Horizontal per Step), ขนานของช่องแนวแกนแนวตั้ง(Vertical Scale), เวลาที่ทดสอบ(Date), เวลาหน้าคลื่น, เวลาหลังคลื่น, ค่ายอดแรงดัน, อัตราการเกิดการแกว่ง และค่าข้อมูลดิบที่ออสซิลโลสโคปวัดได้ไปไว้ในไฟล์ชื่อตามปีเดือนวันและจำนวนครั้งที่บันทึกของวันที่ทดสอบ เช่นทดสอบวันที่ 21 เดือนเมษายน ค.ศ.2021บันทึกค่าครั้งที่ 2 ชื่อไฟล์คือ 2021_4_21_2.txt โดยไฟล์ที่บันทึกจะอยู่ใน D:\Impluse_KYK\Savetest

2. การคำนวณองค์ประกอบของรูปคลื่นสำหรับรูปคลื่นที่ได้รับข้อมูลมาจากการทดสอบอื่น ๆ

2.1 กดปุ่ม Select Data โปรแกรมจะพาไปยังหน้าต่างใหม่ ให้เลือกที่อยู่ไฟล์ของข้อมูลที่ต้องการนำมาคำนวณ



รูปที่ ค.2 หน้าต่างสำหรับเลือกไฟล์ที่ต้องการนำข้อมูลมาเพื่อคำนวณ

2.2 กดปุ่ม Calculate (เป็นคำสั่งการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่น)

2.3 หลังจากที่ทำกรกดปุ่ม Calculate แล้วการแสดงผลลัพธ์เหมือนกรณีที่ 1 ทุกประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หลักการทํางานของโปรแกรม

โปรแกรมคำนวณค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการออกแบบประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

1. ส่วนโปรแกรมการคำนวณค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

```
Function Evaluation(valuey, Hor, NumSam, maxyy, WFF, WTT, oove)
```

โปรแกรมคำนวณทั้งหมดอยู่ในฟังก์ชันชื่อ Evaluation โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.1 กำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการใช้งาน

```
Dim X(3), xx(1), dx(4), bb(1), c(3), AI(3, 3), AO(3, 3), inverse1(3, 3)
```

```
Dim AA(1, 1), invAA(1, 1), Temp(2, 2), matAA(3, 3), InputI(3, 3), MatA(3, 3), adj(3, 3)
```

```
Dim time(1000000), Y(1000000), tt(1000000), t(1000000), z(1000000), yy(1000000),  
res(1000000), yyy(1000000), yyyy(1000000), w(1000000), ww(1000000), yn(1000000)
```

```
Dim dy(1000000), XXXt(3, 1000000), XXX(1000000, 3), answer_matrix1(3, 1000000)
```

1.2 รับค่าข้อมูลดิบทั้งหมดโดยใช้ For Loop จากนั้นใช้คำสั่ง if หาข้อมูลสูงสุด (ymax) และเวลาของข้อมูลสูงสุด (tmax) เก็บจำนวนจุดทดสอบในตัวแปร n

```
For i = 0 To NumSam  
    t(i) = i  
    If Abs(valuey(i)) > Abs(ymax) Then  
        ymax = valuey(i)  
        tmax = i  
    End If  
Next
```

```
n = i
```

```
tmax = tmax + 1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for personal use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หาค่าชดเชยเพื่อกรณีที่ข้อมูลไม่ได้เริ่มต้นจาก 0 โดยนำร้อยละ 25 ของข้อมูลระหว่างจุดเริ่มต้นถึงจุดสูงสุดมาเฉลี่ย จากนั้นลบค่าชดเชยออกไปและเปลี่ยนข้อมูลให้อยู่ในรูปร้อยละ

```

For i = 0 To Round(tmax / 4) - 1
    j = j + valuey(i)
    a = a + 1
Next

offs = j / a
ymax = ymax - offs
For i = 0 To n - 1
    valuey(i) = (valuey(i) - offs) / ymax
Next

```

ตัดข้อมูลส่วนหน้าคลื่นที่มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 20 ของค่าสูงสุดและส่วนหลังคลื่นที่มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 40 ออก

จากนั้นเก็บข้อมูลใหม่ที่ได้ในตัวแปร Y

```

For i = 0 To tmax - 1
    If valuey(i) <= 0.2 Then
        l = i
    End If
Next

```

```

For i = tmax - 1 To n - 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only. Not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(ต่อ)

```

    m = i

End If

Next

m = m + 1

tmaxn = (tmax) - (l) + 1

j = 0

For i = l - 1 To m - 1
    Y(j) = valuey(i)
    j = j + 1
Next

```

สร้างตัวแปรเวลาตามส่วนที่ตัดมาใหม่เก็บไว้ในตัวแปร tt

```

For i = 0 To (m - l + 1) - 1
    tt(i) = i
Next

```

กำหนดค่าองค์ประกอบเริ่มต้นของรูปคลื่นฐาน $X(0) = A$, $X(1) = B$, $X(2) = \alpha$, $X(3) = \beta$

$$X(0) = 1$$

$$X(1) = -1$$

$$X(2) = -1 * dt / 0.00000001 / 7000$$

$$X(3) = -1 * dt / 0.00000001 / 40$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หาค่าผิดพลาดระหว่างรูปคลื่นที่บันทึกและจากรูปคลื่นฐานเก็บไว้ในตัวแปร erro
ตามสมการ $\text{error} = \text{error} + (Y - (Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t}))^2$

```
For i = 0 To (m - l + 1) - 1

    erro = erro + (Y(i) - (X(0) * Exp(X(2) * tt(i)) + X(1) * Exp(X(3) * tt(i)))) ^ 2

Next
```

ขั้นตอน วิธีการ Gauss-Newton

กำหนดให้ทำ Gauss-Newton ซ้ำไปเรื่อย ๆ ถ้าผลต่างระหว่างค่าผิดพลาดมากกว่า 0.000001 และจำนวนครั้งการทำไม่เกิน 200

```
Do While reterr > 0.000001 And k < 200
```

สร้างเมทริกซ์จาโคเบียนขึ้นมาและเก็บในตัวแปร XXX

โดย $XXX(i,0)$ คือ $\frac{\partial(Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t})}{\partial A}$

$XXX(i,1)$ คือ $\frac{\partial(Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t})}{\partial B}$

$XXX(i,1)$ คือ $\frac{\partial(Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t})}{\partial \alpha}$

$XXX(i,1)$ คือ $\frac{\partial(Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t})}{\partial \beta}$

```
k = k + 1
```

```
For i = 0 To (m - l + 1) - 1
```

```
    XXX(i, 0) = Exp(X(2) * tt(i))
```

```
    XXX(i, 1) = Exp(X(3) * tt(i))
```

```
    XXX(i, 2) = X(0) * tt(i) * Exp(X(2) * tt(i))
```

```
    XXX(i, 3) = X(1) * tt(i) * Exp(X(3) * tt(i))
```

```
Next
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หาผลต่างระหว่างรูปคลื่นที่บันทึกและค่าจากรูปคลื่นฐานเก็บไว้ในตัวแปร dy

```

For i = 0 To (m - l + 1) - 1

    dy(i) = Y(i) - (X(0) * Exp(X(2) * tt(i)) + X(1) * Exp(X(3) * tt(i)))

Next

```

สร้างเมทริกซ์ทรานสโพสของเมทริกซ์จาโคเบียน เก็บไว้ในตัวแปร XXXt

```

For i = 0 To 3

    For j = 0 To (m - l + 1) - 1

        XXXt(i, j) = XXX(j, i)

    Next

Next

```

ทำการคูณทรานสโพสของเมทริกซ์จาโคเบียนด้วยเมทริกซ์จาโคเบียนเก็บไว้ในตัวแปร

answer_matrix

```

For i = 0 To 3

    For j = 0 To 3

        For e = 0 To (m - l + 1) - 1

            Sum = Sum + (XXXt(i, e) * XXX(e, j))

        Next

        answer_matrix(i, j) = Sum

        Sum = 0

    Next

Next

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หาดีเทอร์มิแนนต์ของ answer_matrix ซึ่งมีมิติ 4x4 เก็บในตัวแปร detva โดยเรียกใช้ฟังก์ชัน detvalue

```
Call detvalue(answer_matrix, 4, detva)
```

หาเมทริกซ์อินเวอร์สของ answer_matrix เก็บในตัวแปร inverse1 โดยเรียกใช้ฟังก์ชัน invers

```
Call invers(detva, answer_matrix, inverse1)
```

หาค่าความต่างระหว่างค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นฐานปัจจุบันกับค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นฐานครั้งก่อนหน้า

โดยใช้สมการ $[\Delta A] = ([Z_i]^\dagger [Z_i])^{-1} [Z_i]^\dagger [\Delta Y]$

ซึ่ง $[Z_i]$ คือเมทริกซ์จาคอบีแทนตัวแปร XXX

$[Z_i]^\dagger$ คือทรานสโพสของเมทริกซ์จาคอบีแทนด้วยตัวแปร XXXt

$[\Delta Y]$ คือค่าความแตกต่างที่ระหว่างค่า Y จริงและค่า Y ที่ได้จากการประมาณค่า โดยแบบจำลองถดถอยแทนด้วยตัวแปร dy

```
For i = 0 To 3
```

```
For j = 0 To (m - l + 1) - 1
```

```
For e = 0 To 3
```

```
Sum = Sum + (inverse1(i, e) * XXXt(e, j))
```

```
Next
```

```
answer_matrix1(i, j) = Sum
```

```
Sum = 0
```

```
Next
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(ต่อ)

```

Next
For i = 0 To 3
    For e = 0 To (m - l + 1) - 1
        Sum = Sum + (answer_matrix1(i, e) * dy(e))
    Next
    dx(i) = Sum
    Sum = 0
Next

```

กำหนดค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นฐานใหม่โดยให้ขยับไปที่ละครึ่งของค่าความต่างระหว่างค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นฐานปัจจุบันกับค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นฐานครั้งก่อนหน้า หรือค่าองค์ประกอบความถี่เป็น 0.5

```

If ll = 1 Then
    df = 0.5
    For i = 0 To 3
        X(i) = X(i) + df * dx(i)
    Next

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หาค่าผิดพลาดระหว่างค่าข้อมูลจริงและจากรูปคลี่ฐานเก็บไว้ในตัวแปร errh
ตามสมการ $\text{error} = \text{error} + (Y - (Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t}))^2$

```
errh = 0

For i = 0 To (m - l + 1) - 1

    yy(i) = X(0) * Exp(X(2) * tt(i)) + X(1) * Exp(X(3) * tt(i))

    errh = errh + (Y(i) - yy(i)) ^ 2

Next
```

เปลี่ยนค่าองค์ประกอบของรูปคลี่ฐานใหม่อีกครั้งแล้วทำการหาค่าความผิดพลาดใหม่เก็บไว้ใน
ตัวแปร err1

```
For i = 0 To 3
    X(i) = X(i) + df * dx(i)
Next

err1 = 0

For i = 0 To (m - l + 1) - 1

    yy(i) = X(0) * Exp(X(2) * tt(i)) + X(1) * Exp(X(3) * tt(i))

    err1 = err1 + (Y(i) - yy(i)) ^ 2

Next
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หาค่าองค์ประกอบความหน่วงใหม่โดยใช้สมการ $x = A^{-1}B$ โดย

X คือ เมทริกซ์องค์ประกอบของค่าองค์ประกอบความหน่วงแทนด้วยตัวแปร xx

A คือ เมทริกซ์ค่าคงที่แทนด้วย AA

B คือ เมทริกซ์ของผลต่างของค่าความผิดพลาดระหว่างรูปคลื่นที่บันทึกและรูปคลื่นฐานจากการแทนองค์ประกอบของรูปคลื่นฐาน 2 ครั้ง

$$AA(0, 0) = 0.25$$

$$AA(0, 1) = 0.5$$

$$AA(1, 0) = 1$$

$$AA(1, 1) = 1$$

$$bb(0) = errh - erro$$

$$bb(1) = err1 - erro$$

$$\det AA = (AA(0, 0) * AA(1, 1)) - (AA(1, 0) * AA(0, 1))$$

$$\text{inv}AA(0, 0) = (1 / \det AA) * AA(1, 1)$$

$$\text{inv}AA(1, 1) = (1 / \det AA) * AA(0, 0)$$

$$\text{inv}AA(0, 1) = -(1 / \det AA) * AA(0, 1)$$

$$\text{inv}AA(1, 0) = -(1 / \det AA) * AA(1, 0)$$

$$xx(0) = \text{inv}AA(0, 0) * bb(0) + \text{inv}AA(0, 1) * bb(1)$$

$$xx(1) = \text{inv}AA(1, 0) * bb(0) + \text{inv}AA(1, 1) * bb(1)$$

$$df = -xx(1) / xx(0) / 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หาค่าองค์ประกอบของรูปคลี่พื้นฐานใหม่โดยใช้ค่าองค์ประกอบความหน่วงที่เหมาะสมซึ่งหามา
จากด้านบน

```
For i = 0 To 3
    X(i) = X(i) + (df - 1) * dx(i)
Next
```

ทำการหาค่าความผิดพลาดระหว่างค่าข้อมูลจริงและรูปคลี่พื้นฐานใหม่เก็บไว้ในตัวแปร err1

```
err1 = 0
For i = 0 To (m - l + 1) - 1
    yy(i) = X(0) * Exp(X(2) * tt(i)) + X(1) * Exp(X(3) * tt(i))
    err1 = err1 + (Y(i) - yy(i)) ^ 2
Next
```

หาค่าความต่างระหว่างความผิดพลาดจากการแทนด้วยค่าองค์ประกอบของรูปคลี่พื้นฐานครั้ง
ก่อนหน้าและจากการแทนด้วยค่าองค์ประกอบของรูปคลี่พื้นฐานปัจจุบัน เก็บในตัวแปร relerr ซึ่งจะใช้
เป็นเงื่อนไขในการหยุดทำงานของลูป Gauss-Newton และแทนค่าเริ่มต้นองค์ประกอบรูปคลี่พื้นฐาน
ด้วยค่าองค์ประกอบรูปคลี่พื้นฐานปัจจุบัน

```
relerr = Abs(erro - err1) / (1 + erro)
erro = err1
Loop
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กำหนดค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นฐานใหม่โดย $C(0) = \alpha$, $C(1) = \beta$, $C(2) = A$, $C(3) = B$

$$c(0) = -\text{Round}(X(2), 11)$$

$$c(1) = -\text{Round}(X(3), 11)$$

$$c(2) = \text{Round}(X(0), 11)$$

$$c(3) = -\text{Round}(X(1), 11)$$

หาเวลาเริ่มต้นของรูปคลื่นฐาน

$$tc = \text{Round}(td - \text{Log}(c(3) / c(2)) / (c(0) - c(1)))$$

If $tc < 0$ Then

$$tc = 0$$

End If

หารูปคลื่นฐานตามสมการ $\text{basecurve} = Ae^{-\alpha t} - Be^{-\beta t}$ โดยตัดส่วนค่าลบก่อนถึง
เวลาเริ่มต้นคลื่นรูปฐานออก

For $i = 0$ To $n - 1$

$$z(i) = c(2) * \text{Exp}(-c(0) * (t(i) - td + 1)) - c(3) * \text{Exp}(-c(1) * (t(i) - td + 1))$$

Next

For $i = 0$ To $tc - 1$

$$z(i) = 0$$

Next

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เปลี่ยนรูปคลื่นฐานที่แสดงเป็นร้อยละของค่ายอดให้เป็นรูปคลื่นฐานของค่าจริงจากนั้นเก็บไว้ในตัวแปร basecurve และเก็บข้อมูลเวลาไว้ในตัวแปร time

```
Dim basecurve(1000000)
For i = 0 To n - 1
    basecurve(i) = z(i) * ymax
Next
For i = 0 To n - 1
    time(i) = t(i) * dt
Next
```

หาค่าสูงสุดของรูปคลื่นฐานและเก็บไว้ในตัวแปร zmax จากนั้นหาอัตราการเกิดส่วนฟุ้งเกิน โดยนำค่าสูงสุดของรูปคลื่นที่บันทึกกลับด้วยค่าสูงสุดของรูปคลื่นฐานและเก็บไว้ในตัวแปร be

```
For i = 0 To n - 1
    If Abs(z(i)) > Abs(zmax) Then
        zmax = z(i)
    End If
Next
be = 1 - zmax
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

นำรูปคลื่นฐานที่ได้ไปลบออกจากรูปคลื่นที่บันทึก จะได้เป็นรูปคลื่นเหลือ เก็บไว้ในตัวแปร residual

```

For i = 0 To n - 1

    res(i) = valuey(i) - z(i)

Next

Dim residual(1000000)

For i = 0 To n - 1

    residual(i) = res(i) * ymax

Next

```

หาค่าองค์ประกอบของการกรองด้วย k-factor filter (zero-phase and IIR filter) ประกอบด้วย a1 คือค่าองค์ประกอบของข้อมูลป้อนเข้าของ IIR filter และ a2 คือค่าองค์ประกอบของข้อมูลป้อนออก IIR filter

```

kfactor = Tan((4 * Atn(1)) * dt / 1 / ((0.00000000000022) ^ (1 / 2)))

a1 = kfactor / (1 + kfactor)

a2 = (1 - kfactor) / (1 + kfactor)

```

ทำการกรองรูปคลื่นเหลือด้วยสมการ IIR filter $\sum_{k=0}^M b_k x[n-k] = \sum_{k=0}^N a_k y[n-k]$ โดย $M=1, N=1$ และ $a_0=1$ จะได้ว่า $y[n] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] - a_1 y[n-1]$ โดย b_0, b_1 แทนด้วยตัวแปร a1 และ $-a_1$ แทนด้วยตัวแปร a2

```

yyy(0) = res(0)

For i = 1 To n - 1

    yyy(i) = a1 * res(i - 1) + a1 *
    res(i) + a2 * yyy(i - 1)

Next

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการกรองรูปคลื่นที่ได้แบบย้อนกลับอีกครั้งด้วยสมการ IIR filter

```

i = 0

j = n - 1

Do While i < n

    yyy(i) = yyy(j)

    i = i + 1

    j = j - 1

Loop

w(0) = yyy(0)

For i = 1 To n - 1

    w(i) = a1 * yyy(i - 1) + a1 * yyy(i) + a2 * w(i - 1)

Next

```

รูปคลื่นที่ผ่านการกรองด้วยสมการ IIR filter แบบเดินหน้าและแบบย้อนกลับเรียกว่า Filtered residual waveform เก็บไว้ในตัวแปร ww

```

i = 0

j = n - 1

Do While i < n

    ww(i) = w(j)

    i = i + 1

    j = j - 1

Loop

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

นำสัญญาณที่ได้จากการกรองด้วยฟิลเตอร์ไปบวกกับรูปคลื่นฐานจะได้รูปคลื่นทดสอบ (Test waveform) ซึ่งเก็บไว้ในตัวแปร yn จากนั้นเปลี่ยนจากรูปคลื่นทดสอบที่อยู่ในรูปร้อยละของค่ายอดให้เป็นค่าจริงของรูปคลื่นทดสอบจากนั้นเก็บไว้ในตัวแปร testcurve

```

For i = 0 To n - 1
    yn(i) = ww(i) + z(i)
Next
For i = 0 To n - 1
    testcurve(i) = yn(i) *
ymax
Next

```

หาค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์จากค่าสูงสุดของรูปคลื่นทดสอบและเก็บไว้ในตัวแปร ymax โดยเก็บไว้ในหน่วยกิโลโวลต์

```

For i = 0 To n - 1
    t(i) = i
    If Abs(yn(i)) > Abs(ymax) Then
        ymax = yn(i)
        tnmax = i
    End If
Next
ymax = ymax * ymax * (1 / 1000)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หาเวลาที่รูปคลื่นทดสอบขึ้นไปถึงค่าร้อยละ 30 ของค่ายอด (t_{30}) และร้อยละ 90 ของค่ายอด (t_{90}) โดยใช้วิธีอินเตอร์โพลชันช่วยเพิ่มความแม่นยำ จากนั้นสามารถคำนวณเวลาหน้าคลื่นได้ จาก $T_1 = 1.67(t_{90} - t_{30})$

เก็บค่าของเวลาหน้าคลื่นไว้ในตัวแปร Tfront ในหน่วยไมโครวินาที

```

For i = 0 To tnmax

    If yn(i) <= 0.9 * ynmax Then

        yn90 = i + 1

    End If

Next

T90 = (yn90 - 1) + ((0.9 * ynmax - yn(yn90 - 1)) / (yn(yn90) - yn(yn90 - 1)))

For i = 0 To tnmax

    If yn(i) <= 0.3 * ynmax Then

        yn30 = i + 1

    End If

Next

T30 = (yn30 - 1) + ((0.3 * ynmax - yn(yn30 - 1)) / (yn(yn30) - yn(yn30 - 1)))

Dim Tfront

Tfront = (T90 - T30) / 0.6

Tfront = Tfront * dt * (1 / 0.000001)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หาเวลาที่ค่าของรูปคลื่นทดสอบลดลงเหลือร้อยละ 50 ของค่ายอด (t_{50}) จากนั้นหาเวลา

$$\text{หลังคลื่นได้จาก } T_2 = t_{50} - (t_{30} - \frac{U_{30}}{U_{90} - U_{30}} (t_{90} - t_{30}))$$

```

for i = tnmax To n - 1

    If yn(i) >= 0.5 * ynmax Then

        yn50 = i + 1

    End If

Next

T50 = (yn50 - 1) + (((0.5 * ynmax - yn(yn50 - 1)) / (yn(yn50) - yn(yn50 - 1))))

Ttail = T50 - (T30 - 0.5 * (T90 - T30))

Ttail = Ttail * dt * (1 / 0.000001)

```

เปลี่ยนที่เก็บตัวแปรใหม่ ค่ายอดของแรงดันเก็บไว้ในตัวแปร maxyy เวลาหน้าคลื่นเก็บไว้ในตัวแปร WFF เวลาหลังคลื่นเก็บไว้ในตัวแปร WTT และร้อยละส่วนพุ่งเกินเก็บไว้ในตัวแปร oove

maxyy = ynmax

WFF = Tfront

WTT = Ttail

oove = be

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. ฟังก์ชันที่เรียกใช้งานในโปรแกรมการคำนวณค่าองค์ประกอบรูปคลื่น

ฟังก์ชันหาโคแฟกเตอร์ของเมทริกซ์ ป้อนข้อมูลเมทริกซ์ที่ต้องการหาโคแฟกเตอร์ในตัวแปร matAA ตำแหน่งแถวและหลักที่ต้องการหาโคแฟกเตอร์ในตัวแปร p และ q ตามลำดับ มิติของเมทริกซ์ในตัวแปร mm จากนั้นฟังก์ชันจะคำนวณค่าโคแฟกเตอร์ออกมาและเก็บไว้ในตัวแปร Temp

```
Function getcofactor(matAA, Temp, p, q, mm)
```

```
    i = 0, j = 0
```

```
    Dim row, col
```

```
    For row = 0 To mm - 1
```

```
        For col = 0 To mm - 1
```

```
            If (row <> p And col <> q) Then
```

```
                If j < mm - 1 Then
```

```
                    Temp(i, j) = matAA(row, col)
```

```
                    j = j + 1
```

```
                End If
```

```
            If j = mm - 1 Then
```

```
                i = i + 1, j = 0
```

```
            End If
```

```
        End If
```

```
    Next
```

```
Next
```

```
End Function
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ฟังก์ชันหาดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ ป้อนข้อมูลเมทริกซ์ที่ต้องการหาดีเทอร์มิแนนต์เข้าไปในรูปตัวแปร Input1 และป้อนมิติของเมทริกซ์ในตัวแปร dimen จากนั้นฟังก์ชันจะทำการคำนวณค่าดีเทอร์มิแนนต์ออกมาในรูปของตัวแปร detv

```

Function detvalue(Input1, dimen, detv)

Dim D, sign, f, lll, h, Det, xdet, D1, D2, D3

Det = 0

D = 0

D3 = 0

xdet = 0

Dim temp2(2, 2)

If (dimen = 1) Then
    xdet = Input1(0, 0)
End If

sign = 1

If (dimen = 3) Then

    xdet = 0

    For f = 0 To dimen - 1

        xdet = xdet + (Input1(0, f) * (Input1(1, (f + 1) Mod 3) * Input1(2, (f + 2)
Mod 3) - Input1(1, (f + 2) Mod 3) * Input1(2, (f + 1) Mod 3)))

    Next

End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(ต่อ)

```

For f = 0 To dimen - 1

    Call getcofactor(Input1, temp2, 0, f, dimen)

    For lll = 0 To dimen - 2

        D = (temp2(1, (lll + 1) Mod 3) * temp2(2, (lll + 2) Mod 3))

        D1 = (temp2(1, (lll + 2) Mod 3) * temp2(2, (lll + 1) Mod 3))

        D2 = Round(D - D1, 12)

        D3 = D3 + temp2(0, lll) * D2

    Next

    Det = D3

    D3 = 0

    xdet = xdet + Det * Input1(0, f) * sign

    sign = -sign

Next

detv = xdet

End Function

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ฟังก์ชันหาเมทริกซ์แอดจอยท์ ป้อนข้อมูลเมทริกซ์ที่ต้องการหาเมทริกซ์แอดจอยท์เข้าไปในตัวแปร MatA จากนั้นฟังก์ชันจะทำการคำนวณเมทริกซ์แอดจอยท์และเก็บไว้ในตัวแปร adj

```

Function adjoint(MatA, adj)

  Dim dimen1=4, dett

  If (dimen1 = 0) Then

    adj(0, 0) = 1

  End If

  Dim sign1=1, row1, col1, aaa, bbb, temp1(2, 2)

  For row1 = 0 To dimen1 - 1
    For col1 = 0 To dimen1 - 1
      Call getcofactor(MatA, temp1, row1, col1, dimen1)
      If ((row1 + col1) Mod 2 = 0) Then
        sign1 = 1
      Else
        sign1 = -1
      End If

      Call detvalue(temp1, 3, dett)

      adj(col1, row1) = sign1 * dett

    Next

  Next

End Function

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ฟังก์ชันหาเมทริกซ์อินเวอร์ส ป้อนข้อมูลดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ที่ต้องการหาอินเวอร์สในตัวแปร DetI และเมทริกซ์ที่ต้องการหาอินเวอร์สในตัวแปร AI จากนั้นฟังก์ชันจะทำการคำนวณเมทริกซ์อินเวอร์สออกมา และเก็บไว้ในตัวแปร AO

```
Function invers(DetI, AI, AO)
```

```
Dim nn, il, jl
```

```
nn = 4
```

```
DetI = detva
```

```
If DetI = 0 Then
```

```
MsgBox "Can't find inverse"
```

```
End If
```

```
Dim AdjI(3, 3)
```

```
Call adjoint(AI, AdjI)
```

```
For il = 0 To nn - 1
```

```
For jl = 0 To nn - 1
```

```
AO(il, jl) = AdjI(il, jl) / DetI
```

```
Next
```

```
Next
```

```
End Function
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. ส่วนโปรแกรมการทำงานสำหรับหน้าจอแสดงผล

3.1 ปุ่ม OK

คำสั่งเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมและออสซิลโลสโคป

```
Private Sub OK_Click()
    Dim app As Object
    Set app =
    CreateObject("LeCroy.XStreamDSO.1")
```

คำสั่งเตรียมค่าพื้นฐานบนออสซิลโลสโคป

คำสั่งให้ออสซิลโลสโคปยอมให้โปรแกรมปรับขนาดช่องตามแนวแกนตั้งได้

```
If CH4 = True Then
    app.Acquisition.C4.VerScaleVariable = True
```

คำนวณค่าแรงดันที่ออสซิลโลสโคปอ่านได้

```
vtest1 = Abs(VolD.text / text.text)
```

คำสั่งปรับขนาดช่องตามแนวแกนตั้งของออสซิลโลสโคปมีช่องแสดงผลทั้งหมด 6 ช่องจึงปรับให้แสดงผลเพียง 5 ช่อง เพื่อป้องกันเรื่องรับข้อมูลไม่ครบ

```
app.Acquisition.C4.VerScale = (vtest1 / 5)
```

คำสั่งปรับขนาดช่องตามแนวแกนนอนของออสซิลโลสโคป ปรับไว้ที่ช่องละ 50 ไมโครวินาที

```
vers = app.Acquisition.C4.VerScale
```

```
app.Acquisition.Horizontal.HorScale = 0.00005
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในสถานศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตั้งค่าชดเชยตามแนวแกนตั้งที่ค่าลบของร้อยละ 60 ของค่ายอดของรูปคลื่นแรงดันที่
ออสซิลโลสโคปอ่านได้

ตั้งค่าชดเชยตามแนวแกนอนไว้ที่ -0.0002 และ ตั้งค่าการจับสัญญาณกระตุ้นไว้ที่ร้อยละ
10 ของค่ายอด ของรูปคลื่นแรงดันที่ออสซิลโลสโคปอ่านได้

```
If VoD.text > 0 Then
```

```
    app.Acquisition.C4.VerOffset = -vtest1 * 0.6
```

```
    app.Acquisition.Horizontal.HorOffset = -0.0002
```

```
    app.Acquisition.Trigger.C4Level = 0.1 * vtest1
```

```
Else
```

```
    app.Acquisition.C4.VerOffset = vtest1 * 0.6
```

```
    app.Acquisition.Horizontal.HorOffset = -0.0002
```

```
    app.Acquisition.Trigger.C4Level = -0.1 * vtest1
```

```
End If
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตั้งค่าตรวจจับสัญญาณกระตุ้นเพียงเป็นแบบตรวจจับครั้งเดียว

```

Elseif CH3 = True Then

    app.Acquisition.C3.VerScaleVariable = True

    vtest1 = Abs(VolD.text / text.text)

    app.Acquisition.C3.VerScale = (vtest1 / 5)

    vers = app.Acquisition.C3.VerScale

    app.Acquisition.Horizontal.HorScale = 0.00005

    If VolD.text > 0 Then

        app.Acquisition.C3.VerOffset = -vtest1 * 0.6

        app.Acquisition.Horizontal.HorOffset = -0.0002

        app.Acquisition.Trigger.C3Level = 0.1 * vtest1

    Else

        app.Acquisition.C3.VerOffset = vtest1 * 0.6

        app.Acquisition.Horizontal.HorOffset = -0.0002

        app.Acquisition.Trigger.C3Level = -0.1 * vtest1

    End If

Elseif CH2 = True Then

    app.Acquisition.C2.VerScaleVariable = True

    vtest1 = Abs(VolD.text / text.text)

    app.Acquisition.C2.VerScale = (vtest1 / 5)

    vers = app.Acquisition.C2.VerScale

    app.Acquisition.Horizontal.HorScale = 0.00005
  
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(ต่อ)

```

If VolD.text > 0 Then

    app.Acquisition.C2.VerOffset = -vtest1 * 0.6

    app.Acquisition.Horizontal.HorOffset = -0.0002

    app.Acquisition.Trigger.C2Level = 0.1 * vtest1

Else

    app.Acquisition.C2.VerOffset = vtest1 * 0.6

    app.Acquisition.Horizontal.HorOffset = -0.0002

    app.Acquisition.Trigger.C2Level = -0.1 * vtest1

End If

Else

    app.Acquisition.C1.VerScaleVariable = True

    vtest1 = Abs(VolD.text / text.text)

    app.Acquisition.C1.VerScale = (vtest1 / 5)

    vers = app.Acquisition.C1.VerScale

    app.Acquisition.Horizontal.HorScale = 0.00005

    If VolD.text > 0 Then

        app.Acquisition.C1.VerOffset = -vtest1 * 0.6

        app.Acquisition.Horizontal.HorOffset = -0.0002

        app.Acquisition.Trigger.C1Level = 0.1 * vtest1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(ต่อ)

```

Else

    app.Acquisition.C1.VerOffset = vtest1 * 0.6

    app.Acquisition.Horizontal.HorOffset = -0.0002

    app.Acquisition.Trigger.C1Level = -0.1 * vtest1

End If

End If

app.Acquisition.TriggerMode = "Single"

End Sub

```

3.2 ปุ่ม Calculate

คำสั่งเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมและออสซิลโลสโคป

```

Private Sub Calculate_Click()

    Dim app As Object

    Set app = CreateObject("LeCroy.XStreamDSO.1")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คำสั่งรับค่าข้อมูลที่ออสซิลโลสโคปบันทึกค่าได้ ประกอบไปด้วย ระยะเวลาระหว่างจุดทดสอบเก็บในรูปแบบตัวแปร HorStep จำนวนจุดทดสอบเก็บรูปแบบตัวแปร numSamples และรูปคลื่นที่บันทึกได้เก็บในตัวแปร wave

```

If CH4 = True Then

    HorStep = app.Acquisition.C4.Out.Result.HorizontalPerstep

    numSamples = app.Acquisition.C4.Out.Result.Samples

    wave = app.Acquisition.C4.Out.Result.DataArray

Elseif CH3 = True Then

    HorStep = app.Acquisition.C3.Out.Result.HorizontalPerstep

    numSamples = app.Acquisition.C3.Out.Result.Samples

    wave = app.Acquisition.C3.Out.Result.DataArray

Elseif CH2 = True Then

    HorStep = app.Acquisition.C2.Out.Result.HorizontalPerstep

    numSamples = app.Acquisition.C2.Out.Result.Samples

    wave = app.Acquisition.C2.Out.Result.DataArray

Else

    HorStep = app.Acquisition.C1.Out.Result.HorizontalPerstep

    numSamples = app.Acquisition.C1.Out.Result.Samples

    wave = app.Acquisition.C1.Out.Result.DataArray

End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เนื่องจากข้อมูลที่ออสซิลโลสโคปอ่านได้นั้นอยู่ในรูปที่ถูกลดทอนลงมาจึงต้องคูณค่าสเกลแฟกเตอร์ (text.text) กลับเข้าไปเพื่อให้ได้สัญญาณจริงที่ทดสอบและเก็บไว้ในตัวแปร wavve

```
dt = HorStep
numSamples = i
For i = 0 To numSamples - 1
    wavve(i) = wave(i) * text.text
Next
```

เรียกใช้งานฟังก์ชันการคำนวณค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ และสั่งแสดงผลค่าองค์ประกอบรูปคลื่นในช่องแสดงผลหน้าโปรแกรม

```
Call Evaluation(wavve, dt, numSamples, PVV, WWF, WWT, OOV)
WF.text = Round(WWF, 3)
WT.text = Round(WWT, 3)
PV.text = Round(PVV, 3)
OV.text = Round(OOV, 3)
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3 รูปภาพ KMITL GO

คำสั่งเชื่อมต่อโปรแกรมกับการดำเนินการทางไฟล์

```
Private Sub Image1_Click()

    Dim pr, mo, c, D, FSO, file, j

    Dim obj, obj1

    Set FSO = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
```

คำสั่งการอ่านเวลา ณ ปัจจุบัน

```
pr = Now
mo = Month(pr)
da = Day(pr)
ye = Year(pr)
```

คำสั่งสร้างไฟล์ลงใน D:\Impluse_KYK\Savetest และไฟล์ชื่อตามปีเดือนวันและจำนวนครั้งที่บันทึกของวันที่ทดสอบ

```
Set file = FSO.CreateTextFile("D:\Impluse_KYK\Savetest\" & ye &
    "_" & mo & "_" & da & "_" & o + 1 & ".txt", 2)

file.Close
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คำสั่งเปิดไฟล์ที่สร้างไปก่อนหน้านี้

```
Set obj1 = CreateObject("wscript.Shell")

Set obj = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")

Set file = obj.OpenTextFile("D:\mpluse_KYK\Savetest" & ye & "_" &
mo & "_" & da & "_" & o + 1 & ".txt", 2)
```

คำสั่งเขียนข้อมูลจำนวนจุดทดสอบ (Number of Samples) เวลาระหว่างจุดทดสอบ (Horizontal per Step) ขนานของช่องแนวแกนวาย (Vertical Scale) เวลาที่ทดสอบ (Date) เวลาค่าคลื่น เวลาหลังคลื่น ค่ายอดแรงดัน และอัตราการเกิดการแกว่ง ลงในไฟล์ที่เปิดอยู่

```
file.write "Number of Samples : " & numSamples & " points " & vbCrLf
file.write "Horizontal per Step : " & HorStep & " sec " & vbCrLf
file.write "Vertical Scale : " & vers & " vol/div " & vbCrLf
file.write "Date : " & ye & "_" & mo & "_" & da & vbCrLf
file.write "Wave Fornt : " & WF.text & " us" & vbCrLf
file.write "Wave Tail : " & WT.text & " us" & vbCrLf
file.write "Peak Voltage : " & PV.text & " kV" & vbCrLf
file.write "Overshoot Rate : " & OV.text & " %" & vbCrLf
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คำสั่งเขียนข้อมูลที่ออสซิลโลสโคปบันทึกได้ลงในไฟล์ที่เปิดอยู่

```

For j = 0 To numSamples - 1

    file.write j * HorStep & "    " & wave(j) * text.text & vbCrLf

Next

o = o + 1

file.Close

End Sub

```

3.4 ปุ่ม Select

ตั้งค่าเวลาระหว่างจุดข้อมูลเป็น 10 นาโนวินาที

```

Private Sub Select_Click()

    dt = 0.00000001

```

คำสั่งให้โปรแกรมพาไปยังหน้าต่างใหม่ซึ่งเป็นที่อยู่ของไฟล์

```

CommonDialog1.ShowOpen

```

คำสั่งเลือกที่อยู่ไฟล์ที่ต้องการทำมาวิเคราะห์และเก็บไว้ในตัวแปร Fileaa

```

Dim Fileaa

Fileaa = CommonDialog1.FileName

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คำสั่งเชื่อมต่อโปรแกรมกับการดำเนินการทางไฟล์

```
Set FSO = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
```

คำสั่งเปิดไฟล์ที่ทำการเลือกมา

```
Set oFILE = FSO.OpenTextFile(Fileaa, 1, True)
```

ทำการอ่านข้อมูลในไฟล์ที่เปิดมาและเก็บไว้ในตัวแปร wavve ส่วนจำนวนข้อมูลเก็บไว้ในตัวแปร numSamples

```
i = 0
Dim wavve(1000000)
Do Until oFILE.AtEndOfStream
    wavve(i) = oFILE.Readline
    i = i + 1
Loop
oFILE.Close
numSamples = i
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เรียกใช้งานฟังก์ชันการคำนวณค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ซึ่งแสดงผลค่า
องค์ประกอบรูปคลื่นในช่องแสดงผลหน้าโปรแกรม

```
Call Evaluation(wave, dt, numSamples, PVV, WWF, WWT, OOV)
```

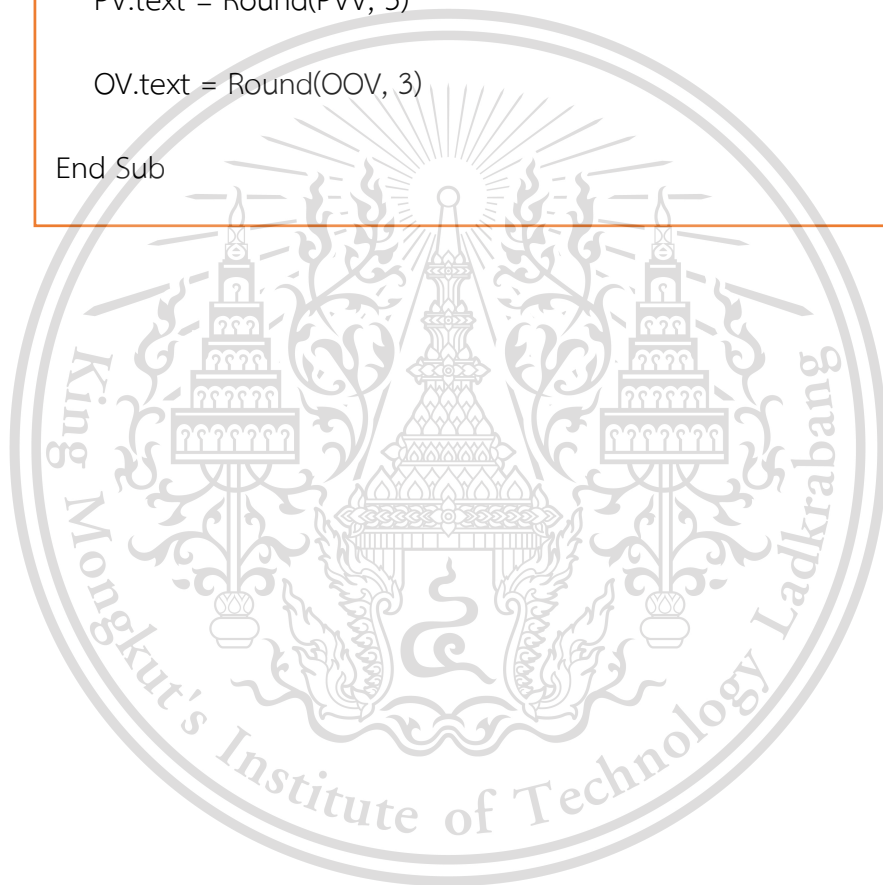
```
WF.text = Round(WWF, 3)
```

```
WT.text = Round(WWT, 3)
```

```
PV.text = Round(PVV, 3)
```

```
OV.text = Round(OOV, 3)
```

```
End Sub
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประวัติผู้จัดทำ



ชื่อ-นามสกุล นายภาณุวัฒน์ จำเริญ
 วัน เดือน ปีเกิด 27 เมษายน 2542
 ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 สถานที่ฝึกงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 หัวข้อ Autonomous car control platform



ชื่อ-นามสกุล นายภูมิ อยู่สอน
 วัน เดือน ปีเกิด 16 ธันวาคม 2541
 ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 สถานที่ฝึกงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 หัวข้อ Autonomous car control platform



ชื่อ-นามสกุล นางสาวสุธาสินี แวงโสธรณ์
 วัน เดือน ปีเกิด 31 ตุลาคม 2541
 ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 สถานที่ฝึกงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 หัวข้อ Autonomous car control platform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.