

การพัฒนาอัลกอริธึมสำหรับประมวลผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วย
โครงข่ายประสาทเทียม

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR EVALUATION OF LIGHTNING
IMPULSE VOLTAGE PARAMETERS USING NEURAL NETWORKS



กฤษฎณ์ กิจวัฒนา
KRIT KITWATTANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2564

KMITL-2021-EN-D-018-076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR EVALUATION OF LIGHTNING
IMPULSE VOLTAGE PARAMETERS USING NEURAL NETWORKS

KRIT KITWATTANA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021
KMITL-2021-EN-D-018-076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอัลกอริธึมสำหรับประมวลผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยโครงข่ายประสาทเทียม
นักศึกษา	นายกฤษณ์ กิจวัฒนา
รหัสประจำตัว	57601009
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พีรฤดี ยุทธโกวิท

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแนวทางการประเมินพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงตามมาตรฐาน IEC60060-1 [1] โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (U_2) ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) ช่วงเวลาหลังคลื่น (T_2) และ Overshoot (B_2) โครงข่ายประสาทเทียมที่มีอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบย้อนกลับ (Back-propagation learning) ถูกนำมาใช้งานเพื่อหา Base curve และพารามิเตอร์ จากข้อมูลที่ถูกเตรียมจากรูปคลื่นทดสอบ (Recorded curve) จำนวน 15 จุด ในช่วงระหว่าง 20% ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Peak voltage) ช่วงหน้าคลื่นและ 40% ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Peak voltage) ด้านหลังคลื่น โดยรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำนวน 29 รูปแบบที่ระบุไว้ตามมาตรฐาน IEC61083-2 ถูกนำมาใช้ในการเรียนรู้สำหรับการพัฒนาโครงข่ายของโมเดล และมีการนำรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มาจากทดสอบมาใช้ร่วมด้วย เพื่อตรวจสอบการประเมินผลของวิธีการที่นำเสนอ โดยมีการทดสอบทั้งการหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรง และการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแล้วนำมาสร้าง Base curve เพื่อหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อไป จากการทดสอบพบว่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ได้จากการคำนวณโดยโมเดลที่สร้างขึ้นมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนดโดยแบ่งการประมวลผลเป็น 2 แนวทางคือการหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นฟ้าผ่าโดยตรง และการหาค่าพารามิเตอร์ตามสมการแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งพบว่าทั้งสองวิธีการมีการใช้เวลาในการประมวลผลใกล้เคียงกัน โดยมีการใช้เวลาน้อยกว่าวิธีตามมาตรฐานประมาณ 10-16 เท่า เนื่องจากการคำนวณไม่มีกระบวนการทำซ้ำ

Thesis	DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR EVALUATION OF LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE PARAMETERS USING NEURAL NETWORKS
Student	Mr.KRIT KITWATTANA
Student ID.	57601009
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Peerawut Yutthagowith

ABSTRACT

This thesis presents an approach for the waveform parameter evaluation of lightning impulse voltage in high voltage tests according to the IEC standards. Such waveform parameters are composed of peak voltage (U_e), front time (T_1), time to half (T_2), and the overshoot rate (B_e). An artificial neural network with a back-propagation learning algorithm was applied to determine a base curve and its parameters from 15 points along the recorded waveform between 20% of the peak voltage on the wave front part to 40% of the peak voltage on the wave tail part. The 29 waveforms recommended by the standard were used in the training process of the development of the network model, and some experimental cases were also utilized for verification of the proposed method. The tests were performed for determining lightning impulse voltage waveform parameters of the base curve. Then, from the base curve the parameter waveforms parameters are calculated by the standard procedures. It is found that the waveform parameters evaluated by the proposed approach are in the tolerances of the standard requirements. The efficiency of the proposed method in terms of execution time is significantly higher than the standard recommended approach. The average execution time of methods is only one-sixteenth to one-tenth of the standard recommended approach. Due to that no iteration process in the proposed approach is required.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับประมวลผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วย
โครงข่ายประสาทเทียม ประสบผลสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากอาจารย์ที่
ปรึกษา อาจารย์ รศ.ดร.พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร และ รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ที่
คอยให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ ตลอดจนการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณปณณวีร์ ฉายศิริ คุณบุษยพล เพาพาน คุณนวนคุณ ไตรรัตน์ารักษ์ และผู้มี
พระคุณที่มีได้กล่าวถึงที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และแสดงความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ รวมทั้ง
กำลังใจจากเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือทำให้โครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว อันเป็นที่เคารพรักยิ่งของ
ผู้จัดทำ ซึ่งได้เลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนผู้จัดทำเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ เป็น
กำลังใจ และให้คำปรึกษาในทุก ๆ ด้านเสมอมา ผู้จัดทำระลึกในพระคุณและกราบขอบพระคุณ ณ ที่นี้

กฤษณ์ กิจวัฒนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน.....	3
1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่า.....	8
2.1.1 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า.....	9
2.1.2 ผลจากการเกิดฟ้าผ่า.....	11
2.2 เทคนิคการสร้างและการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC60060-1.....	16
2.2.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	16
2.2.2 เทคนิคการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC60060-1.....	23
2.2.3 Test data generator (TDG).....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Theory).....	27
2.3.1 การฝึกโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้เกิดความรู้จำ (Training) แบบ Levenberg-Marquardt Backpropagation Algorithm.....	28
บทที่ 3 การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า.....	31
3.1 การประมวลผลรูปคลื่นตามวิธีมาตรฐาน.....	31
3.2 การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าโดยตรง.....	33
3.2.1 การออกแบบการจัดการข้อมูลสำหรับการประมวลผล.....	33
3.2.2 การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์ค.....	34
3.3 การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นไฟฟ้า.....	38
3.3.1 การออกแบบการจัดการข้อมูลสำหรับการประมวลผล.....	39
3.3.2 การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์ค.....	39
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	43
4.1 ผลการทดสอบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าโดยตรง.....	43
4.2 ผลการทดสอบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นไฟฟ้า.....	50
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา.....	59
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	60
เอกสารอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	64
ประวัติผู้เขียน.....	126

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นมาตรฐาน.....	22
2.2 ค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	22
4.1 ระยะเวลาในการประมวลผลเพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าโดยตรง เทียบกับวิธีตามมาตรฐาน.....	49
4.2 ความเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์แรงดันอิมพัลส์ และอัตราส่วนของเวลาดำเนินการเทียบกับวิธีมาตรฐาน.....	56



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า.....	8
2.2 ภาพจำลองการเก็บประจุบนก้อนเมฆ.....	9
2.3 สตรีมเมอร์.....	10
2.4 บ้านอยู่อาศัยที่ไม่มีระบบสายล่อฟ้าและเกิดเพลิงไหม้เมื่อถูกฟ้าผ่า.....	11
2.5 ฟ้าผ่าลงบนยอดเมรุที่ไม่มีระบบสายล่อฟ้า.....	13
2.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม.....	16
2.7 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	17
2.8 Laplace transform ของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน.....	19
2.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานประกอบด้วยเอ็กซ์โพเนนเชียลสองเทอม.....	21
2.10 กราฟ k-factor.....	24
2.11 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม.....	25
2.12 หนึ่ง Neuron ที่มี i อินพุต.....	28
2.13 รูปแบบโมเดล Neural Network ทั่วไป.....	28
2.14 บล็อกไดอะแกรมการเทรนด้วย Levenberg-Marquardt algorithm.....	30
3.1 การประมวลผลรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน.....	32
3.2 จุดที่เตรียมสำหรับเป็นอินพุตเพื่อทำการประมวลผลด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์ค.....	35
3.3 โมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค.....	36
3.4 Flowchart การเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค.....	37
3.5 จุดที่เตรียมสำหรับเป็นอินพุตเพื่อทำการประมวลผลด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์ค.....	38
3.6 โมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค.....	39
3.7 Flowchart การเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค.....	40
4.1 กราฟแสดงผลการเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค 1 layers, 4 neurons.....	44
4.2 กราฟแสดงผลการเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค 1 layers, 2 neurons.....	44
4.3 ผลการประเมินจากอัลกอริทึมที่คำนวณด้วย 4 neurons เทียบกับค่าความยอมรับได้.....	45
4.4 ผลการประเมินจากอัลกอริทึมที่คำนวณด้วย 2 neurons เทียบกับค่าความยอมรับได้.....	46
4.5 กราฟแสดงผลการเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค 1 layers, 2 neurons.....	50
4.6 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันทดสอบ และรูปคลื่น Base curve ที่ประมวลผลด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์ค.....	54
4.7 ผลการประเมินจากอัลกอริทึมที่ออกแบบเทียบกับค่าความยอมรับได้.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินเสิร์จ Transient ที่เกิดจากเหตุภายนอก ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือเกิดจากการทำงานของสวิตช์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์แบบ Switching ซึ่งเมื่อเกิดเหตุส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆ ทั้งในระบบแรงสูงและแรงต่ำ โดยตามมาตรฐาน IEC60076-3 ได้มีแนวทางการทดสอบ Lightning Impulse Test เพื่อทดสอบความคงทนได้ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบส่งจ่ายแรงสูง ซึ่งเป็นจุดสำคัญที่ส่งผลต่อเสถียรภาพในการส่งจ่ายไฟฟ้า โดยในการทดสอบนอกจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ต้องใช้ในการทดสอบแล้ว ตัวประมวลค่าแรงดันที่วัดได้ก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะใช้ในการประเมินค่าต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์การทดสอบ โดยมาตรฐานการวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะถูกระบุในมาตรฐาน IEC 60060-1 [1] ในส่วนนี้การวัดผลจึงควรที่จะมีความแม่นยำ และรวดเร็วในการวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือในการทดสอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการประมวลผล โดยจะเน้นในด้านของความแม่นยำ และความรวดเร็วในการประมวลผลพารามิเตอร์ต่างๆ ประกอบด้วย ค่าแรงดันสูงสุด (Peak voltage) ช่วงเวลาน้ำคลื่น (T_1) ช่วงเวลาหลังคลื่น (T_2) และ Overshoot rate โดยในการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์จะใช้ระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมเป็นตัวสร้างสมการ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษาการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการประมวลผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลทั้งในด้านความแม่นยำ และความเร็วให้สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC60060-1 ซึ่งแนะนำให้ใช้ระเบียบวิธี Non-linear least square โดยหลักการจำเป็นต้องคำนวณซ้ำหลายครั้งทำให้ใช้ระยะเวลาในการประมวลผลมาก ในการนี้การสร้างโมเดลที่ทำให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นจะสามารถประมวลผล และแสดงรูปคลื่นในการวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วทั้งในด้านการวัดแบบคร่าวๆที่ไม่มีการแสดงรูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณ หรือการวัดแบบละเอียดที่มีการแสดงรูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณก็ตาม ซึ่งจะเป็นการพัฒนา

ระบบการวัดในห้องทดสอบร่วมกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และอุปกรณ์อื่นๆภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ในด้านของการวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อีกทั้งยังส่งเสริมด้านการเรียน การสอน และการวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงให้มีการพัฒนาต่อยอดในการศึกษาวิจัยการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการประมวลผลด้านอื่นๆ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การคำนวณรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่านั้นในมาตรฐาน IEC60060-1 [1, 2] ได้แนะนำให้ใช้ระเบียบวิธี Non-linear least square ในการคำนวณค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ได้จากการวัดในรูปแบบต่าง ๆ ตามมาตรฐาน IEC 61083-2 [3] โดยมีการกำหนดรูปคลื่นตามรูปแบบมาตรฐาน (TDG) 29 กรณี ซึ่งในการศึกษาพบว่ายังคงมีรูปแบบสมการเชิงคณิตศาสตร์อีกหลายรูปแบบที่สามารถนำมาคำนวณหาแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ เนื่องด้วยตามมาตรฐานได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ไว้ ได้แก่ ค่าแรงดันสูงสุด (Peak voltage) ระยะเวลาหน้าคลื่น (T_1) ระยะเวลาหลังคลื่น (T_2) และ Overshoot rate ซึ่งสามารถหาสมการเชิงคณิตศาสตร์ในรูปแบบอื่น ๆ เพื่อนำมาคำนวณรูปคลื่นในรูปแบบต่างๆ ให้มีค่าผลลัพธ์ใกล้เคียงหรือเท่ากับวิธีที่มาตรฐานกำหนดไว้ได้ อีกทั้งยังมีโอกาสที่จะสามารถสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการประมวลผลที่มีความเร็วสูงกว่าได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการประมวลผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเดิมตามวิธีที่แนะนำตามมาตรฐาน จะมีขั้นตอนในการคำนวณเป็นไปตามบทที่ 2 ซึ่งโดยหลักจะแบ่งได้ดังนี้

1. ทำการบันทึกข้อมูลรูปคลื่นแรงดันจากดิจิตอลออสซิลอโคป ซึ่งจะเรียกว่า Recorded curve
2. ทำการประมวลผลด้วยวิธี Non-Linear least square เพื่อทำการสร้าง Base curve
3. ทำการหา Residual curve จากการนำค่า Recorded curve มาลบด้วย Base curve
4. ทำการกรอง Residual curve ด้วย k-factor filter
5. นำ Residual curve ที่ผ่านการกรอง ด้วย k-factor filter มารวมกับ Base curve ซึ่งจะเรียกว่า Test voltage curve
6. นำ Test voltage curve มาทำการวัดค่าแรงดันสูงสุด ค่าแรงดันสูงสุด (peak voltage) ระยะเวลาหน้าคลื่น (T_1) ระยะเวลาหางคลื่น (T_2) และ ส่วนฟุ้งเกิน (overshoot rate)

โดยในส่วนที่ใช้เวลาสูงสุด และเป็นหัวใจของการประมวลผลคือส่วนของการเตรียมรูปคลื่นสำหรับการประมวลผล และส่วนของการสร้าง Base curve ซึ่งอาจส่งผลในด้านของความแม่นยำ และ

ความเร็วในการประมวลผล เนื่องจากรูปคลื่นที่ได้บันทึกมาจากการทดสอบ (Recorded curve) มีความละเอียดสูงทำให้จำเป็นต้องปรับรูปคลื่นให้เหมาะสมสำหรับการประมวลผลที่แม่นยำและใช้เวลาน้อยที่สุด

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตการวิจัยของการพัฒนาระบบอัลกอริทึมเพื่อทำการประมวลผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเริ่มจากการศึกษาวิธีประมวลผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยวิธีตามมาตรฐาน ซึ่งระบุให้ใช้การจัดเตรียมรูปคลื่นต่าง ๆ และประมวลผลรูปคลื่นด้วยวิธี Non-linear least square ต่อมาทำการศึกษาระบบการประมวลผลด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) โดยได้ทำการเตรียมค่าการประมวลผล 2 รูปแบบ คือ การเตรียมอินพุตเป็นค่าความชันของข้อมูลในจุดต่าง ๆ สำหรับประเมินผลออกมาเป็นค่าพารามิเตอร์สุดท้ายโดยตรง และอีกแนวทางคือการเตรียมค่าอินพุตเป็นจุด ซึ่งจะทำให้การประมวลผลเป็นพารามิเตอร์ขององค์ประกอบสมการแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า หลักจากนั้นทำการสร้าง Base curve จากค่าพารามิเตอร์ที่ประมวลผลได้ เพื่อทำการวัดผลการประเมินด้วยวิธีตามมาตรฐาน ซึ่งผลการทดสอบทั้งสองวิธีจะนำไปเปรียบเทียบกับวิธีตามมาตรฐาน ทั้งในด้านความแม่นยำ และความเร็วในการประมวลผล

1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

เริ่มต้นด้วยการศึกษามาตรฐานการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC60060-1 เพื่อทราบขั้นตอนในการคำนวณตามระเบียบวิธีมาตรฐาน หลังจากนั้นทำการศึกษาการประมวลผลด้วยระเบียบวิธี Non-linear least square ตามที่มาตรฐานแนะนำให้ใช้ในการประมวลผล โดยในงานวิจัยจะทำการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ตามระเบียบวิธีที่มาตรฐานกำหนดก่อน เพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าไว้ใช้สำหรับอ้างอิงในการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ด้วยวิธีอื่น หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นจากมาตรฐานแล้ว ทำการศึกษาระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยจะเน้นในด้านของความแม่นยำ และความเร็วในการประมวลผล โดยในรูปแบบแรกจะทำการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่หาค่าพารามิเตอร์สุดท้ายของรูปคลื่นแรงอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรง และวิธีที่ 2 จะทำการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อนำมาสร้าง Base curve และดำเนินการตามระเบียบวิธีที่มาตรฐานกำหนด โดยสาระสำคัญของวิทยาสตรณิพนธ์นี้จะแบ่งได้ 5 บทได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และประโยชน์ที่ได้คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้ ทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่า การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC60060-1 เทคนิคการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC61083-2 และ ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network theory)

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนวิธีในการประมวลผลรูปคลื่นตามวิธีมาตรฐาน โดยการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ตามที่แนะนำในมาตรฐาน IEC60060-1 การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลหารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรง และการออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยในการออกแบบทั้งสองจะมีการออกแบบอยู่ 2 ส่วนคือการออกแบบการจัดการข้อมูลสำหรับการประมวลผล และการออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบโครงข่ายประสาทเทียม

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรง และผลการทดสอบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่ได้ทำการออกแบบไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจะมีผลของการทดสอบเป็นด้านความแม่นยำของการประมวลผล และความเร็วในการประมวลผล ซึ่งจะอ้างอิงกับผลของการประมวลผลด้วยวิธีตามมาตรฐาน และค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ระบุตามมาตรฐาน

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัยประกอบด้วย การสรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2010 มาตรฐาน IEC60060-1 “High-voltage test techniques” หัวข้อที่ 7 “Tests with lightning-impulse voltage” [1] ได้นำเสนอแนวทางการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยระบุถึงลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทดสอบทดสอบมาตรฐานไว้ที่ $1.2/50 \mu s$ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้คือ ขนาดแรงดันทดสอบไม่เกิน $\pm 3\%$, ช่วงเวลาหน้าคลื่นไม่เกิน $\pm 30\%$, ช่วงเวลาหลังคลื่นไม่เกิน $\pm 20\%$ และ Overshoot rate หากไม่มีการระบุโดยคณะกรรมการเทคนิคไม่ควรคลาดเคลื่อนเกิน $\pm 10\%$ ซึ่งรายละเอียดการหารูปคลื่นแรงดันทดสอบ (Test voltage curve) จะถูกระบุอยู่ในหัวข้อ 2.2

ในปี 2011 หนังสือโครงข่ายประสาทเทียมเชิงปฏิบัติสำหรับงานวิศวกรรมไฟฟ้า ในบทที่ 8 “การปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักแบบย้อนกลับและรูปแบบการเรียนรู้” [4] เขียนโดย รศ. ดร. สุรินทร์ คำฝอย

กล่าวถึงการออกแบบและการเรียนรู้ของระบบ Neural Network โดยใช้วิธีการเรียนรู้ (Train) ด้วยหลักการ Backpropagation ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการอยู่ 4 ขั้นตอนคือ 1. จำลองค่า 2. Feed-Forward และ 3. Backpropagation 4. ทำการประเมินซ้ำจนได้ค่าที่ต่ำกว่าค่าความเบี่ยงเบนที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นหลักการประเมินค่าแบบย้อนกลับเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และตัวปรับค่า (Bias) เพื่อให้ค่าเอาต์พุตมีค่าตรงตามค่าที่เป็นเป้าหมาย (Target)

ในปี 2013 มาตรฐาน IEC 61083-2 “Instruments and software used for measurement in high-voltage and high-current tests” [3] หัวข้อที่ 4 “Test data generator (TDG)” ได้นำเสนอโปรแกรมตัวสร้างข้อมูลทดสอบ (TDG) ที่ใช้สร้างข้อมูลจำลองเพื่อเป็นอินพุตในการออกแบบอัลกอริทึมสำหรับคำนวณ หรือวัดคุณลักษณะของรูปคลื่นทดสอบในแต่ละรูปแบบที่มาตรฐานได้จำแนกไว้ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานที่ระบุไว้ในมาตรฐานคือ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของค่าแรงดันสูงสุดต้องไม่เกิน $\pm 0.10\%$, ค่าความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลาหน้าคลื่นต้องไม่เกิน $\pm 2\%$, ค่าความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลาหลังคลื่นต้องไม่เกิน $\pm 1.0\%$ และค่าความคลาดเคลื่อนของ Overshoot rate ต้องไม่เกิน $\pm 1.0\%$ ซึ่งรายละเอียดของรูปคลื่นในแต่ละรูปแบบแสดงดังภาคผนวก ข.

ในปี 2015 บทความวิชาการเรื่อง “Fast Curve Fitting Algorithm for Parameter Evaluation in Lightning Impulse Test Technique” [5] เขียนโดย N. Pattanadech และ P. Yutthagowith ได้นำเสนอเทคนิคการหา Base curve ด้วย Numerical integration และ Linear least square method ซึ่งทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของสมการแรงดัน และกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้อย่างรวดเร็วกว่าวิธีตามที่มาตรฐาน IEC 60060-1 กำหนด เนื่องจากไม่มีการวนซ้ำในการประมวลผล ซึ่งในรายละเอียดของการคำนวณจะมีการแบ่งค่าน้ำหนัก (Weight) ในแต่ละช่วงคลื่น ซึ่งมีเหตุผลมาจาก Oscillation ในบริเวณด้านหน้าคลื่นที่ส่งผลให้เกิดการผิดพลาดในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสมการอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยค่าน้ำหนักจะมี 2 ชุด สำหรับอิมพัลส์แรงดันฟ้าผ่า และอิมพัลส์กระแสฟ้าผ่า

ในปี 2016 บทความวิชาการเรื่อง “Improved Least-Square Prony Analysis Technique for Parameter Evaluation of Lightning Impulse Voltage and Current” [6] เขียนโดย P. Yutthagowith และ N. Pattanadech ได้นำเสนอเทคนิคการหา Base curve ด้วย Least-square Prony analysis ซึ่งใช้ Double Integration ร่วมกับ Linear least-square regression ซึ่งทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของสมการแรงดัน และกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้อย่างรวดเร็วกว่าวิธีตามที่มาตรฐาน IEC 60060-1 กำหนด เนื่องจากไม่มีการวนซ้ำในการประมวลผล โดยในวิธีการนี้มีการใช้ค่าน้ำหนัก (Weight) เข้ามาช่วยในการคำนวณเนื่องจากอัตรา Overshoot ที่มีค่าสูง (มากกว่า 10%) ส่งผลให้เกิดการผิดพลาดในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสมการอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยทั้งอิมพัลส์แรงดันฟ้าผ่า และอิมพัลส์กระแสฟ้าผ่าใช้สมการค่าน้ำหนัก (Weight) ร่วมกันได้

1.8 ประโยชน์ที่ได้คาดว่าจะได้รับ

ได้โมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการประมวลผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีความแม่นยำ และความเร็วสูง เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีต้นทุนต่ำ และยังสามารถพัฒนาต่อยอดในการสร้างอุปกรณ์ในการตรวจวัดที่มีความเร็วสูง และมีความแม่นยำใกล้เคียงวิธีตามมาตรฐาน อีกทั้งความรู้ด้านสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมยังสามารถดัดแปลงใช้สร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการประมวลผลหาค่าในรูปแบบอื่น ๆ อีกได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงต่อไปในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การเกิดสภาวะชั่วคราวในลักษณะของอิมพัลส์ (Impulse Transient) มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse voltage) กระแสดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge current) การปล่อยประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge) เป็นต้น แรงดันเกินในสภาวะชั่วคราว (Transient voltage) ที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบส่งจ่าย หรือเกิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งความรุนแรงที่เกิดจะขึ้นต่ออุปกรณ์ในระบบ โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของกระแสในสภาวะชั่วคราว สำหรับอิมพัลส์ฟ้าผ่าอาจส่งผลการกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในทันทีหรือทำให้เกิดการเบรกดาวน์ (Breakdown) ทันที ดังนั้นอุปกรณ์ที่มีการใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ จึงถูกกำหนดให้ทำการทดสอบโดยมาตรฐาน IEC 60060-1 เพื่อให้สามารถทนต่อผลกระทบจากแรงดันเกินจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้ โดยอุปกรณ์ที่จะต้องทำการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าส่วนใหญ่จะเป็นอุปกรณ์ที่มีโอกาสได้รับผลกระทบทั้งโดยตรง และโดยอ้อมจากปรากฏการณ์แรงดันเกิน เช่น หม้อแปลง ลูกถ้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง ฯลฯ โดยพิกัดแรงดันทดสอบถูกระบุไว้ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 ซึ่งสิ่งสำคัญของการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าคือระบบประมวลผลที่ใช้ในการประเมินผลจากการทดสอบ ซึ่งตามมาตรฐานได้ทำการระบุให้ทำการคำนวณรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบด้วย Non-linear least square เพื่อหาพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อนำมาสร้าง Base curve และดำเนินการตามวิธีที่ถูกระบุในมาตรฐาน IEC60060-1 ซึ่งเป็นการคำนวณแบบซ้ำ ๆ เพื่อให้ค่าที่คำนวณมีความเรียบ และใกล้เคียงกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ไม่มีการเกิด Oscillation เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (U_e) ช่วงเวลาน้ำคลื่น (T_1) ช่วงเวลาหลังคลื่น (T_2) และ Overshoot (B_e) สำหรับประเมินผลการทดสอบ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในพัฒนาการวัดค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยสามารถแบ่งเป็นทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่า เทคนิคการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า การวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 ทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่ Benjamin Franklin และลูกชาย Thomas Folger ได้พิสูจน์ให้เห็นชัดเจน ตั้งแต่ปี ค.ศ 1752 ที่เมืองฟิลาเดลเฟีย สหรัฐอเมริกาซึ่งกล่าวว่า“ฟ้าผ่าก็คือสปาร์กไฟฟ้า” (“Lightning is electric spark”) อันเป็นผลของการเกิดดีสชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ นับเป็นการเริ่มต้นของการศึกษาเชิงวิทยาศาสตร์ เพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับฟ้าผ่า การค้นพบนี้ Benjamin ได้พัฒนาหลักการป้องกันฟ้าผ่าด้วยเสาสล่อฟ้าเรียกว่า Franklin rod มาจนถึงทุกวันนี้ [7]

การสะสมประจุในก้อนเมฆมีปริมาณมาก ทำให้ก้อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูง 10 เมกะโวลต์ และเกิดดีสชาร์จระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก เป็นวาบไฟฟ้า (ground flash) หรือระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือภายในก้อนเมฆเดียวกันเป็น ฟ้าแลบ (air discharge) ฟ้าผ่าและฟ้าแลบมีโอกาสเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังรูปที่ 2.1 [3] โดยธรรมชาติปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่จะเป็นฟ้าแลบ แต่การศึกษาวิจัยของมนุษย์ส่วนมากจะให้ความสนใจเกี่ยวกับฟ้าผ่ามากกว่า



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

สิ่งต่าง ๆ ทั้งหลายในโลกนี้จะมีทั้งคุณและโทษอยู่ในตัว แต่ฟ้าผ่าเท่าที่ทราบดูเหมือนจะมีแต่โทษ เนื่องจากลำฟ้าผ่ามีความร้อนสูง โดยเฉพาะที่แกนลำฟ้าผ่า อุณหภูมิสูงถึง 30,000 องศาเซลเซียส จึงทำให้เกิดเพลิงไหม้แก่สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าได้ จากการวัดค่ากระแสฟ้าผ่าก็มีค่านับเป็นหลายสิบเป็นหลายร้อยกิโลแอมป์ [4] ซึ่งกระแสขนาดดังกล่าวเมื่อเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นและรวดเร็วย่อมทำให้เกิดแรงกลบิต

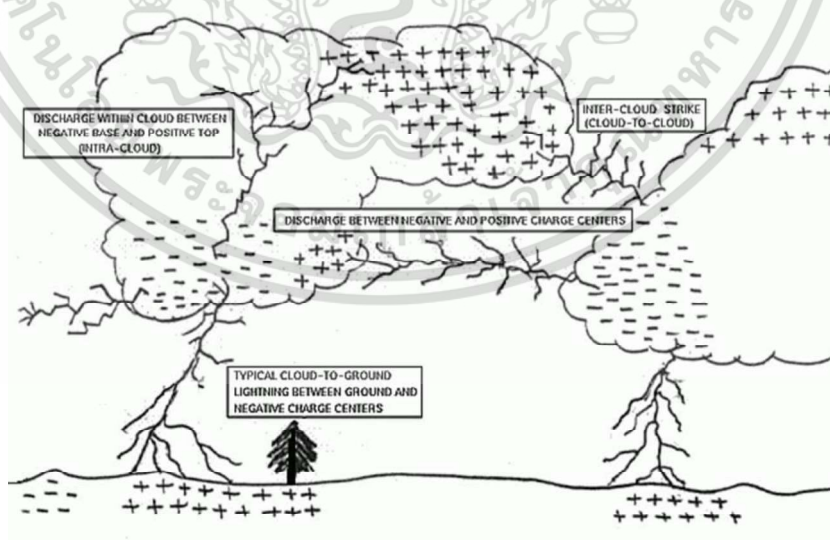
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแรงระเบิดได้มากมาย ฉะนั้น เมื่อฟ้าผ่าที่ใดก็มักจะทำให้สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าเกิดระเบิดเสียหาย นอกจากนั้นแล้วการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าผ่ามีอัตราสูง จึงทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในระบบวงจรไฟฟ้าเป็นแรงดันเสิร์จ และเป็นแรงดันเกินวิ่งไปตามสายไฟเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้า ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อแรงดันทรานเซียนต์ ส่วนกระแสฟ้าผ่าที่ไหลลงสู่ดิน ก็เป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตอยู่ในบริเวณนั้น อันเนื่องมาจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสได้

แม้จะทราบว่าฟ้าผ่านั้นทำให้เกิดความพินาศเสียหาย และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต แต่มนุษย์ก็ไม่อาจห้ามการเกิดฟ้าผ่าได้ ในทางปฏิบัติ จะทำได้ก็เพียงป้องกันมิให้เกิดอันตรายอันเนื่องจากผลของฟ้าผ่า โดยตั้งระบบป้องกันตามมาตรฐาน แต่การจะออกแบบระบบป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่าให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัยนั้นจำเป็นต้องทราบและมีความเข้าใจดีเกี่ยวกับกระบวนการเกิดฟ้าผ่า ลักษณะ สมบัติ และพฤติกรรมของฟ้าผ่า ซึ่งจะเป็นข้อมูลขั้นพื้นฐานสำคัญ ที่จะช่วยให้สามารถป้องกันได้เหมาะสมและมีความปลอดภัย

2.1.1 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า

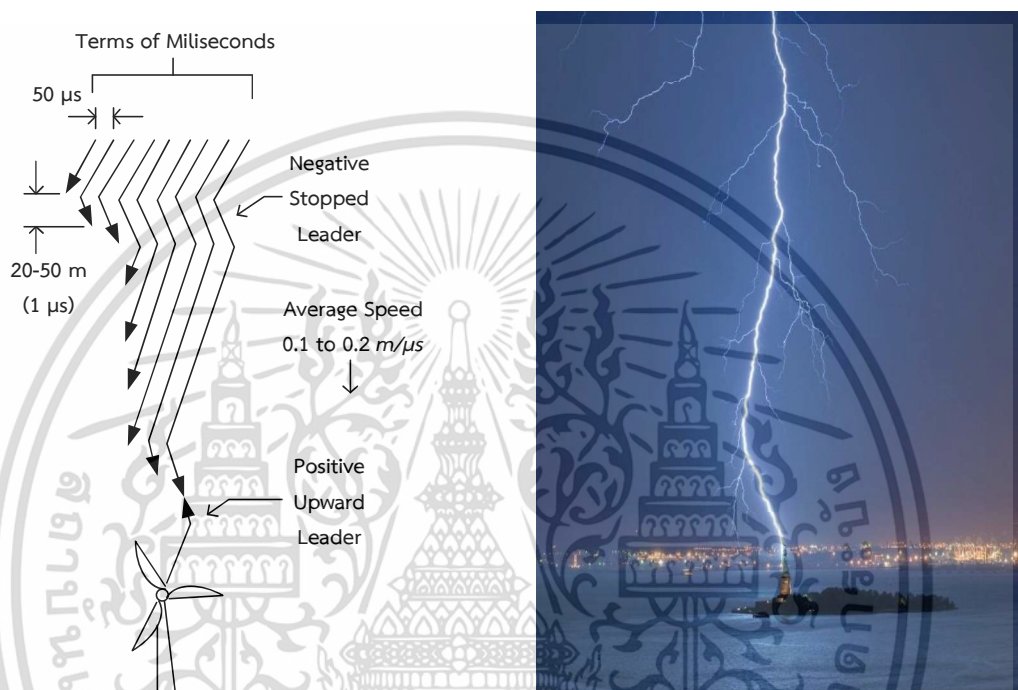
โดยทั่วไปฟ้าผ่าจะเริ่มต้นในก้อนเมฆที่มีประจุสะสมที่ระดับความสูง 1.50 - 10 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก ซึ่งมีการกระจายของประจุ ซึ่งที่ฐานของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบ ส่วนบนของก้อนเมฆเป็นประจุบวก ดังในรูปที่ 2.2 จุดเริ่มต้นของการเกิดฟ้าผ่า ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่กลุ่มประจุลบ ที่ฐานของก้อนเมฆ เพราะอยู่ใกล้พื้นโลก เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าถึงจุดวิกฤต E_c ในก้อนเมฆประมาณ 10 kV/cm



รูปที่ 2.2 ภาพจำลองการเก็บประจุบนก้อนเมฆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิด ไอออนในเซชันของอากาศจะเกิดเป็นลีดเดอร์ (Leader) หรือหัวนำร่อง มีทิศทางลงสู่พื้นโลกในลักษณะจังหวะก้าว (step leader) แบบสุ่มๆ ดังภาพสเก็ทในรูปที่ 2.3 (a) มีช่วงก้าวตั้งแต่ 3 เมตรถึง 200 เมตร เฉลี่ยช่วงก้าวประมาณ 50 เมตร ในทิศทางที่แตกตัวง่ายที่สุด ความเร็ว 0.1 ถึง 0.2 m/ μ s แต่ละจังหวะที่ก้าว จะหยุดพัก 10 ถึง 50 μ s ก่อนที่จะกระโดดก้าวต่อไป



(a) ภาพสเก็ทการขยายตัวของหัวนำร่อง

(b) สตรีมเมอร์วิ่งขึ้นจากพื้นโลก

รูปที่ 2.3 สตรีมเมอร์

เมื่อหัวนำร่องเข้ามาใกล้พื้นโลก จะทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำที่พื้นโลก ที่ยอดแหลมของอาคารสิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ เป็นต้น เกิดไอออนในเซชันเป็นสตรีมเมอร์ มีความยาว 1 ถึง 100 เมตร (เฉลี่ย 20 เมตร) วิ่งเข้าหาหัวนำร่องเดินทางมาพบกันจะเกิดเป็นลำฟ้าผ่า (main stroke) ดังภาพสเก็ทในรูปที่ 2.3 (b) มีแสงจ้าจากพื้นโลกวิ่งไปหาหัวนำร่องด้วยความเร็วสูงกว่า 50×10^3 km/s ตามแนวที่หัวนำร่องกรุยทางลงมา การเคลื่อนที่ของประจุในลำฟ้าผ่า ก็คือกระแสฟ้าผ่านั่นเอง

ระยะก้าวสุดท้ายที่หัวนำร่องกระโดดเข้าหาสตรีมเมอร์ เรียกว่า ระยะฟ้าผ่า (striking distance) มีระยะทางประมาณ 20-50 เมตร

2.1.2 ผลจากการเกิดฟ้าผ่า

ผลจากการเกิดฟ้าผ่าที่ก่อให้เกิดความเสียหายหรืออันตราย อาจแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ความร้อนเป็นผลให้เกิดเพลิงไหม้แก่สิ่งที่ถูกผ่า
2. แรงกลบิตหรือแรงระเบิดเป็นผลให้สิ่งที่ถูกผ่าพังทลายลงได้
3. ผลทางไฟฟ้า เกิดแรงดันเกินในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นผลเสียแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบเดิมเกิดขึ้นรบกวนต่อระบบสื่อสารเกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเกิดแรงดันช่วงก้าวเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

2.1.2.1 ผลทางความร้อน

เมื่อเกิดฟ้าผ่าจะมีลำแสงจ้าของฟ้าผ่า แขนงลำมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเซนติเมตร และมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงขนาดนี้ย่อมก่อให้เกิดเพลิงไหม้แก่วัสดุติดไฟได้ถึงแม้ว่าช่วงเวลาการไหลของกระแสจะสั้นมากก็ตาม ในรูปที่ 2.4 แสดงถึงบ้านอยู่อาศัยที่ไม่มีระบบสายล่อฟ้าและเกิดเพลิงไหม้เมื่อถูกฟ้าผ่า



รูปที่ 2.4 บ้านอยู่อาศัยที่ไม่มีระบบสายล่อฟ้าและเกิดเพลิงไหม้เมื่อถูกฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีเกิดฟ้าผ่าลงบนโลหะ มักจะมีร่องรอยของการถูกฟ้าผ่า ณ ตำแหน่งที่ฟ้า ทั้งนี้เพราะกระแสไฟฟ้าผ่า เมื่อแปลงเป็นพลังงานความร้อน มีค่ามากพอที่ทำให้โลหะนั้นหลอมละลายได้ พลังงานไฟฟ้าผ่าคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$W = U \int_0^{\infty} i dt = U_{A-K} Q \quad (2.1)$$

เมื่อ U_{A-K} คือ แรงดันตกคร่อมแอมโตนด-แคโทดตรงจุดที่ฟ้าผ่ากระทบ

Q คือ ประจุไฟฟ้าเป็นคูลอมป์ (หรือแอมป์-วินาที)

ถ้าทราบชนิดโลหะ ก็จะสามารถคำนวณปริมาตรของโลหะที่หลอมละลายได้ เช่น กระแสฟ้าผ่า 1 แอมป์-วินาที (1 คูลอมป์) จะหลอม

ทองแดงได้ 5.4 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

อลูมิเนียมได้ 12 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

เหล็กได้ 4.4 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

แสดงว่า ถึงโลหะแผ่นบางทั้งหลาย มีโอกาสถูกฟ้าผ่าหลอมละลายทะลุตรงจุดที่ฟ้าผ่ากระทบได้ ถ้าความหนาไม่พอ ถ้าเป็นถึงเก็บเชื้อเพลิง เช่น ถังน้ำมันก็ย่อมทำให้เกิดการระเบิดถึงไม่ขึ้นได้ ดังที่เคยปรากฏในข่าวต่าง ๆ

ด้วยเหตุผลเดียวกัน การออกแบบระบบสายล่อฟ้า ซึ่งต้องใช้เสาต่อฟ้าเป็นตัวล่อ หรือรับให้ฟ้าผ่าลง และมีสายตัวนำลงดิน (down conductor) เป็นทางนำกระแสฟ้าผ่าให้ลงสู่ดินโดยเร็วที่สุด โดยไม่ทำให้สายตัวนำลงดินหลอมละลาย หรืออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จนเป็นเหตุให้เกิดเพลิงไหม้ นั่นคือสายตัวนำลงดินจะต้องมีพื้นที่ภาคตัดขวางขนาดมากพอ

2.1.2.2 ผลทางแรงกล

ผลของฟ้าผ่านอกจากจะเกิดความร้อนแล้ว ในขณะเดียวกันยังเกิดแรงกลระเบิด 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำแล้ว ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นแก่ตัวนำนั้น เป็นแรงดึงหรือแรงผลัก ขนาดแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสกำลังสอง (i^2) เป็นสัดส่วนกลับกับระยะห่างระหว่างสายตัวนำทั้งสอง d นั่นคือแรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยความยาวของตัวนำ จะคำนวณได้จากสมการ 2.2

$$(Fdt)' = \frac{10^{-7}}{d} \int i^2 dt \quad \frac{N \text{ sec}}{m} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานฟ้าผ่าลงตั้งฉากกับแนวของตัวนำจะเกิดแรงดันอิมพัลส์กระทำต่อตัวนำในแนวต่อตรงออกไปของลำฟ้าผ่า ซึ่งอาจคำนวณได้จาก

$$\int F dt' = 10^{-7} \int i^2 dt \quad N \text{ sec} \quad (2.3)$$

เมื่อ $i^2 dt$ เป็น $A^2 \text{ sec}$

เช่นเดียวกัน กระแสฟ้าผ่าที่ไหลในตัวนำที่เป็นบ่วง หรือวงแหวน จะเกิดแรงทำให้บ่วงนั้นขยายยืดอกกว้างออก ส่วนแรงกลแบบที่ 2 เป็นแรงระเบิด เป็นแรงระเบิด เนื่องจากลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมาก ทำให้อากาศรอบ ๆ ลำฟ้าผ่าขยายตัวออกอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดขึ้นแรงดันในย่านความเร็วเหนือเสียงแพร่กระจายออกไปรอบลำฟ้าผ่า เกิดเสียงดังสนั่นหวั่นไหว ที่เรียกว่าฟ้าร้อง

ในกรณีฟ้าผ่าลงบนวัสดุฉนวนไฟฟ้า กระแสฟ้าผ่าจะวิ่งไปตามแนวที่มีความต้านทานน้อยที่สุด ถ้ามีความชื้นอยู่ในวัสดุนั้น น้ำหรือความชื้นจะเปลี่ยนเป็นไอ เกิดความดัน อันอาจทำให้เกิดระเบิดได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.5 ฟ้าผ่าลงบนยอดเมรุ ซึ่งไม่มีสายล่อฟ้าที่ถูกต้อง ความชื้นที่ยอดเมรุทำให้เกิดระเบิดแตกร้าวตามจุดที่มีความชื้น



รูปที่ 2.5 ฟ้าผ่าลงบนยอดเมรุที่ไม่มีระบบสายล่อฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 ผลทางไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่ามีหลายลักษณะ คือ

2.1.2.3.1 การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference, EMI)

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่า ประการแรกก็คือ เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำ ค่าแรงดันเหนี่ยวนำสูงพอจะทำให้เกิด สปาร์คได้

2.1.2.3.2 แรงดันสปาร์คด้านข้าง

ถ้ากระแสไฟฟ้า i ไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ L และมีความต้านทานของดิน R_e จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ และความต้านทาน ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta U = R_e i + L \frac{di}{dt} \quad (2.4)$$

โดยที่ di/dt คือ ความชันของกระแสฟ้าผ่า

ค่าความต้านทานของรากสายดิน หรือความเหนี่ยวนำของสายตัวนำลงดินมีค่าสูง จะทำให้ศักย์ไฟฟ้า ΔU มีค่าสูงมาก พอที่จะทำให้เกิดสปาร์คด้านข้าง หรือกระโดดเข้าหาส่วนที่ต่อลงดินอย่างดี ซึ่งการเกิดสปาร์คด้านข้างนี้ อาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ ถ้ามีสิ่งที่เป็นเชื้อเพลิงอยู่ในบริเวณนั้น

2.1.2.3.3 แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยตรง ย่อมทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่ง คือ ถ้าฟ้าผ่าเปรียบเสมือนเป็นต้นกำเนิดของตัวจ่ายกระแส เมื่อมีกระแสฟ้าผ่า i วิ่งบนสายส่งซึ่งมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ (Z_w) จะเกิดแรงดันสูงเป็นคลื่นจร วิ่งไปบนสายส่งทั้งสองทางของจุดที่ฟ้าผ่าลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\Delta U = I Z_w / 2$ แรงดันสูงคลื่นจรนี้ เมื่อวิ่งไปถึงจุดที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่ออยู่ เช่นหม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เหล่านั้นได้

สายดินที่ซึ่งอยู่เหนือสายส่งกำลัง ทำหน้าที่เป็นสายล่อฟ้า ป้องกันไม่ให้เกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังโดยตรง เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายดิน ถ้าหากตัวนำลงดิน หรือเสาไฟฟ้ามีค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานของรากสายดินมีค่าสูง ย่อมทำให้เกิดแรงดันเกินที่เป็นไปตามสมการ (2.4) อาจมีค่าสูงพอที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวบนพวงลูกถ้วยฉนวน ที่ใช้ยึดหรือรองรับสายไฟได้ เรียกว่า เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back flashover) เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น อาจทำให้เกิดการเจาะทะลุบนลูกถ้วยฉนวน เกิดลัดวงจรลงดิน เกิดผิวดพร่องขึ้นในระบบ อันเป็นผลกระทบต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

2.1.2.3.4 แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ

แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในลักษณะที่กล่าวข้างต้น อาจเกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำได้เช่นกัน แรงดันดังกล่าวนี้ อาจมีค่าไม่สูงเหมือนเช่นที่เกิดในระบบสายส่งกำลังแรงสูง แต่ก็มีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในบ้าน ภายในอาคารสำนักงาน หรือโรงงาน เพราะอุปกรณ์แรงต่ำเหล่านี้ การฉนวนมีค่าต่ำไม่อาจทนแรงดันเกินที่มีค่าเป็นสิบ ๆ กิโลโวลต์ได้ และถ้ายังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ยิ่งมีความไวต่อแรงดันเกินเป็นอย่างยิ่ง ย่อมก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เหล่านี้ได้

2.1.2.3.5 อันตรายจากฟ้าผ่าที่แก่คนโดยตรง

โดยธรรมชาติแล้ว ฟ้าจะผ่าลงสิ่งที่อยู่สูงเด่นกว่าสิ่งอื่น เช่น สิ่งก่อสร้างหรืออาคารสูง ต้นไม้สูงเด่น หรือแม้แต่กระท่อมปลายนาที่ไม่มีต้นไม้ หรือสิ่งอื่นในบริเวณใกล้เคียงที่สูงกว่า หรือคนที่ยืนในที่โล่งแจ้ง อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแก่คนที่อยู่นอกอาคารบ้านเรือนนั้น มีโอกาสเป็นไปได้ถ้าหากไปยืนเด่นในที่โล่งแจ้ง เช่น ท้องทุ่งนา สนามบริเวณกว้างปราศจากต้นไม้ ในแม่น้ำกว้างใหญ่ ในทะเล หรืออยู่ในเส้นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าได้สะดวก เช่น ยืนพิงต้นไม้สูงเด่นที่ถูกฟ้าผ่า หรือหลบฝนอยู่ใต้ต้นไม้สูงเด่น หรือต้นเตี้ยกลางทุ่งนา ซึ่งมักจะถูกฟ้าผ่าได้ง่าย เกิดอันตรายแก่คนที่หลบใกล้โคนต้นไม้ ทั้งนี้เนื่องจากฟ้าผ่าลงต้นไม้ กระแสฟ้าผ่าไหลลงตามต้นไม้ลงสู่ดินนั้น ทำให้ต้นไม้มีศักย์ไฟฟ้าสูงมากพอ จึงเกิดสปาร์คผ่านอากาศเข้าหาคนได้

2.1.2.3.6 อันตรายจากแรงดันช่วงก๊าวและแรงดันสัมผัส

ผลของฟ้าผ่าที่มีอันตรายต่อคนและสัตว์ นอกเหนือจากถูกฟ้าผ่าโดยตรงแล้ว ในทางอ้อมยังอาจได้รับอันตรายจาก แรงดันช่วงก๊าว และแรงดันสัมผัส อันเป็นผลมาจากกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่พื้นดิน ซึ่งมีความต้านทาน การออกแบบระบบรากสายดินที่ดีและถูกต้อง จะต้องคำนึงถึงการป้องกันอันตรายแรงดันช่วงก๊าว และแรงดันสัมผัสสองประการนี้แก่คนและสัตว์

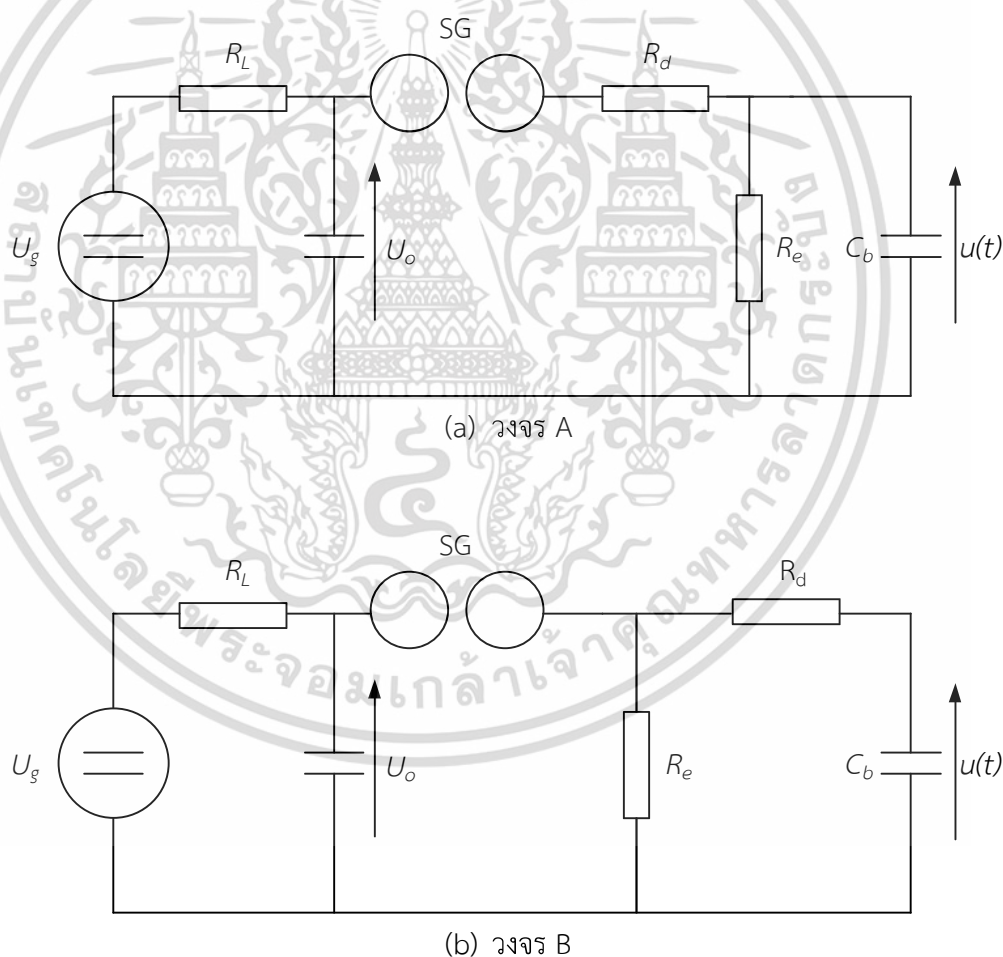
เมื่อกระแสไหลลงสู่ดิน แผ่กระจายออกไปในดิน ซึ่งมีความต้านทาน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่าง 2 จุดบนพื้นดิน โดยที่ 2 จุดนั้นมีระยะห่างเท่ากับช่วงก๊าวของคน เกิดความต่างศักย์ระหว่างเท้าซ้ายกับเท้าขวาในขณะที่ก้าวเดิน กรณีคนจะคิดเป็น 1 เมตร หรือระหว่างเท้าหน้ากับเท้าหลังของสัตว์ เรียกว่าแรงดันช่วงก๊าว ส่วนแรงดันสัมผัส หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ หรือโครงสร้างที่กระแสไหลผ่านลงไปสู่รากสายดิน ที่คนมีโอกาสสัมผัสถึงกับดินที่ยืนอยู่ และแรงดันระหว่างเท้าหน้ากับเท้าหลังของสัตว์ แรงดันช่วงก๊าวและแรงดันสัมผัสจะเป็นอันตรายแก่คนและสัตว์หรือไม่ ก็ขึ้นอยู่กับแรงดันช่วงก๊าวหรือแรงดันสัมผัส นั้น ทำให้กระแสไหลผ่านร่างกายเกินขีดกระแสอันตรายหรือไม่

จากรูปที่ 2.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะถูกประเมินตามมาตรฐานโดยใช้ค่า แรงดันสูงสุด T_1 , T_2 และ Overshoot rate เป็นเกณฑ์ โดยค่ามาตรฐานของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานคือ

- ช่วงเวลาหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ คือจะต้องอยู่ในช่วง 0.84 ถึง $1.56 \mu\text{s}$
- ช่วงเวลาหลังคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20\%$ คือจะต้องอยู่ในช่วง 40 ถึง $60 \mu\text{s}$
- ค่ายอดแรงดัน U_m ผิดพลาดได้ไม่เกิน $\pm 3\%$ ของค่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
- Overshoot rate ผิดพลาดได้ไม่เกิน $\pm 1\%$

2.1.3.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามี 2 แบบดังในรูป 2-7 (a) และ (b)



รูปที่ 2.7 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

U_g คือ แรงดันอินพุต

U_o คือ แรงดันอัดประจุ

C_s คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

C_b คือ ตัวเก็บประจุโหลด

R_L คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

R_d คือ ความต้านทานหน่วง

R_e คือ ความต้านทานปล่อยประจุ

$U(t)$ คือ แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรผันตามเวลา

SG คือ สปาร์คแกป

จากรูปที่ 2.7 U_g เป็นแรงดันกระแสตรงสำหรับชาร์จกระแสไปยัง C_s เพื่อให้เกิดแรงดัน U_o โดยผ่าน R_L ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความเร็วในการอัดกระแส โดยระดับแรงดันที่ต้องการจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ BIL หรือ BSL ตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งระดับแบ่งการอัดประจุจะถูกจำกัดด้วยสปาร์คแกป SG ซึ่งปรับค่าได้ด้วยการเพิ่มหรือลดระยะห่าง นอกจากนี้สปาร์คแกป SG จะมีส่วนของ Trigger ที่ทำหน้าที่ในการปล่อยประจุขอ C_s ให้กับโหลดโดยเมื่อมีการส่งสัญญาณให้ Trigger ทำงาน ประจุจะไหลไปยัง R_d และ C_b ซึ่งความเร็วของการไหลของประจุที่เกิดขึ้นจะเป็นส่วนของหน้าคลื่น T_1 และเมื่อประจุถูกถ่ายให้ C_b จนเต็มแล้ว ประจุจะดิสชาร์จผ่าน R_e ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดเวลาในการคายประจุ R_e จึงมีหน้าที่ในการควบคุมเวลาหลังคลื่น T_2

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ด้านวัสดุทดสอบๆ \hat{U} จะมีค่าแรงดันน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ U_o เนื่องจากประจุกระจายให้กับ C_s และ C_b ดังนั้นอัตราส่วนระหว่าง \hat{U} และ U_o จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ โดยอัตราส่วนนี้เรียกว่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

$$\eta = \frac{\hat{U}}{U_o} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (2.5)$$

ดังนั้นเพื่อให้วงจรมีประสิทธิภาพสูงควรเลือก C_s ให้มีค่าสูงกว่า C_b มาก ๆ และเพื่อให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีพลังงานมากพอ สามารถสร้างลูกคลื่นได้ตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดคือ T_1 และ T_2 อยู่ในเกณฑ์ และมี oscillation ไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด (น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์) ในทางปฏิบัติจะให้ C_s มีค่ามากกว่า C_b อย่างน้อย 10 เท่า

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ประกอบด้วย

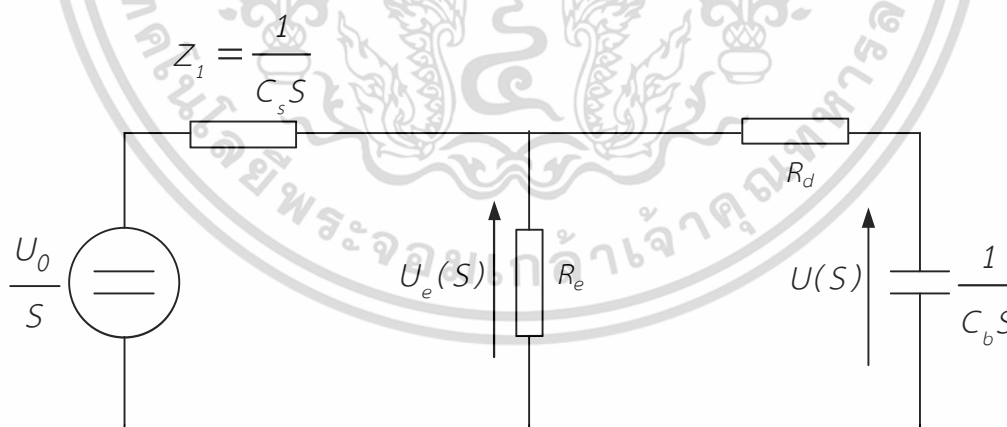
- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด U_n
- แรงดันอัดประจุรวม U_0
- ค่าความจุไฟฟ้ารวม C_s
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ W_e
- อัตราการติสซาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่า หรือแบบสวิตชิง

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ W_e เป็นลักษณะสำคัญประการหนึ่ง ที่จะต้องกำหนด ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบๆ C_s แรงดันอัดประจุ U_0 คำนวณได้ดังสมการ 2.6

$$W_e = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \quad (2.6)$$

2.1.3.3 การแปลงแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลา

จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์วงจร B ในรูป 2.7 (b) เมื่อประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_s ด้วยแรงดันอัดประจุ U_0 และเกิดการสปาร์ค ที่สปาร์คแกป SG จะทำให้ C_s ต่อกับวงจรปรับรูปคลื่น การวิเคราะห์ที่ใช้ Laplace Transform เขียนวงจรสร้างแรงดันได้ดังรูป 2.8 [7]



รูปที่ 2.8 Laplace transform ของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน

จากวงจรในรูปที่ 2.8 ค่าแรงดันคร่อมจะเขียนได้ว่า

$$U_e(S) = \frac{U_0}{S} \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2.7)$$

เมื่อ

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

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

ฉะนั้น

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

แรงดันที่จ่ายออกที่โหลดคิดจาก $U_e(S)$ ตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์จะได้

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

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

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

เขียนในรูปแบบง่าย ๆ ดังนี้

$$U(S) = \frac{U_0}{K} \frac{1}{S^2 + aS + b} = \frac{U_0}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left(\frac{1}{(S - \alpha_1)} - \frac{1}{(S - \alpha_2)} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$a = \frac{R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_s C_b}$$

$$b = \frac{1}{R_d R_e C_s C_b}$$

$$K = R_d C_b$$

α_1, α_2 เป็นค่ารากที่สองของสมการ $S^2 + aS + b = 0$

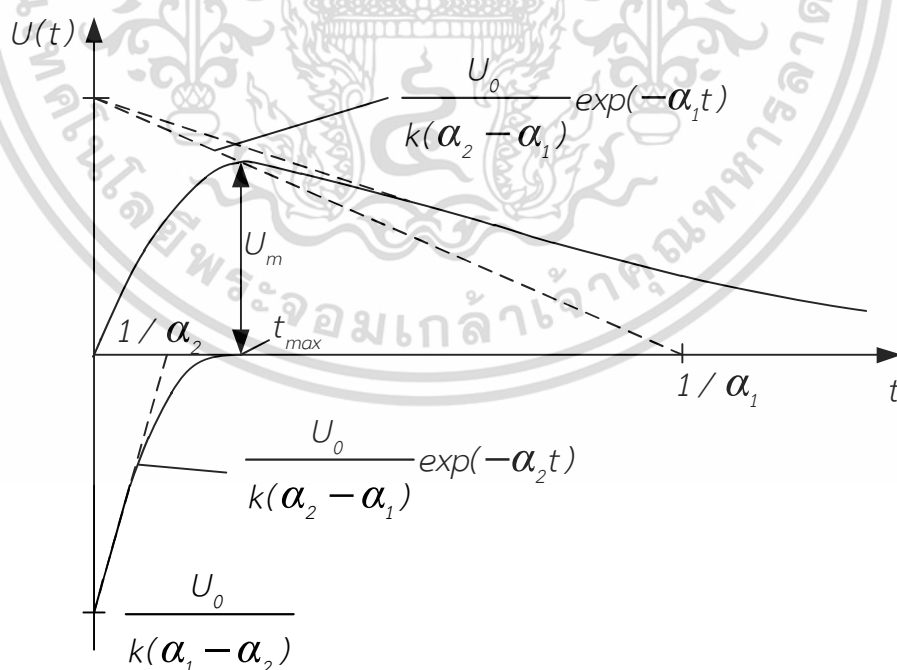
นั่นคือ

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4b}}{2}$$

จึงได้ค่าแรงดันในส่วนของเวลาคือ

$$U(t) = \frac{U_0}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)] \quad (2.8)$$

จากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของเวลาประกอบด้วยเทอมเอกซ์โพเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าเวลาคงที่ (time constant) เท่ากับ $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานประกอบด้วยเอ็กซ์โพเนนเชียลสองเทอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามนิยามของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานที่กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 และ T_2 ตามลำดับ มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1/T_2 อันเป็นตัวแสดงถึงรูปลักษณะของลูกคลื่น ค่า T_1 และ T_2 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_1 = \frac{k_2}{\alpha_2} \quad (2.9)$$

$$T_2 = \frac{k_1}{\alpha_1} \quad (2.10)$$

ค่า k_1 และ k_2 เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับลูกคลื่น เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับลูกคลื่นดัง แสดงในตารางที่ 2.1 ตารางที่ 2.1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นมาตรฐาน [7]

T_1/T_2	k_1	k_2	$1/\alpha_1$ (μs)	$1/\alpha_2$ (μs)
1.2/5	1.44	1.49	3.47	0.805
1.2/50	0.73	2.96	68.5	0.405
1.2/200	0.70	3.15	286	0.381
250/2500	0.87	2.41	2875	104.0

2.1.3.4 การคำนวณหาค่าเวลาของลูกคลื่น T_1 และ T_2

ในกรณีที่ทราบค่าอุปกรณ์ต่างๆของวงจรอิมพัลส์ ถ้าจำเป็นต้องทราบค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงหางคลื่น อาจคำนวณค่าโดยประมาณได้จากค่า k_1 และ k_2 ดังนี้ [7]

ตารางที่ 2.2 ค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

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

การคำนวณที่กล่าวแล้วข้างต้นถือว่าวงจรที่ใช้คำนวณไม่มีความเหนี่ยวนำ ในทางปฏิบัติรูปคลื่นที่ได้มักจะแตกต่างไปจากค่าทฤษฎี โดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่น และค่ายอดของแรงดัน ทั้งนี้เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรมีความเหนี่ยวนำ ซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทำให้เกิดออกซิเลชันได้ เพื่อขจัดคลื่นระลอกซ้อนจึงจำเป็นต้องใส่ความต้านทานหน่วง R_d การพิจารณาให้ความเหนี่ยวนำต่ออันดับกับความต้านทาน R_d และสมมติว่าผลของ R_e มีน้อย ($R_e = \infty$) ความต้านทาน R_d ที่ใส่เข้าไปจะต้องมีค่ามากกว่าค่าวิกฤตคือ

$$R_d \geq 2 \sqrt{L \frac{(C_b + C_s)}{C_b C_s}} \quad (2.11)$$

2.2.2 เทคนิคการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60060-1

2.2.2.1 นิยามการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า [8-9]

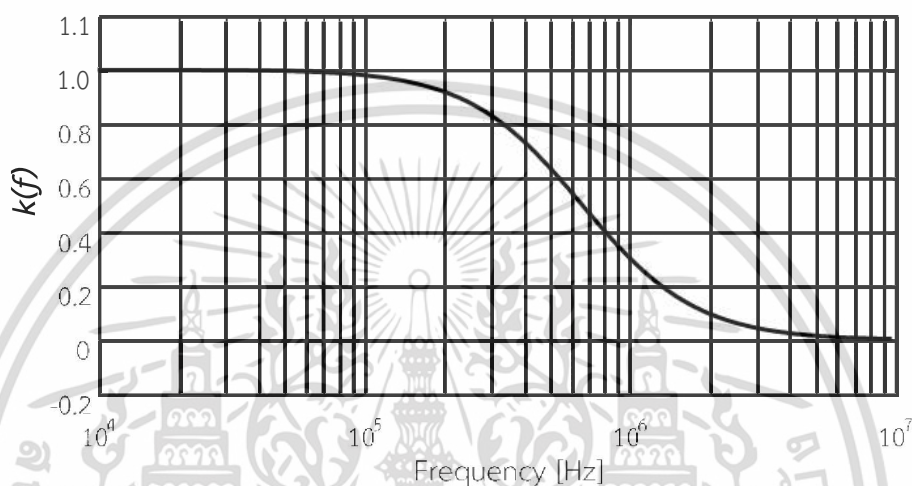
- แรงดันอิมพัลส์ คือแรงดันอิมพัลส์ที่ถูกใช้จะมีรูปร่างคือการมีลักษณะแรงดันเพิ่มอย่างรวดเร็วและลดลงไปจนมีค่าเป็นศูนย์
- แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า คือแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่นน้อยกว่า 20 μ s
- แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม คือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ไม่มีการถูกขัดจังหวะด้วยการหยุดชะงักจากการคายประจุ
 - Overshoot คือการเพิ่มขึ้นของขนาดของอิมพัลส์แรงดัน เนื่องจากการกระเพื่อมของการเกิด Oscillation ที่จุด Peak ที่มีสาเหตุจากวงจร โดย Oscillation ดังกล่าว (ความถี่ระหว่าง 0.1 MHz ถึง 2 MHz) เป็นสาเหตุจากความเหนี่ยวนำในวงจร และบางครั้งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในวงจรขนาดใหญ่ หรือการทดสอบกับตัววัสดุทดสอบที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ (L) ทฤษฎีสำหรับการประมวลผล Overshoot rate มีระบุไว้ในภาคผนวก ข.
 - รูปคลื่นที่บันทึกได้ (Recorded curve) คือกราฟหรือข้อมูลดิจิทัลที่เป็นตัวแทนของข้อมูลทดสอบของแรงดันอิมพัลส์
 - Base Level คือระดับของการบันทึกค่าของระบบวัดอิมพัลส์เมื่อมีการจ่ายอินพุตไว้ที่ศูนย์ในขณะที่ทำการบันทึกค่า
 - Base curve คือการประมาณค่าของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ไม่มีการซ้อนทับของ Oscillation [10]
 - Residual curve คือความแตกต่างระหว่าง Recorded curve และ Base curve
 - Extreme value (U_e) คือสูงสุดของ Recorded Curve ที่วัดได้จาก Base level ในฐานเดียวกันที่มีการจ่ายอิมพัลส์
 - Base curve Maximum (U_b) คือค่าสูงสุดของ Base Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Test voltage function คือฟังก์ชันของขนาดและกับความถี่ ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นตัวแทนของการตอบสนองของฉนวนไปยังอิมพัลส์ร่วมกับ overshoot แสดงดังสมการ

$$k(f) = \frac{1}{(1 + 2.2f^2)} \quad (2.12)$$

เมื่อ f คือความถี่ในหน่วย MHz ดังรูปที่ 2.10 [12]



รูปที่ 2.10 กราฟ k-factor [11-14]

- Test voltage curve คือผลรวมของ Base Curve และ Residual curve ที่ถูกกรองโดยฟังก์ชัน หรือ k-factor filter แล้ว

- Value of the test voltage (U_T) คือค่า Maximum ของ Test voltage surge ที่วัดได้จาก Base level

- ขนาด Overshoot คือความแตกต่างระหว่าง Extreme Value และ Recorded Curve และค่าสูงสุดของ Base Curve

- อัตราส่วนของขนาด Overshoot คืออัตราส่วนของขนาด Overshoot ต่อค่า Extreme value แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์

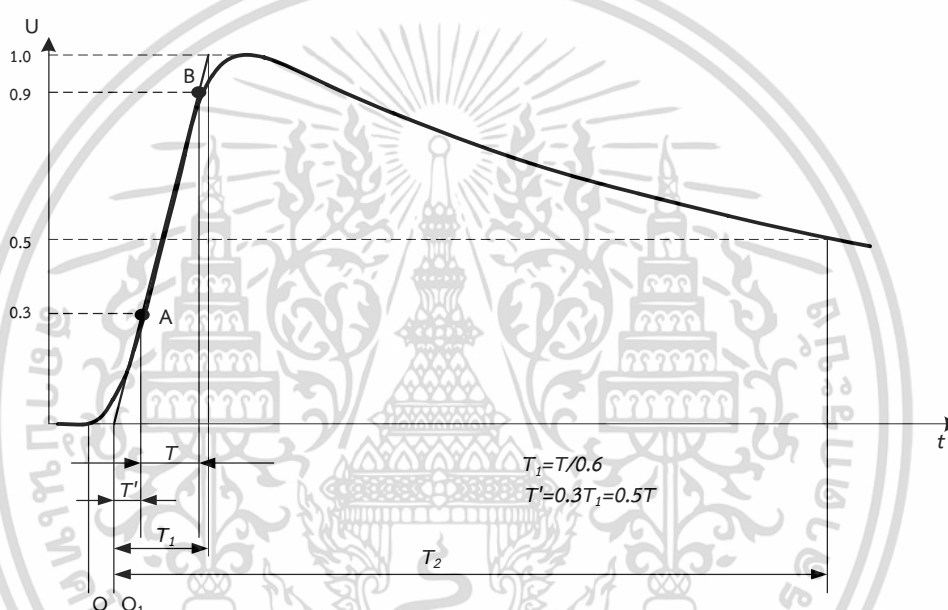
- เวลาค้นคืน T_1 คือพารามิเตอร์เสมือนที่ถูกกำหนดเป็น $1/0.6$ คูณช่วงเวลา T ระหว่างเวลาเริ่มต้นเมื่ออิมพัลส์มีค่า 30 เปอร์เซ็นต์และ 90 เปอร์เซ็นต์ ของ Peak value บน Test voltage curve (จุด A และจุด B ตามรูปที่ 2.11)

- จุดเริ่มต้นเสมือน (Virtual origin) (O_1) คือจุดเริ่มต้นเสมือนที่มีค่าเริ่มต้น ซึ่งหาได้จากเส้นตรงจากจุด A และจุด B ไปตัดที่แกนเวลา โดยเวลาจะคิดเป็น $0.3 T_1$

- อัตราการเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย (Average rate of rise) คือค่าความชันของกราฟเส้นตรงที่หามาจาก Records curve โดยใช้ทุกจุดระหว่างที่ 30 เปอร์เซ็นต์ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของ Extreme value level และมักจะแสดงในหน่วย kV/ μ s

- เวลาค่าสูงสุด (Peak time) คือ Extreme value (U_e) ทหารด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย (Average rate of rise)

- เวลาหลังคลื่น (T_2) คือพารามิเตอร์เสมือน กำหนดด้วยช่วงเวลาระหว่างจุดกำเนิดเสมือน (O_1) และจุดที่ Test voltage curve มีการลดลงถึงครึ่งหนึ่ง (ตามรูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.11 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

2.2.2.2. วิธีการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60060-1

การประมวลผลรูปคลื่นตามวิธีมาตรฐานจะทำตามลำดับดังนี้

1. ทำการตัดหน้าคลื่นที่บันทึกได้ (Recorded curve) ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันสูงสุดและตัดหลังคลื่นที่ 40 เปอร์เซ็นต์หรือน้อยกว่าของค่าแรงดันสูงสุดออก

2. นำรูปคลื่นที่ได้จากการตัดหน้าคลื่นและหลังคลื่นแล้วเข้าสู่การ Fitting ด้วย Double exponential function ตามสมการที่ 1 โดยมีพารามิเตอร์ 4 ตัวแปรได้แก่ A, B, α และ β โดยพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมวลผล จะนำมาสร้าง Base curve ซึ่งจะสามารถหาค่า Overshoot rate ได้ด้วยสมการที่ 2.14

$$f(t) = C(e^{-\alpha(t-t_d)} - e^{-\beta(t-t_d)}) \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(t) = Ae^{-\alpha t} + Be^{-\beta t} \quad (2.14)$$

เมื่อ $f(t)$ เป็นฟังก์ชันแรงดัน, t คือเวลา t_0 คือเวลาเริ่มต้น

3 หาค่า Residual curve ด้วยการนำ Recorded curve มาลบด้วย Base Curve ที่ถูกสร้างขึ้น หลังจากนั้นนำค่า Residual curve มาผ่าน k-factor filter ดังสมการที่ 2.15

$$k(f) = \frac{1}{(1 + 2.2f^2)} \quad (2.15)$$

4 Residual curve ที่ถูก filter แล้วจะถูกนำมารวมกับ Base Curve ซึ่งจะเรียกว่า Test voltage curve

2.3.3 Test data generator (TDG) [3]

2.3.2.1 หลักการ

TDG คือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างข้อมูลอ้างอิงดิจิทัล เป็นตัวแทนของรูปคลื่นอิมพัลส์สังเคราะห์ และรูปคลื่นอิมพัลส์ที่บันทึกได้ การอ้างอิงเหล่านี้ควรดำเนินการโดยซอฟต์แวร์ภายใต้การทดสอบ และพารามิเตอร์ถูกประมวลผลจากการดำเนินการทางข้อมูล ซึ่งควรอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ในภาคผนวก ข โดยประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์สามารถตรวจสอบได้

2.3.2.2 รูปแบบข้อมูล

ไฟล์ข้อมูลอ้างอิงที่ถูกสร้างโดย TDG จำลองข้อมูลดิบ ซึ่งไฟล์ข้อมูลอ้างอิงจะถูกเขียนเป็น 2 คอลัมน์ในรูปแบบ ASCII ค่าที่ได้จะอยู่ในเทอมของวินาที และโวลต์ หรือแอมแปร์ ถ้ารูปแบบข้อมูลหรือระยะที่คาดหวังโดยโปรแกรมภายใต้การทดสอบไม่สอดคล้องกับรูปแบบข้อมูลที่ต้องการใช้ จะต้องแปลงข้อมูลให้เหมาะสมก่อนทำการทดสอบ

2.3.2.3 ขนาดและข้อจำกัดที่ยอมรับได้สำหรับพารามิเตอร์ของอิมพัลส์อ้างอิง

การทดสอบ round-robin ถูกจัดเตรียมขึ้น ซึ่งหลายห้องแลปสามารถที่จะคำนวณค่าของพารามิเตอร์ของอิมพัลส์อ้างอิงเองได้ ค่าเฉลี่ยทางสถิติจากการทดสอบ round-robin ถูกนำมาเป็นค่าอ้างอิงของพารามิเตอร์ ข้อกำหนดของค่าลิมิตที่ยอมรับได้ถูกกำหนดตามความต้องการของการใช้งาน และค่าพารามิเตอร์อิมพัลส์อ้างอิงเหล่านี้ ถูกระบุไว้ดังตารางค่าแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LI) อ้างอิง และค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ดังแสดงในภาคผนวก ข.

2.3.2.4 การทดสอบโปรแกรม

TDG ถูกออกแบบเพื่อเตรียมไฟล์ข้อมูลจำลอง แบบดิจิทัลสำหรับโปรแกรมทดสอบที่นำเสนอนี้ ถูกใช้คำนวณพารามิเตอร์ที่ถูกระบุใน IEC60060-1, IEC60060-3 และ IEC62745

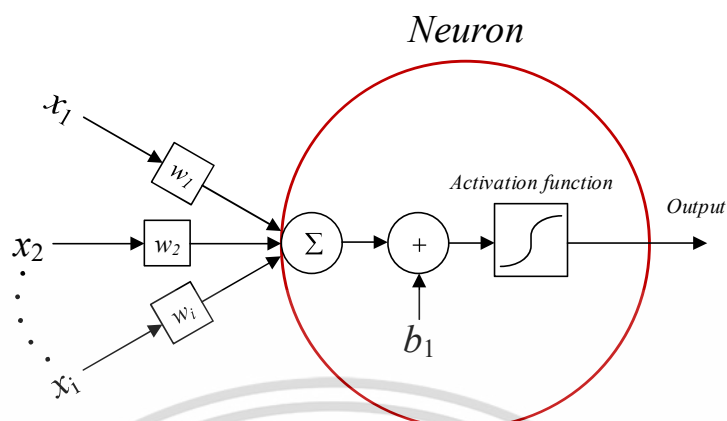
อิมพัลส์ใน TDG ถูกจำแนกเป็น 6 กลุ่ม ตามชนิดของอิมพัลส์ดังนี้

LI	อิมพัลส์แรงดันฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม
LIC	หน้าหรือหลังคลื่นตัดของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า
SI	สวิตชิงอิมพัลส์
IC	อิมพัลส์กระแส
OLI	Oscillation Lightning Impulse
OSI	Oscillation Switching Impulse

โดยข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลในส่วนของอิมพัลส์แรงดันฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (LI) ซึ่งรายละเอียดแสดงดังภาคผนวกที่ ข.

2.3 ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Theory) [4]

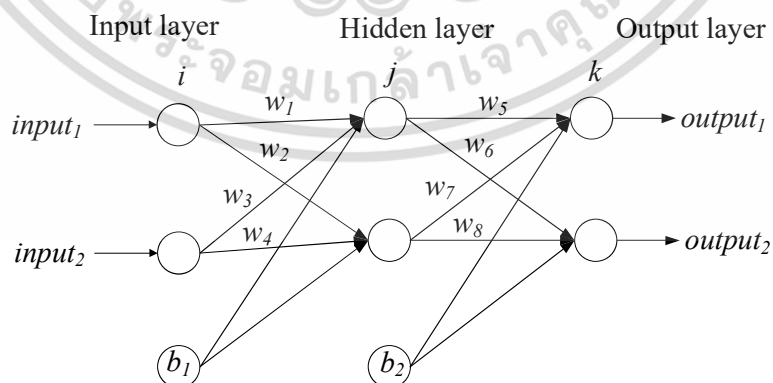
โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) เป็นการรวมการคำนวณแบบ nonlinear หลายๆ อิลิเมนต์มารวมกันเป็นโนด (Node) โดยมีการเชื่อมโยงกันของข้อมูลด้วย Weight และ Bias ของ Network Node รับค่าอินพุต เพื่อทำการ Perform ผลบวกของ Weight และ Applies ไปยัง function (ใช้ Tansig Type) และรับค่าเอาต์พุตออกมา หลังจากนั้นส่งค่าเอาต์พุต ไปยัง Node อื่น เพื่อเรียนรู้ (Learning) และจำค่า (Recall) ในเฟสของการสอน (Training) ซึ่งจะเป็นการวนซ้ำเพื่อปรับค่า Weight และค่า Bias ให้เหมาะสมกับค่าเอาต์พุต ที่ถูกกำหนดไว้ โดยสรุปแล้ว Network จะเรียนรู้จากปัญหาในช่วง Phase จำค่า และ สร้างอินพุตใหม่ เพื่อปรับค่าสุดท้ายให้มีผลที่เหมาะสม โครงข่ายประสาทเทียมมีการแก้ไขปัญหาโดยทำงานแทน Algorithm ที่ถูกสร้างขึ้นมา ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) มีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้ในด้านที่ต้องการแนวทางการคิดคำนวณใหม่ การสร้าง Algorithm ที่มีการคำนวณรวดเร็ว หรือการทำนายในระบบต่าง ๆ ซึ่งมีรูปร่างตามรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 หนึ่ง Neuron ที่มี i อินพุต

2.3.1 การฝึกโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้เกิดความรู้จำ (Training) แบบ Levenberg-Marquardt Backpropagation Algorithm [4][17]

Backpropagation algorithm (BP) เป็นอัลกอริทึมการเรียนรู้ (Training) แบบ Perception หลายชั้น (Artificial neuron network) ซึ่งในการออกแบบ Neural Network โดยทั่วไปในขั้นต้นจะทำการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และตัวปรับค่า (Bias) ด้วยค่าใดๆขึ้นมาเพื่อใช้จำลอง (Simulation) ผลลัพธ์ขึ้นมา ซึ่งผลที่ได้มาจะมีค่าต่างจากผลลัพธ์จริง ในการดำเนินการในลำดับต่อไปจึงเป็นการปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ด้วยวิธีการต่าง ๆ ซึ่ง Backpropagation algorithm (BP) ก็เป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงค่าดังกล่าว โดยในงานวิจัยฉบับนี้ใช้ฟังก์ชัน trainlm (Levenberg-Marquardt backpropagation) ในโปรแกรม MATLAB เป็นฟังก์ชันสำหรับเทรนอัลกอริทึมเป็นหลัก โดยมีหลักการดังนี้



รูปที่ 2.13 รูปแบบโมเดล Neural Network ทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชั้นตอนที่ 1 จำลองค่า

1.1 สุ่มค่าน้ำหนัก (Weight) ให้กับส่วนนำเข้าของแต่ละเซลล์ (Neuron) ซึ่งค่าน้ำหนักที่สุ่มได้อาจมีค่าอยู่ในช่วง $[-1.0, 1.0]$ หรือ $[-0.5, 0.5]$ สามารถเปลี่ยนแปลงได้หลังจากการคำนวณหรือการฝึกแล้ว

1.2 กำหนดตัวปรับค่า (Bias) กำหนดเป็นค่าเริ่มต้นในชั้นตอนแรก ซึ่งอาจมีค่าเท่ากับ 1 หรืออาจทำการสุ่มขึ้นมา สามารถเปลี่ยนแปลงได้หลังจากการคำนวณหรือการฝึกแล้ว

ตัวอย่างเช่น $Weight = \text{random}(-0.5 \text{ to } 0.5)$;

$Bias = 1$; หรือ $bias = \text{random}(-1.0, 1.0)$;

1.3 นำข้อมูลเข้าไปในโครงข่ายผ่านทางชั้นนำเข้า (Input layer)

2. ชั้นตอนที่ 2 Feed-Forward

2.1 คำนวณค่านำเข้า (Input) แต่ค่าส่งออก (Output) ในแต่ละชั้น (Layer)

$Output_i = Input_i$ // output of input layer.

$Input = \sum_i (Weight_{ij} \times Output_i) + Bias$;

$Output_j = \frac{1}{1 + e^{-Input}}$ // output of hidden layer.

$Input_k = \sum_j (Weight_{jk} \times Output_j) + Bias_k$

$Output_k = \frac{1}{1 + e^{-Input_k}}$ // output of output layer.

2.2 คำนวณค่าคลาดเคลื่อนในแต่ละชั้น (Layer) โดยคำนวณที่ชั้นส่งออกก่อนจากนั้นจึงคำนวณชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนสามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่คำนวณได้กับเป้าหมาย (Target Value) ที่ตั้งไว้

$Error_{Total} = 1 / 2 \sum (Target - Output_k)^2$ // error of output layer. (SSE)

$Error_{Total} = 1 / 2 \sum (e)^2$

3. ชั้นตอนที่ 3 Levenberg-Marquardt Backpropagation (BP)

ทำการปรับค่าน้ำหนักใหม่จากค่าคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้

3.1 ทำการอัปเดตค่าปรับค่าน้ำหนัก (Weight) ด้วยสมการที่ 2.15

$$Weight_{x+1} = Weight_x - (J_x^T J_x + \mu I)^{-1} J_x e_x \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ e คือ Error vector

I คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix)

J คือ Jacobian matrix

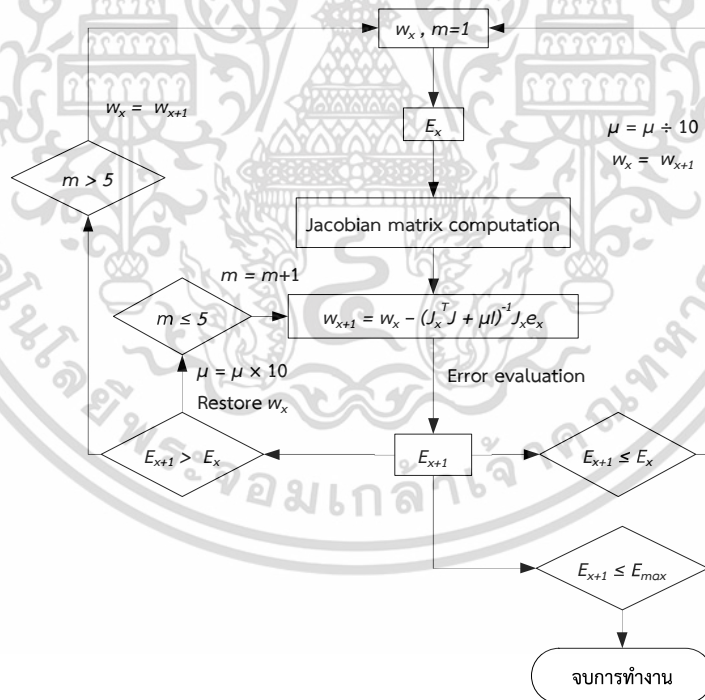
3.2 คำนวณค่า Total error (SSE) ด้วยค่าถ่วงน้ำหนักใหม่ ($Weight_{x+1}$)

3.3 หากค่า Total error (SSE) ที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้นให้ทำการยกเลิกการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักตัวที่ได้มา ($Weight_{x+1}$) โดยให้ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักเดิม ($Weight_x$) และทำการคูณค่า combination coefficient (μ) ด้วยค่า Factor ที่ตั้งไว้ (โดยค่าตั้งต้นจะตั้งไว้ที่ 10) หลังจากนั้นนำค่าถ่วงน้ำหนักเดิม $Weight_x$ มาคำนวณในขั้นตอนที่ 3.1 อีกครั้ง

3.4 หากค่า Total error (SSE) ที่คำนวณได้มีค่าลดลงให้ใช้ค่าน้ำหนักที่คำนวณได้ ($Weight_{x+1}$) และทำการหารค่า combination coefficient (μ) ด้วยค่า Factor ที่ตั้งไว้ (โดยค่าตั้งต้นจะตั้งไว้ที่ 10)

3.5 นำค่าน้ำหนักตัวใหม่ ($Weight_{x+1}$) เข้าไปคำนวณในขั้นตอนที่ 3.1

4. ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการทำซ้ำ ทำการคำนวณไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง Total error (SSE) มีค่าน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ โดยขั้นตอนการเทรนทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมการเทรนด้วย Levenberg-Marquardt algorithm : w_x คือค่าถ่วงน้ำหนักในขณะนั้น, w_{x+1} คือค่าถ่วงน้ำหนักใหม่ที่ได้จากการคำนวณ E_x ค่า Total error เดิม, E_{x+1} คือค่า Total error ใหม่ที่คำนวณได้

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ด้วยการใช้ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งในการออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์จำเป็นต้องมีการเตรียมค่าอินพุต ที่มีความเหมาะสมสำหรับการหาค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และตัวปรับค่า (Bias) ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Matrix โดยจำนวนอินพุตและ Hidden layer มีจำนวนมากเกินไปจะทำให้การประมวลผลเป็นไปได้ช้าและหากจำนวนอินพุต และ Hidden layer มีจำนวนน้อยเกินไปจะทำให้มีความแม่นยำในการประมวลผลน้อยลง และต้องใช้ค่าเอาต์พุตที่ต้องการเพื่อทำการ Training ให้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมโดยในการออกแบบจะเริ่มตั้งแต่การสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ตามมาตรฐาน IEC60060-1 เพื่อตรวจสอบรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรม TDG ที่สร้างรูปคลื่นอ้างอิงตามมาตรฐาน และเก็บค่าพารามิเตอร์ตามสมการแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในอีก 2 รูปแบบคือ

1. โมเดลเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันโดยตรง ซึ่งจะได้ผลเป็นค่าแรงดันสูงสุด ระยะเวลาหน้าคลื่น ระยะเวลาหลังคลื่น และ Overshoot rate
2. โมเดลเชิงคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นแรงดัน A , B , α และ β ที่ต้องการให้เป็นผลลัพธ์ เพื่อทำการเทรนนิ่ง และทำการหาค่าพารามิเตอร์ เพื่อใช้ในการสร้าง Base curve จากนั้นทำการหาค่าแรงดันสูงสุด ระยะเวลาหน้าคลื่น ระยะเวลาหลังคลื่น และ Overshoot rate ตามวิธีที่กำหนดตามมาตรฐานต่อไป

3.1 การประมวลผลรูปคลื่นตามวิธีมาตรฐาน

การประมวลผลรูปคลื่นตามวิธีมาตรฐานจะทำการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ตามที่กล่าวมาในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 จึงทำตามลำดับดังนี้ [15]

- 1 ทำการตัดหน้าคลื่นที่บันทึกได้ (Recorded curve) ที่ 10 หรือ 20 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันสูงสุด และตัดหลังคลื่นที่ 40 เปอร์เซ็นต์หรือน้อยกว่าของค่าแรงดันสูงสุดออก
- 2 นำรูปคลื่นที่ได้จากการตัดหน้าคลื่นและหลังคลื่นแล้วเข้าสู่การ Fitting ด้วย Double exponential function ตามสมการที่ 3.1 โดยมีพารามิเตอร์ 4 ตัวแปรได้แก่ A , B , α และ β โดย

พารามิเตอร์ที่ได้จากการประมวลผล จะนำมาสร้าง Base curve ซึ่งจะสามารถหาค่า overshoot rate ได้ด้วยสมการที่ 3.2

$$f(t) = C(e^{-\alpha(t-t_d)} - e^{-\beta(t-t_d)}) \quad (3.1)$$

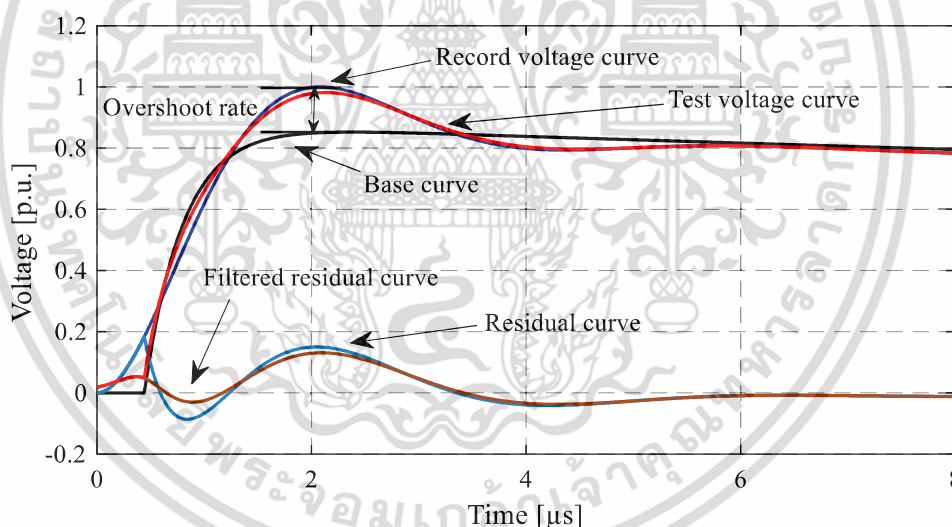
$$f(t) = Ae^{-\alpha t} + Be^{-\beta t} \quad (3.2)$$

เมื่อ $f(t)$ เป็นฟังก์ชันแรงดัน, t คือเวลา t_d คือเวลาเริ่มต้น

3 หาค่า Residual curve ด้วยการนำ Recorded curve มาลบด้วย Base curve ที่ถูกสร้างขึ้น หลังจากนั้นนำค่า Residual curve มาผ่าน k-factor filter ดังสมการที่ 3.3

$$k(f) = \frac{1}{(1 + 2.2f^2)} \quad (3.3)$$

4 Residual curve ที่ถูก filter แล้วจะถูกนำมารวมกับ Base curve ซึ่งจะเรียกว่า Test voltage curve



รูปที่ 3.1 การประมวลผลรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน

โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ตามวิธีดังกล่าวและทำการประมวลผลโดยใช้ อินพุตจากรูปคลื่นมาตรฐานที่ทาง IEC61083-2 กำหนดไว้ (TDG) จำนวน 29 กรณี และรูปคลื่นที่ทำการสร้างขึ้นเองใหม่ในโปรแกรมทดลองอีกจำนวน 3 กรณี

3.2 การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าโดยตรง

การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าโดยตรงเป็นการนำรูปคลื่นมาตรฐานจาก IEC61083-2 มาเตรียมการให้เหมาะสมต่อการประมวลผล และทำการหาสมการ ด้วยเทคนิควิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) ซึ่งจำเป็นต้องใช้ชุดข้อมูลด้านอินพุต และผลที่ต้องการอยากได้เพื่อทำการเทรนระบบให้มีความสามารถในการคำนวณผลในลักษณะเดียวกับที่ผู้วิจัยต้องการ ซึ่งมีหลักการเป็นไปตามบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 โดยผลที่ต้องการจะเป็นค่าพารามิเตอร์ของลูกแรงดันฟ้าผ่าที่ระบุตามมาตรฐาน IEC 61083-2 จำนวน 29 กรณี และทำการทดสอบอีกครั้งร่วมกับรูปคลื่นที่ทำการสร้างขึ้นเองใหม่ในโปรแกรมทดลองอีกจำนวน 3 กรณี

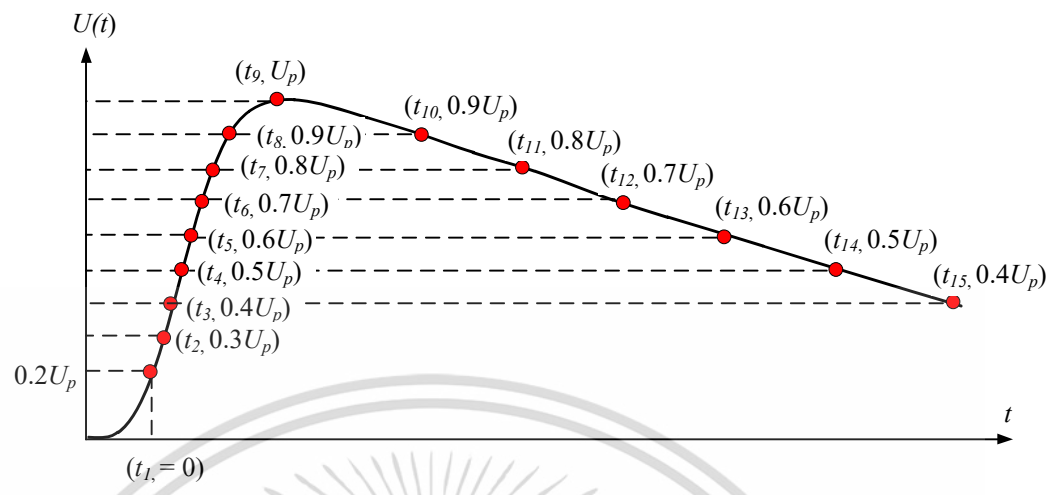
3.2.1 การออกแบบการจัดการข้อมูลสำหรับการประมวลผล

การออกแบบการจัดการข้อมูลสำหรับการประมวลผลในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะทำการเตรียมรูปคลื่นทั้ง 32 กรณี ดังนี้

1. ทำการตัดหน้าคลื่นที่บันทึกได้ (Recorded curve) 20 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันสูงสุดบริเวณหน้าคลื่น และตัดหลังคลื่นที่ 40 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันสูงสุดออก
2. ทำการเก็บค่าเวลารูปคลื่นตั้งแต่จุด แรกที่ 20% ของค่าแรงดันสูงสุดบริเวณหน้าคลื่นเพิ่มขึ้นครั้งละ 10% ไปจนถึงรูปคลื่นที่ 40% ของค่าแรงดันสูงสุดบริเวณด้านหลังคลื่น รวมจะได้เวลาทั้งหมดจำนวน 15 จุด และนำมาคำนวณหาความสัมพันธ์กับจุดต่าง ๆ ดังสมการที่ 3.4 จะได้ความชันทั้งหมด 14 ค่า มาเป็นค่าอินพุต แสดงดังรูปที่ 3.2
3. เตรียมผลของพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าทุก ๆ กรณี โดยใน 1 กรณี จะประกอบด้วยค่าแรงดันสูงสุด ระยะเวลาหน้าคลื่น ระยะเวลาหลังคลื่น และ Overshoot rate เพื่อทำการเทรนนิ่งให้แก่โมเดลประมวลผลต่อไป

$$S_i = \frac{y_i - y_1}{t_i - t_1} \quad (3.4)$$

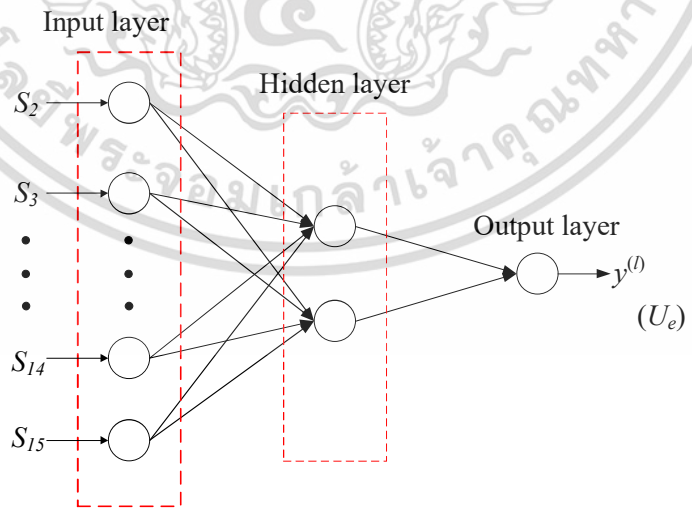
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 จุดที่เตรียมสำหรับเป็นอินพุตเพื่อทำการประมวลผลด้วยนิวรอนเน็ตเวิร์ค

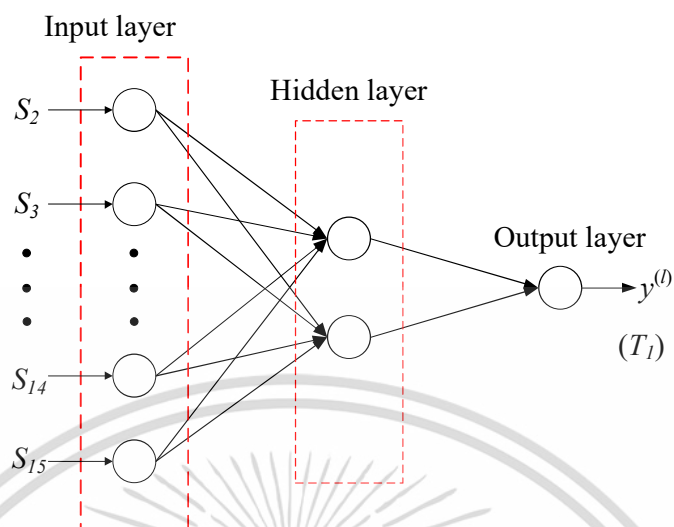
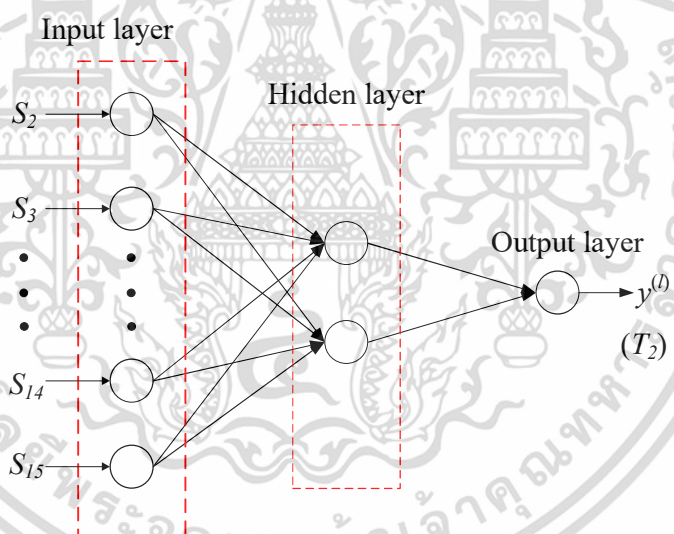
3.2.2 การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ด้วยนิวรอนเน็ตเวิร์ค

การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ด้วยนิวรอนเน็ตเวิร์ค มีข้อดีในด้านของความละเอียดและระยะเวลาในการประมวลผลเนื่องจากลักษณะของโมเดลที่ถูกสร้างด้วยนิวรอนเน็ตเวิร์คจะมีค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และตัวปรับค่า (Bias) ตามจำนวนอินพุตและ Hidden layer ซึ่งจะอยู่ในรูปของ matrix ซึ่งจำนวนอินพุต และ Hidden layer ที่มีจำนวนมากเกินไปจะทำให้การประมวลผลเป็นไปได้ช้า และหากจำนวนอินพุตและ Hidden layer มีจำนวนน้อยเกินไปจะทำให้มีความแม่นยำในการประมวลผลน้อยลง ในการออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ผู้เขียนเลือกใช้ Hidden layer จำนวน 1 layer, 2 nodes เนื่องจากด้านเอาต์พุตมีจำนวนไม่มาก ดังรูปที่ 3.3 (ก-ง)

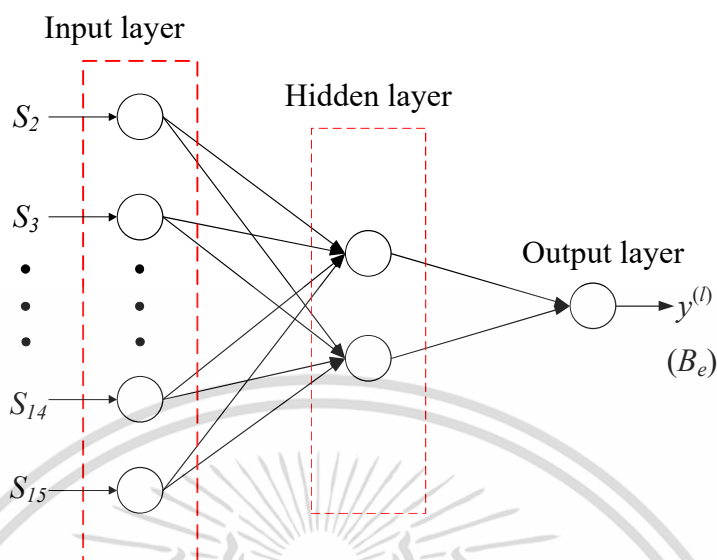


(ก) โมเดลนิวรอนเน็ตเวิร์คสำหรับหาค่าแรงดันสูงสุด (Ue)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) โมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คสำหรับหาเวลาหน้าคลื่น (T_1)(ค) โมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คสำหรับหาเวลาหลังคลื่น (T_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



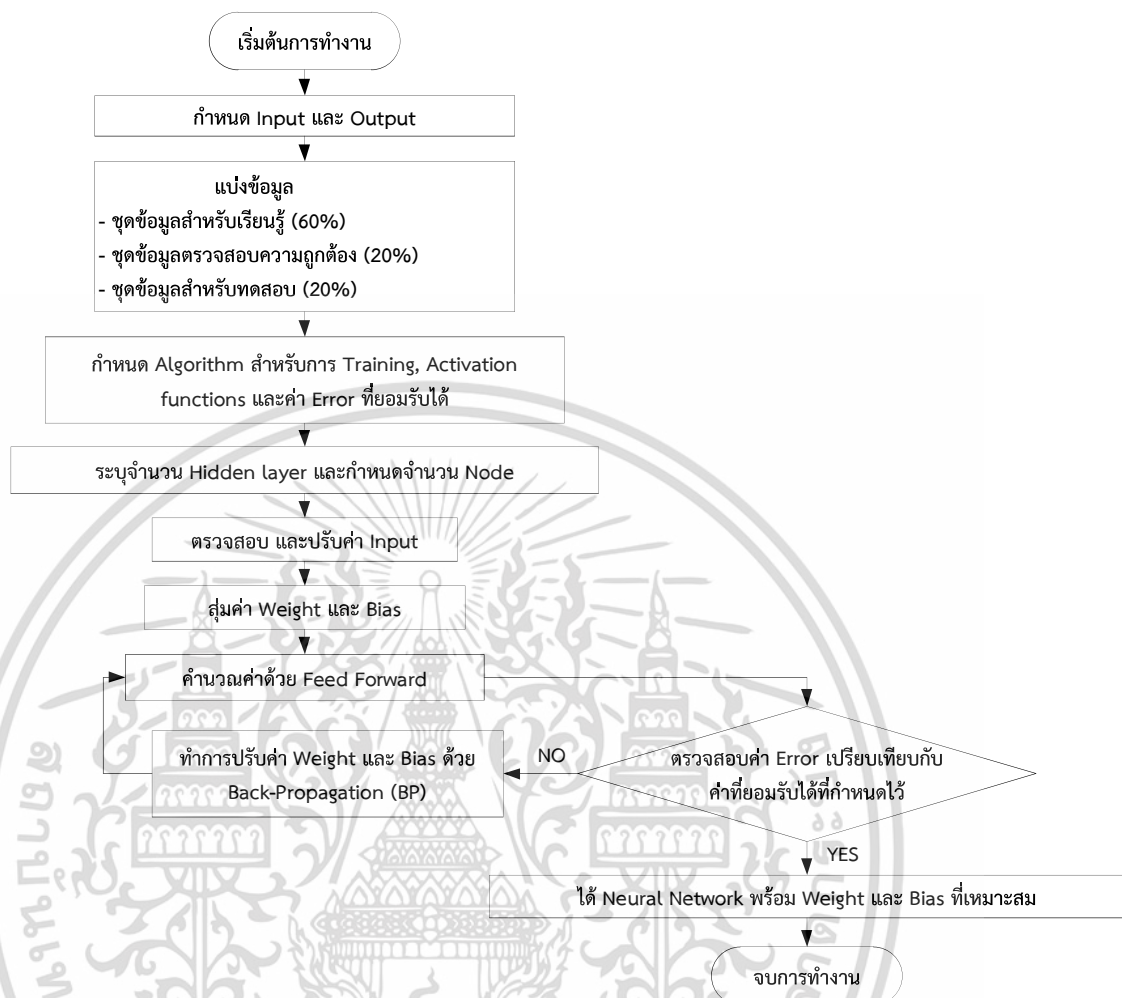
(ง) โมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คสำหรับหา Overshoot

รูป 3.3 โมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค

จากรูปที่ 3.3 ซึ่งอธิบายการดำเนินการของนิวรอนเน็ตเวิร์คจะมีขั้นตอนดังนี้

1. Input layer เป็นขั้นตอนของการเตรียมค่าอินพุต จะมีการตัดจุดของอินพุตที่มีการซ้ำกันออก เพื่อลดจำนวนอินพุตลง และทำการหักค่า offset ออก
2. ใช้ 1 Hidden layer ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 node โดยใช้ Tansig function เป็นฟังก์ชันหลัก ในการประมวลผล
3. Output layer ใช้ Purelin function เป็นฟังก์ชันหลัก ซึ่งเป็นขั้นตอนของการเตรียมค่า เอาต์พุต และทำการคืนค่า offset เข้าไปยังค่าของเอาต์พุต

โดยผลที่ได้จากการออกแบบโมเดลคณิตศาสตร์ เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดัน ฟ้าม่าโดยตรงจะมีค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และตัวปรับค่า (Bias) [16] ดังสมการที่ 3.5 3.6 และ 3.7 ซึ่งรูปแบบของโปรแกรมที่เขียนในโปรแกรม MATLAB แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Flowchart การเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค

$$y^{(l)} = \sum_{j=1}^n \left\{ w_{2,j}^{(l)} f \left(\sum_{i=1}^N (w_{1,ij}^{(l)} \cdot t_i + b_{1,ij}^{(l)}) \right) + b_{2,j}^{(l)} \right\} \quad (3.5)$$

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (3.6)$$

$$y^{(l)} = W_2^{(l)} \left\{ f \left(W_1^{(l)} t + B_1^{(l)} \right) \right\} + B_2^{(l)} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

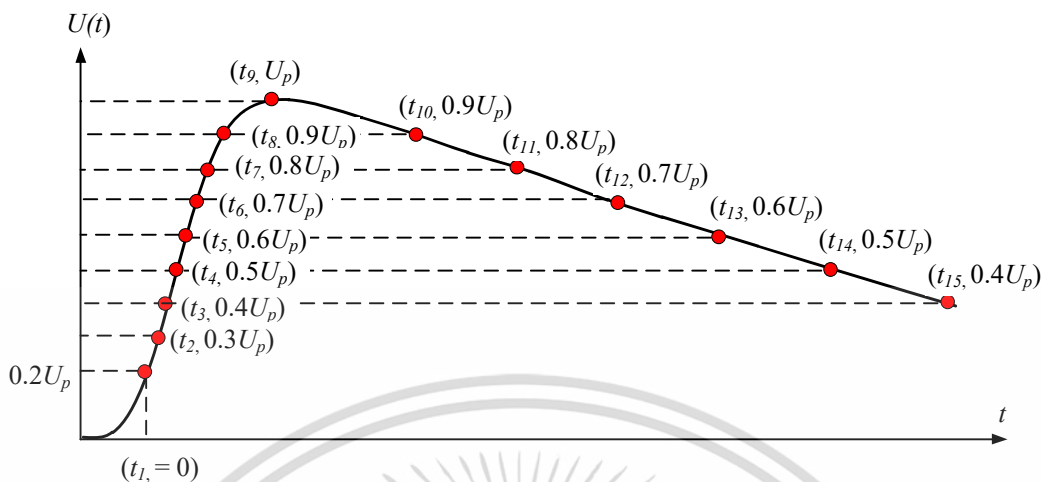
3.3 การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นฟ้าผ่า

การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าโดยตรงเป็นการนำรูปคลื่นมาตรฐานจาก IEC61083-2 [3] มาเตรียมการให้เหมาะสมต่อการประมวลผลและทำการหาสมการด้วยเทคนิควิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) ซึ่งจำเป็นต้องใช้ชุดข้อมูลด้านอินพุตและผลที่ต้องการอยากได้เพื่อทำการเทรนระบบให้มีความสามารถในการคำนวณผลในลักษณะเดียวกันที่ผู้วิจัยต้องการซึ่งมีหลักการตามบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 โดยผลที่ต้องการจะเป็นค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อใช้ในการสร้าง Base Curve ตามหลักการคำนวณหาพารามิเตอร์รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ถูกระบุโดย IEC60060-1 โดยผลที่ต้องการจะเป็นค่าพารามิเตอร์ของลูกแรงดันฟ้าผ่าที่ระบุตามมาตรฐาน IEC61083-2 จำนวน 29 กรณี และทำการทดสอบอีกครั้งร่วมกับรูปคลื่นที่ทำการสร้างขึ้นเองใหม่ในโปรแกรมทดลองอีกจำนวน 3 กรณี

3.3.1 การออกแบบการจัดการข้อมูลสำหรับการประมวลผล

การออกแบบการจัดการข้อมูลสำหรับการประมวลผลในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะทำการเตรียมรูปคลื่นทั้ง 32 กรณีดังนี้

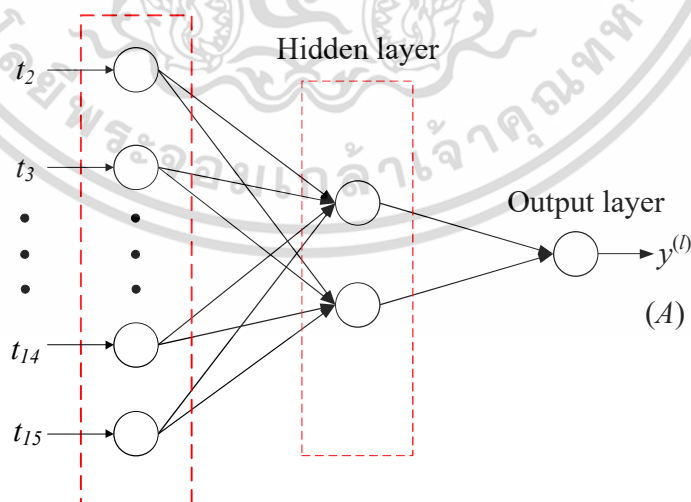
1. ทำการตัดหน้าคลื่นที่บันทึกได้ (Recorded curve) 20 % ของค่าแรงดันสูงสุดบริเวณหน้าคลื่นและตัดหลังคลื่นที่ 40 เปอร์เซ็นต์หรือน้อยกว่าของค่าแรงดันสูงสุดออก
2. ทำการตัดจุดรูปคลื่นตั้งแต่จุดแรกที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันสูงสุดบริเวณหน้าคลื่นเพิ่มขึ้นครึ่งละ 10% ไปจนถึงรูปคลื่นที่ 40% ของค่าแรงดันสูงสุดบริเวณด้านหลังคลื่น รวมจะได้จุดทั้งหมดจำนวน 15 จุด แสดงดังรูปที่ 3.5
3. เตรียมผลของพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าทุก ๆ กรณี ที่ได้จากการทดสอบในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1 โดยใน 1 กรณีจะประกอบด้วยค่า A , B , α และ β ที่ต้องการให้เป็นผลลัพธ์ เพื่อทำการเทรนนิ่งและทำการหาค่าพารามิเตอร์ เพื่อใช้ในการสร้าง Base curve จากนั้นทำการหาค่าแรงดันสูงสุด ระยะเวลาหน้าคลื่น ระยะเวลาหลังคลื่น และ Overshoot rate ตามวิธีที่กำหนดตามมาตรฐานต่อไป



รูปที่ 3.5 จุดที่เตรียมสำหรับเป็นอินพุตเพื่อทำการประมวลผลด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์ค

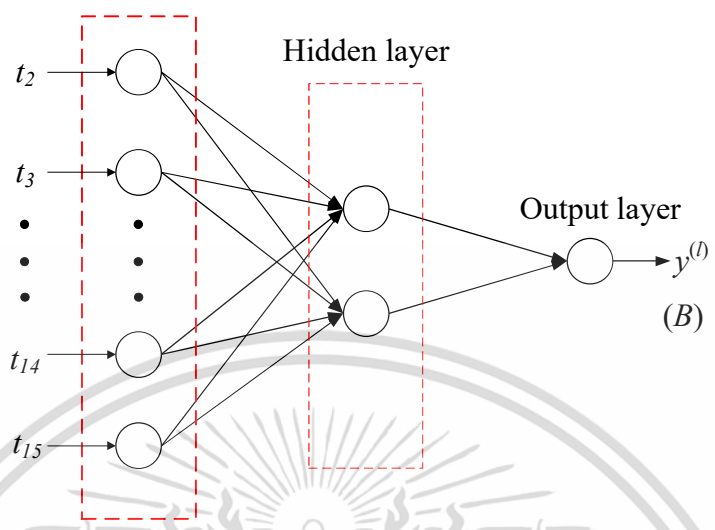
3.3.2 การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์ค

การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์ค มีความสำคัญในด้านของความละเอียดและระยะเวลาในการประมวลผลเนื่องจากลักษณะของโมเดลที่ถูกสร้างด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์คจะมีค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และตัวปรับค่า (Bias) ตามจำนวนอินพุตและ Hidden layer ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Matrix ซึ่งจำนวนอินพุตและ Hidden layer ที่มีมากเกินไปจะทำให้การประมวลผลเป็นไปได้ช้า และหากจำนวนอินพุตและ Hidden layer มีจำนวนน้อยเกินไปจะทำให้มีความแม่นยำในการประมวลผลน้อยลง ในการออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ผู้เขียนเลือกใช้ Hidden layer จำนวน 1 layer, 2 node เนื่องจากด้านเอาต์พุตมีจำนวนไม่มาก ดังรูปที่ 3.6 (ก-ง)

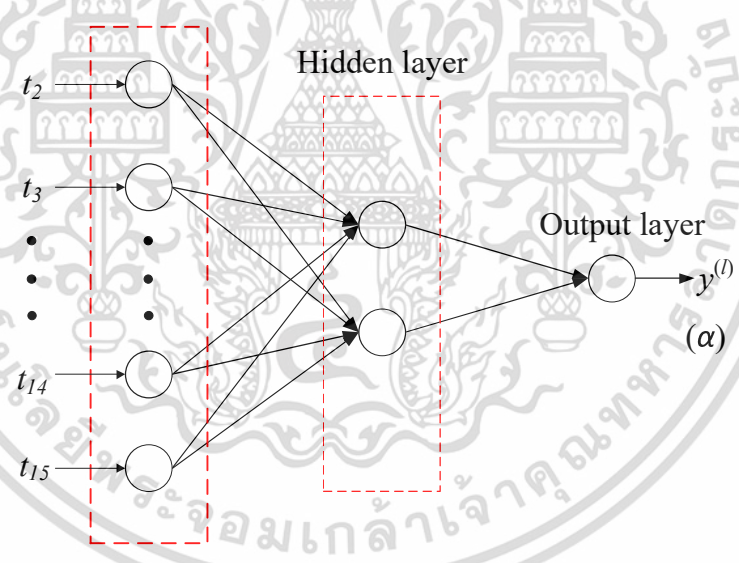


(ก) โมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คสำหรับหาค่า A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

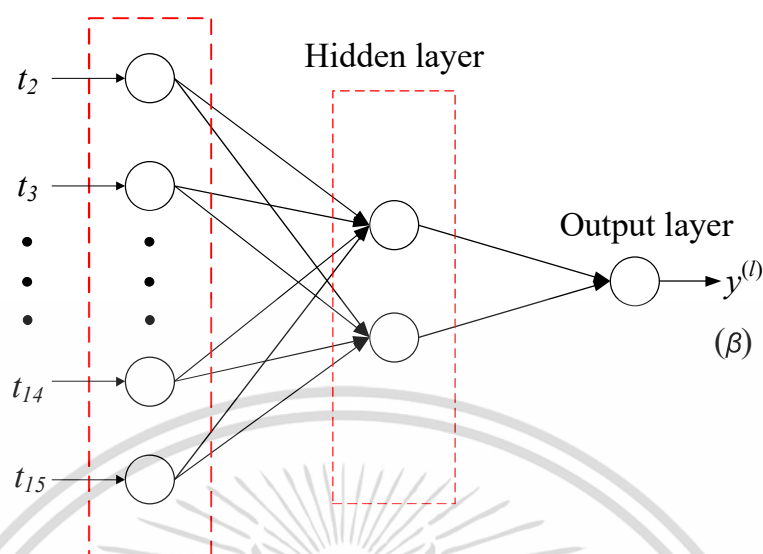


(ข) โมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คสำหรับหาค่า B



(ค) โมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คสำหรับหาค่า α

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ง) โมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คสำหรับหาค่า β

รูป 3.6 โมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค

1. Input layer เป็นขั้นตอนของการเตรียมค่า Input จะมีการตัดจุดของอินพุตที่มีการซ้ำกันออก เพื่อลดจำนวนอินพุตลง และทำการหักค่า offset ออก ซึ่งในการทดสอบนี้อินพุตที่เข้ามามีจำนวน 15 จุด แต่เนื่องจากจุดแรกของทุกๆจุดข้อมูลมีค่าเหมือนกันที่ $t_1=0$, จึงทำให้ชุดข้อมูลประมวลผลเหลือเพียง 14 จุด
2. ใช้ 1 Hidden layer ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 node โดยใช้ Tansig function เป็นฟังก์ชันหลัก ในการประมวลผล
3. Output layer ใช้ Purelin function เป็นฟังก์ชันหลัก ซึ่งเป็นขั้นตอนของการเตรียมค่า เอาต์พุต และทำการคืนค่า offset เข้าไปยังค่าของเอาต์พุต
4. ขั้นตอนการประมวลค่าพารามิเตอร์ตามวิธีมาตรฐาน

หลังจากประมวลผลด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งจะได้ค่าเอาต์พุตเป็น A , B , α และ β แล้ว นำค่าดังกล่าวมาสร้าง Base curve ได้

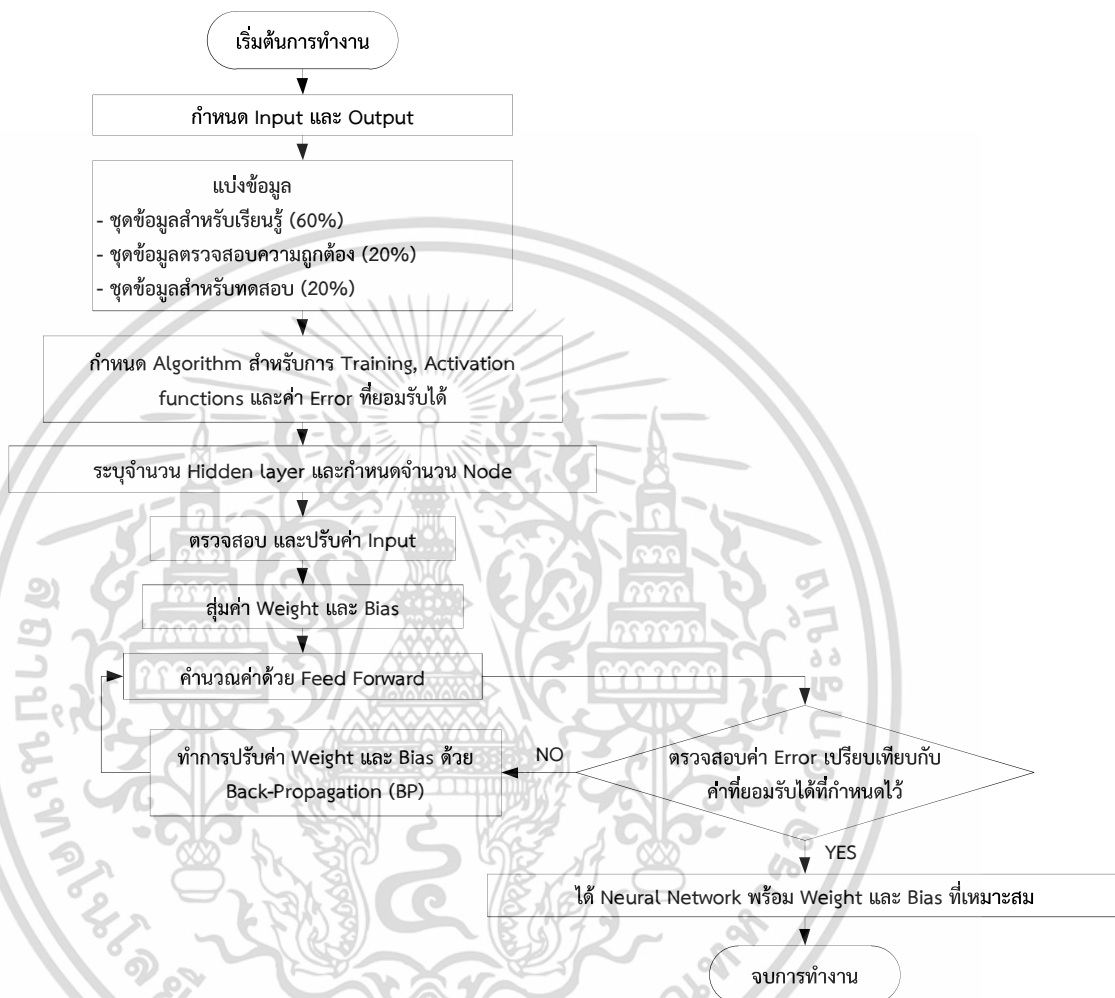
3 หาค่า Residual curve ด้วยการนำ Recorded curve มาลบด้วย Base curve ที่ถูกสร้างขึ้น หลังจากนั้นนำค่า Residual curve มาผ่าน k-factor filter ดังสมการที่ 3.8 [11-14]

$$k(f) = \frac{1}{(1 + 2.2f^2)} \quad (3.8)$$

4. Residual curve ที่ถูก filter แล้วจะถูกนำมารวมกับ Base curve ซึ่งจะเรียกว่า Test voltage curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผลที่ได้จากการออกแบบโมเดลคณิตศาสตร์ เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดัน ฟาผ่าโดยตรงจะมีค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และตัวปรับค่า (Bias) [15-16] ดังสมการที่ 3.9 3.10 และ 3.11 ซึ่งรูปแบบของโปรแกรมที่เขียนในโปรแกรม MATLAB แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 Flowchart การเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค

$$y^{(l)} = \sum_{j=1}^n \left\{ w_{2,j}^{(l)} f \left(\sum_{i=1}^N (w_{1,ij}^{(l)} \cdot t_i + b_{1,ij}^{(l)}) \right) + b_{2,j}^{(l)} \right\} \quad (3.9)$$

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (3.10)$$

$$y^{(l)} = W_2^{(l)} \left\{ f \left(W_1^{(l)} t + B_1^{(l)} \right) \right\} + B_2^{(l)} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

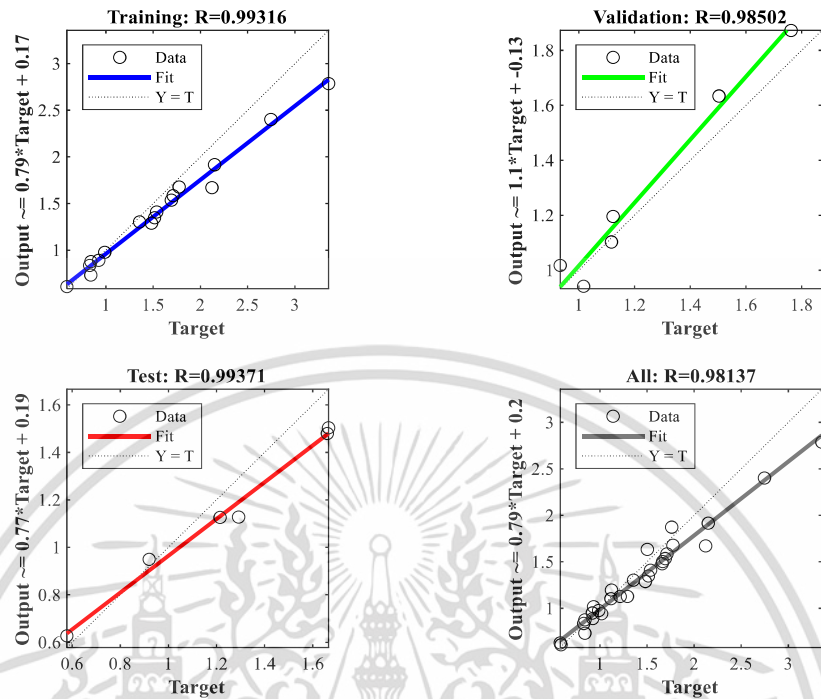
บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

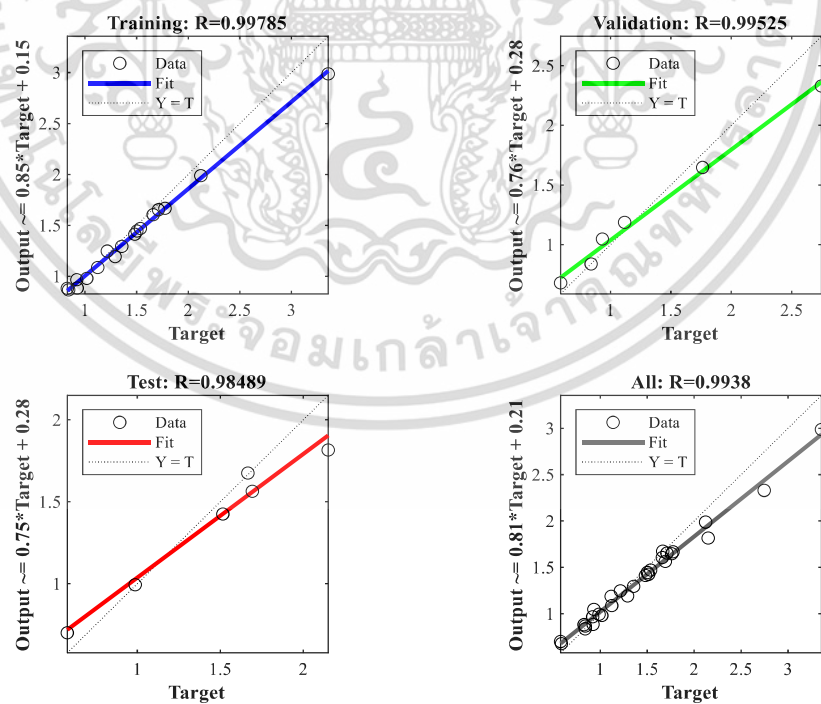
จากวัตถุประสงค์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 นำไปสู่การออกแบบสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์จากระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพการประมวลผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าซึ่งประกอบด้วยการจัดเตรียมข้อมูลอินพุตจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Recorded Curve) การสร้างตัวประมวลผล และการส่งออกข้อมูลเอาต์พุตจากการออกแบบในบทที่ 3 เพื่อทำการทดสอบในรูปแบบ ได้แก่ การออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าโดยตรง และการออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นฟ้าผ่าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความแม่นยำ และความไวในการประมวลผลสำหรับเป็นทางเลือกในการสร้างเครื่องมือวัดที่มีความรวดเร็วในการวิเคราะห์ที่สูงกว่ามาตรฐาน

4.1 ผลการทดสอบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าโดยตรง

ผลการทดสอบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าโดยตรง จะทำการวิเคราะห์ผลโดยตรงซึ่งผลที่ได้จะเป็นค่าแรงดันสูงสุด ระยะเวลาหน้าคลื่น ระยะเวลาหลังคลื่น และ Overshoot rate ซึ่งจะไม่ต้องทำการวนซ้ำในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวดังเช่นวิธีตามมาตรฐาน และไม่ต้องทำการปรับรูปคลื่นด้วย k-factor filter หรือการคำนวณต่าง ๆ ด้วยการคิดตามลักษณะของรูปคลื่น โดยทำการเปรียบเทียบการใช้ Neural network ที่ประกอบด้วย 1 layer ที่มีขนาด 4 Neurons และ 2 Neurons ผลการเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งมีผลดังรูปที่ 4.3 (ก) ถึง (ง) และซึ่งมีผลดังรูปที่ 4.4 (ก) ถึง (ง) ตามลำดับ

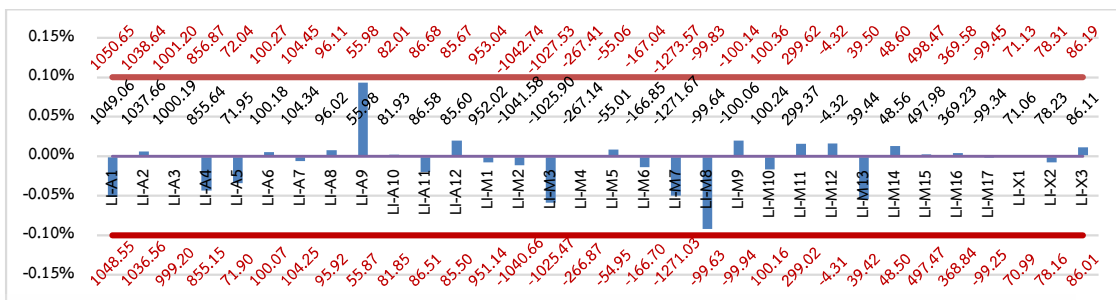


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค 1 layers, 4 neurons

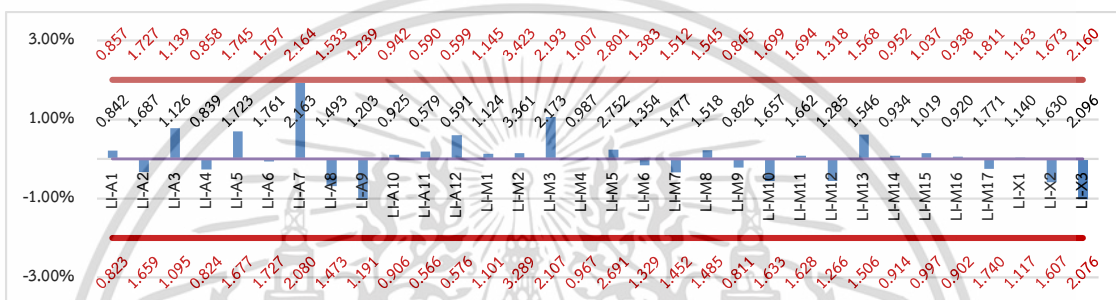


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค 1 layers, 2 neurons

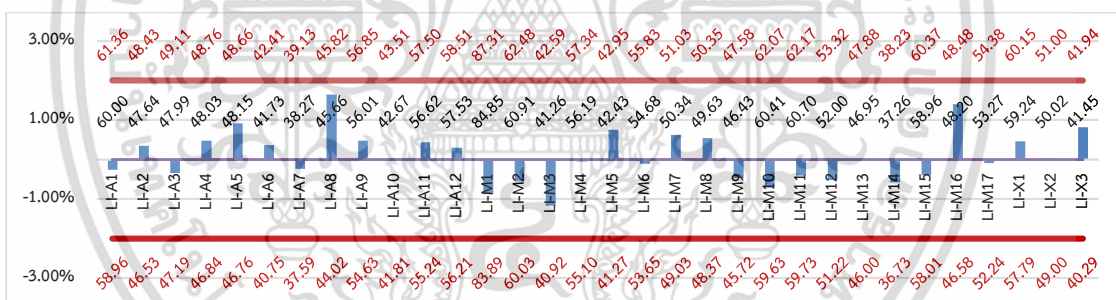
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



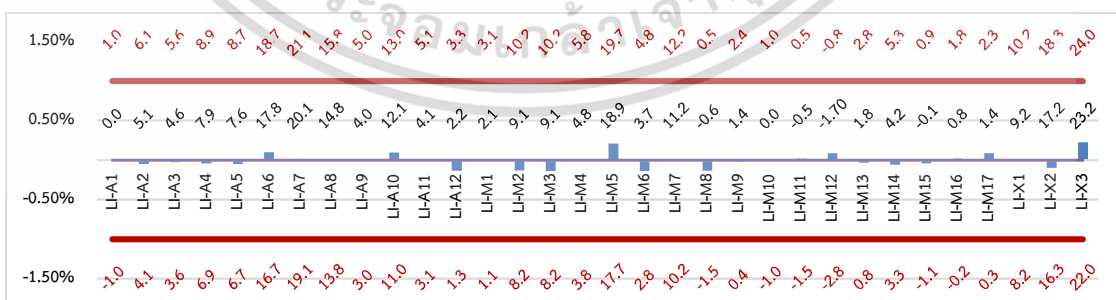
(น) Voltage Peak (U_p , kV)



(ข) Front Time (T_1 , μs)



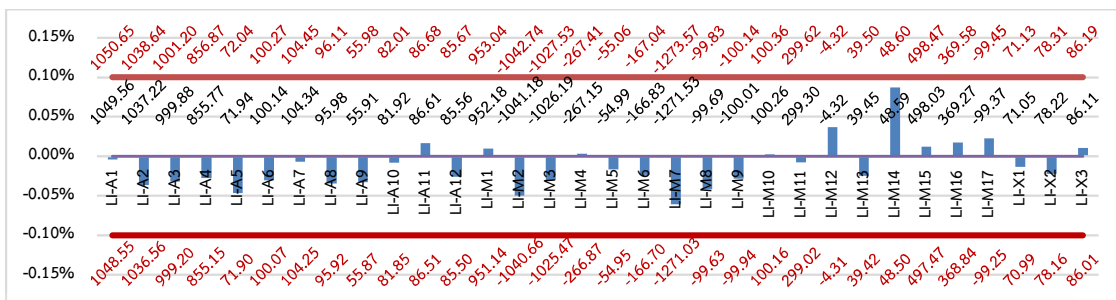
(ค) Time to half (T_2 , μs)



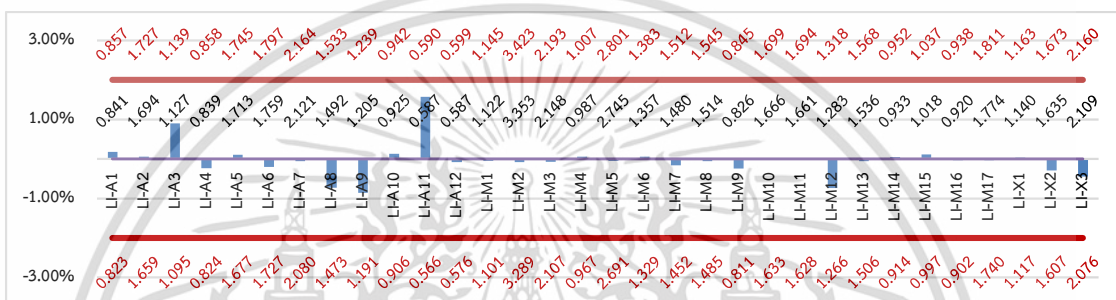
(ง) Overshoot rate (B_e)

รูปที่ 4.3 ผลการประเมินจากอัลกอริทึมที่คำนวณด้วย 4 neurons เทียบกับค่าความยอมรับได้

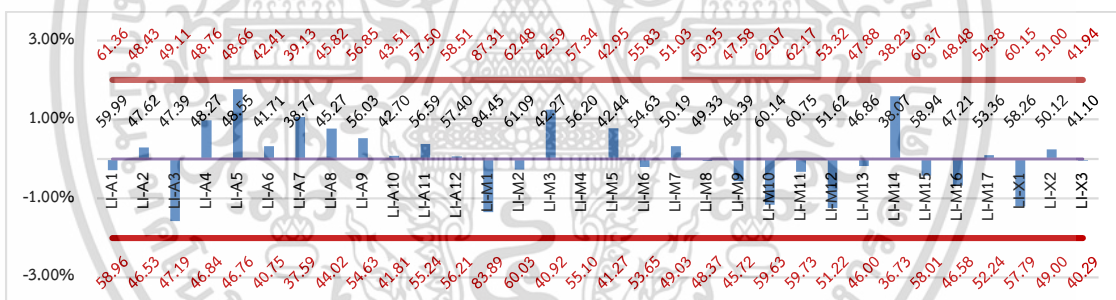
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



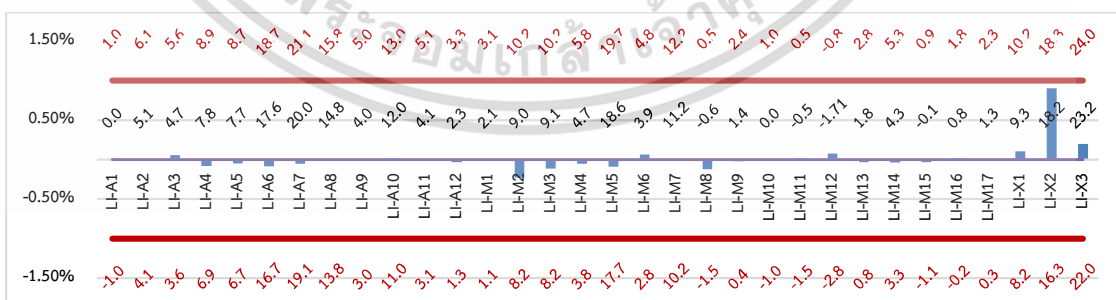
(น) Voltage Peak (U_p , kV)



(ข) Front Time (T_1 , μs)



(ค) Time to half (T_2 , μs)



(ง) Overshoot rate (B_e)

รูปที่ 4.4 ผลการประเมินจากอัลกอริทึมที่คำนวณด้วย 2 neurons เทียบกับค่าความยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คในรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงความสัมพันธ์เชิงถดถอยระหว่างเอาต์พุต และค่าเป้าหมายของ Neural network ที่ประกอบด้วย 1 layer ที่มีขนาด 4 Neurons และ 2 Neurons ซึ่งหากค่าความสัมพันธ์เชิงถดถอย (R) มีค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 มากเท่าใดจะยิ่งมีความแม่นยำสูง และหากเข้าใกล้ 0 จะมีความแม่นยำต่ำมาก โดยค่า R ของ Training data ชุดที่ใช้ 4 Neurons มีค่าเท่ากับ 0.99316 และชุดที่ใช้ 2 Neurons มีค่าเท่ากับ 0.99785, ค่า R ของ Validation data ชุดที่ใช้ 4 Neurons มีค่าเท่ากับ 0.98502 และชุดที่ใช้ 2 Neurons มีค่าเท่ากับ 0.99525, ค่า R ของ Test data ชุดที่ใช้ 4 Neurons มีค่าเท่ากับ 0.99371 และชุดที่ใช้ 2 Neurons มีค่าเท่ากับ 0.98489, ค่า R รวมชุดที่ใช้ 4 Neurons มีค่าเท่ากับ 0.98137 และชุดที่ใช้ 2 Neurons มีค่าเท่ากับ 0.9938 ซึ่งผลของการทดสอบการเทรนทั้งสองรูปแบบมีความแม่นยำใกล้เคียง

ในการทดสอบการประมวลผลด้วยโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรงในส่วนของแรงดันสูงสุด (Peak voltage) แสดงในรูปที่ 4.3 (ก) และ 4.4 (ก) แสดงให้เห็นว่าในทุกๆกรณีเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดโดยค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต้องไม่เกิน 0.1% ซึ่งในกรณีที่มีค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดของชุดที่ใช้ 4 Neurons อยู่ที่กรณี LI-A9 มีค่าเท่ากับ 0.09% และชุดที่ใช้ 2 Neurons อยู่ที่กรณี LI-M2 มีค่าเท่ากับ 0.09%

ในการทดสอบการประมวลผลด้วยโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรงในส่วนของระยะเวลาหน้าคลื่น (front time) แสดงในรูปที่ 4.3 (ข) และ 4.4 (ข) แสดงให้เห็นว่าในทุกๆกรณีเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดโดยค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต้องไม่เกิน 2.00% ซึ่งในกรณีที่มีค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดของชุดที่ใช้ 4 Neurons อยู่ที่กรณี LI-A7 มีค่าเท่ากับ 1.93% และชุดที่ใช้ 2 Neurons อยู่ที่กรณี LI-A11 มีค่าเท่ากับ 1.58%

ในการทดสอบการประมวลผลด้วยโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรงในส่วนของระยะเวลาหลังคลื่น (Time to half) แสดงในรูปที่ 4.3 (ค) และ 4.4 (ค) แสดงให้เห็นว่าในทุกๆกรณีเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดโดยค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต้องไม่เกิน 2.00% ซึ่งในกรณีที่มีค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดของชุดที่ใช้ 4 Neurons อยู่ที่กรณี LI-A8 มีค่าเท่ากับ 1.64% และชุดที่ใช้ 2 Neurons อยู่ที่กรณี LI-A5 มีค่าเท่ากับ 1.77%

ในการทดสอบการประมวลผลด้วยโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรงในส่วนของ Over shoot rate แสดงในรูปที่ 4.3 (ง) และ 4.4 (ง) แสดงให้เห็นว่าในทุกๆกรณีเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดโดยค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต้องไม่เกิน 1.00ซึ่งในกรณีที่มีค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดของชุดที่ใช้ 4 Neurons อยู่ที่กรณี LI-X3 มีค่าเท่ากับ 0.22% และชุดที่ใช้ 2 Neurons อยู่ที่กรณี LI-X2 มีค่าเท่ากับ 0.90%

ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าอัลกอริทึมที่ใช้เมื่อประมวลผลด้วย Network ที่มี 1 layer, 4 Neurons และที่มี 1 layer, 2 Neurons จะให้ค่าเอาท์พุทที่มีค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต้องไม่เกินค่าที่มาตรฐานยอมรับได้ จึงเลือกใช้ Network ที่มี 1 layer, 2 Neurons ซึ่งมีขนาดข้อมูลที่เล็กกว่าสำหรับการประมวลผลในการทดสอบต่อไป โดยผลของระยะเวลาในการประมวลผลมีความใกล้เคียงกันในกรณีต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาในการประมวลผลเพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าโดยตรง เทียบกับวิธีตามมาตรฐาน (ประมวลผลโดยแล็ปท็อป Lenovo ThinkPad X13 10th Generation Intel® Core™ i7-10510U Processor)

Case	Propose Method	Least Square Method	Ratio of the execution times	Kind of samples
LI-A1	0.0548	0.7731	14.10766	Training data
LI-A2	0.0494	0.4464	9.036437	Training data
LI-A3	0.0513	0.3741	7.292398	Testing data
LI-A4	0.0434	0.5550	12.78802	Validation data
LI-A5	0.0458	0.4710	10.28384	Testing data
LI-A6	0.0493	0.4873	9.884381	Testing data
LI-A7	0.0485	0.5347	11.02474	Training data
LI-A8	0.0461	0.5546	12.03037	Training data
LI-A9	0.0527	0.4920	9.335863	Validation data
LI-A10	0.0462	0.5226	11.31169	Training data
LI-A11	0.0481	0.4115	8.555094	Training data
LI-A12	0.0496	0.5047	10.1754	Testing data
LI-M1	0.0487	0.5252	10.78439	Training data
LI-M2	0.0468	0.5306	11.33761	Training data
LI-M3	0.0462	0.4402	9.528139	Training data
LI-M4	0.0454	0.3705	8.160793	Training data
LI-M5	0.0469	0.6387	13.61834	Testing data
LI-M6	0.0441	0.4582	10.39002	Validation data
LI-M7	0.0443	0.5466	12.3386	Validation data
LI-M8	0.0429	0.4899	11.41958	Training data
LI-M9	0.0448	0.6673	14.89509	Validation data
LI-M10	0.0464	0.8162	17.59052	Testing data

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

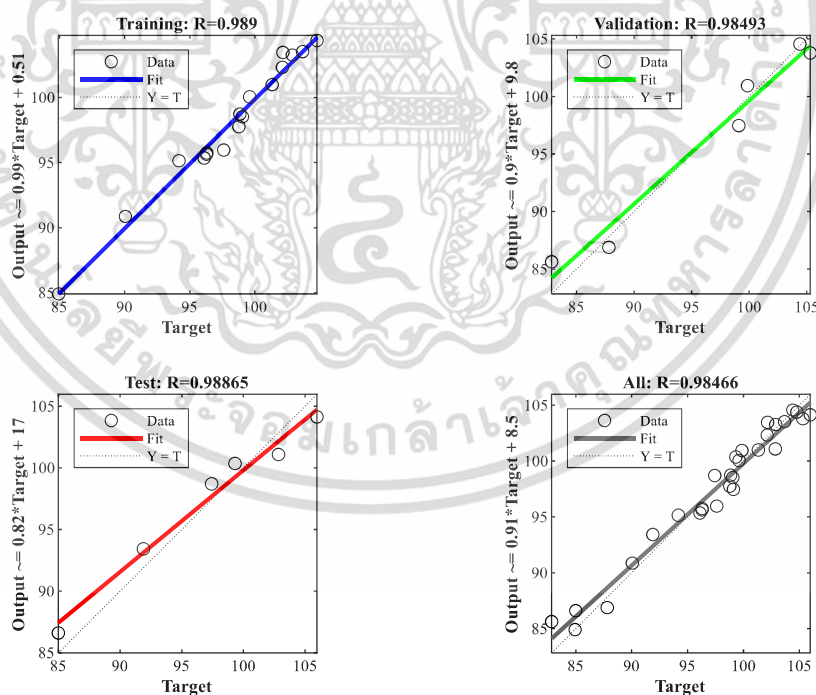
ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาในการประมวลผลเพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่า โดยตรง เทียบกับวิธีตามมาตรฐาน (ต่อ)

Case	Propose Method	Least Square Method	Ratio of the execution times	Kind of samples
LI-M11	0.0449	0.6826	15.20267	Training data
LI-M12	0.0454	0.6682	14.71806	Training data
LI-M13	0.0426	0.8239	19.34038	Training data
LI-M14	0.0419	0.9726	23.21241	Validation data
LI-M15	0.0445	0.8000	17.97753	Training data
LI-M16	0.0434	0.9229	21.26498	Training data
LI-M17	0.0481	0.8551	17.77755	Training data
LI-X1	0.0458	1.0150	22.16157	Testing data
LI-X2	0.0478	0.8897	18.61297	Testing data
LI-X3	0.0470	0.9792	20.83404	Testing data
Average	0.0467	0.6319	13.53105	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

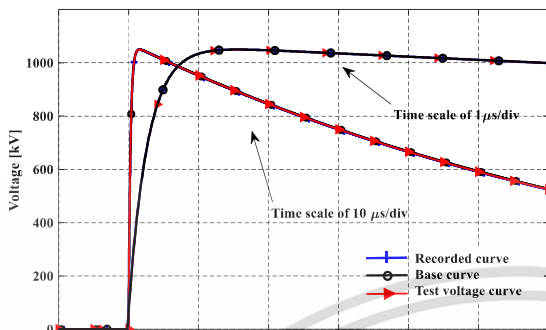
4.2 ผลการทดสอบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นฟ้าผ่า

ผลการทดสอบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์การประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นฟ้าผ่า จะทำการวิเคราะห์ หาค่าพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าซึ่งจะได้ผลเป็นค่า A , B , α และ β โดยในการคำนวณจะไม่ต้องทำการวนซ้ำอย่างเช่นวิธีการตามมาตรฐาน แต่จะต้องทำการสร้าง Base Curve จากพารามิเตอร์ดังกล่าว และเข้าสู่กระบวนการตั้งเช่นวิธีตามมาตรฐานคือ ต้องทำการกรองรูปคลื่นด้วย k-factor filter ทำการหา Residual curve เพื่อนำมาสร้างรูปคลื่นทดสอบ (Test voltage curve) และต้องทำการคำนวณหาค่าแรงดันสูงสุด ระยะเวลาหน้าคลื่น ระยะเวลาหลังคลื่น และ Overshoot rate ซึ่งวิธีนี้จะสามารถเห็นรูปคลื่นที่เราทำการประมวลผลได้ ซึ่งผลการเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 โดยรูปคลื่นที่ประมวลผลมีทั้งหมด 29 กรณี ดังรายละเอียดในบทที่ 3 แสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) ถึง 4.6 (ร) ผลของการคำนวณลูกคลื่นแสดงดังรูปที่ 4.7 (ก) ถึง (ง) โดยมีผลของระยะเวลาในการประมวลผลและค่าความแม่นยำของพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในกรณีต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.2

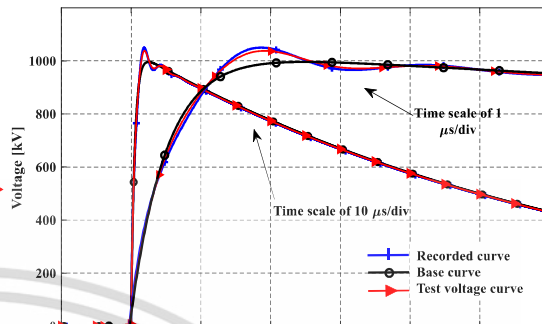


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์ค

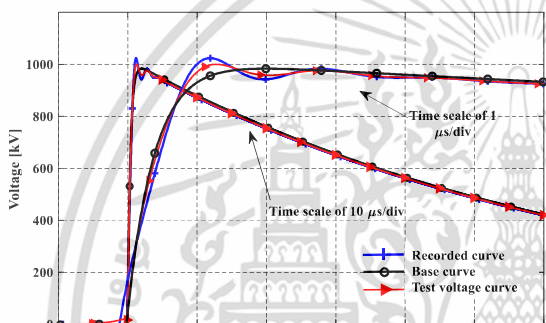
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



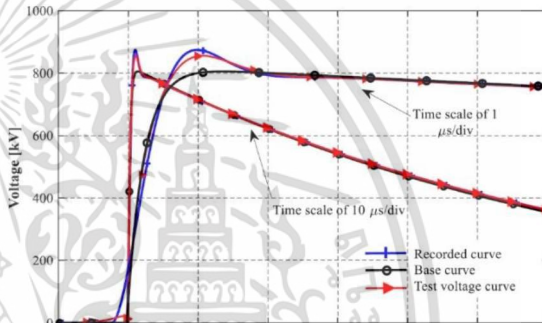
(ก) กรณี A1



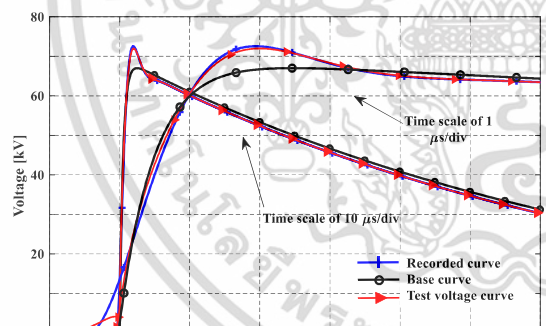
(ข) กรณี A2



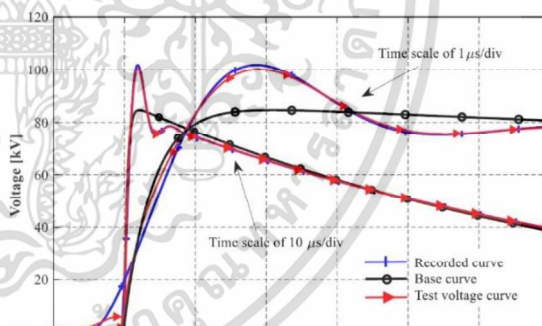
(ค) กรณี A3



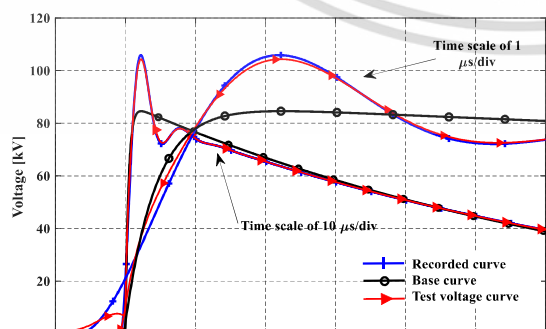
(ง) กรณี A4



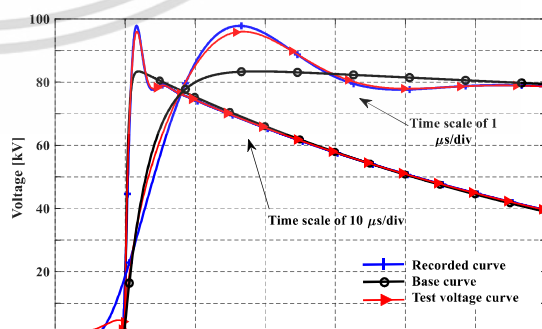
(จ) กรณี A5



(ฉ) กรณี A6

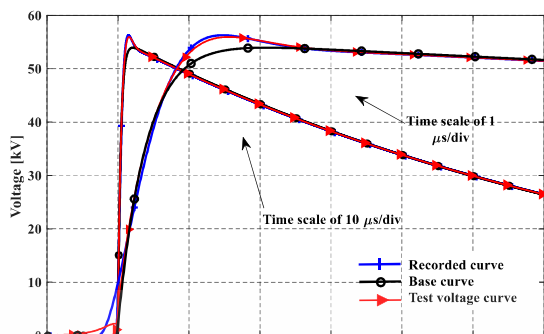


(ช) กรณี A7

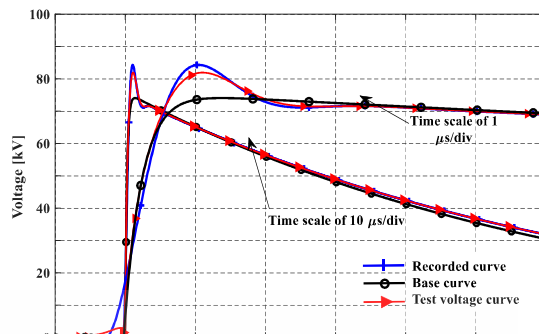


(ซ) กรณี A8

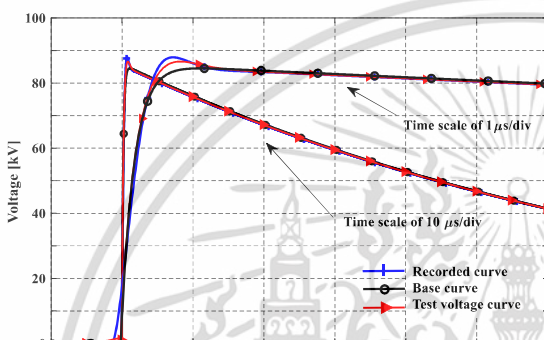
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



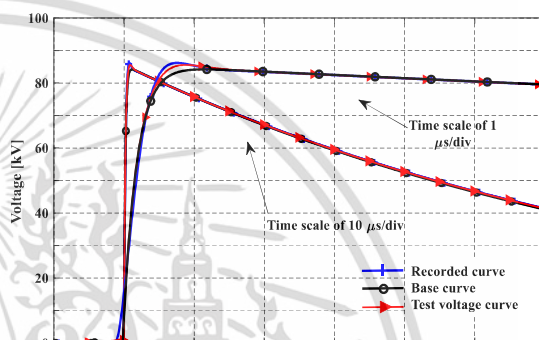
(ฉ) กรณี A9



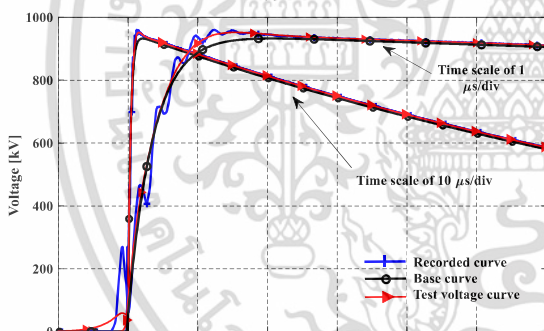
(ญ) กรณี A10



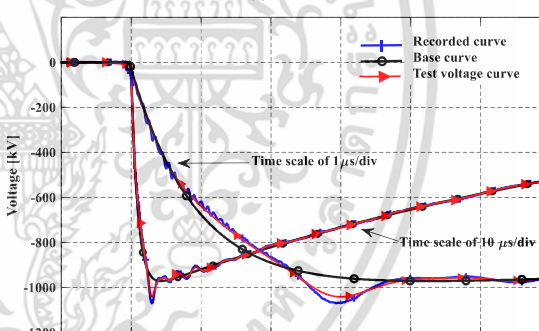
(ฎ) กรณี A11



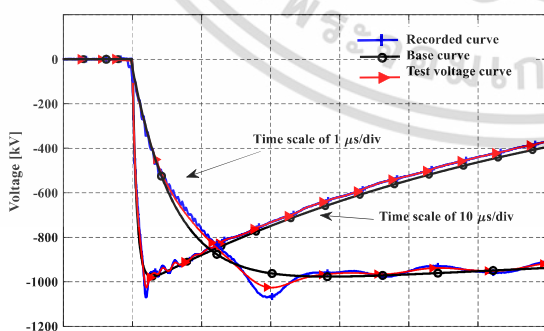
(ฏ) กรณี A12



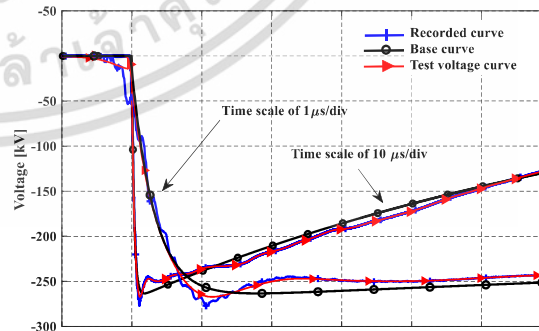
(ฐ) กรณี M1



(ฑ) กรณี M2

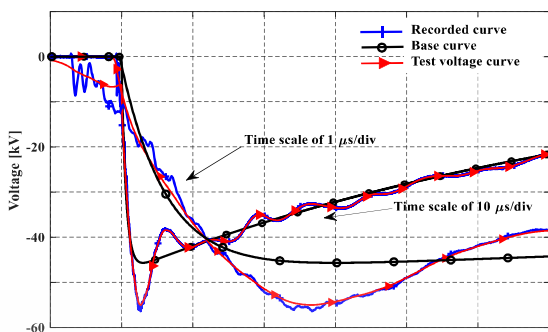


(ฒ) กรณี M3

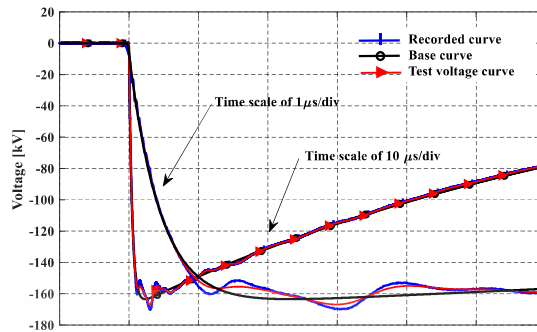


(ณ) กรณี M4

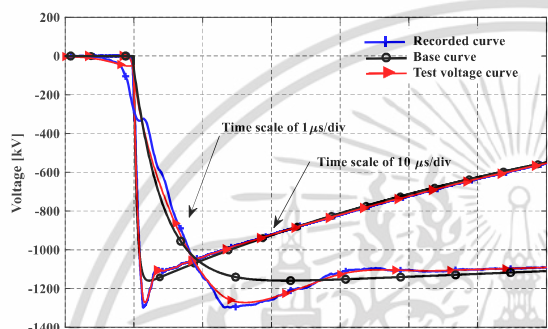
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



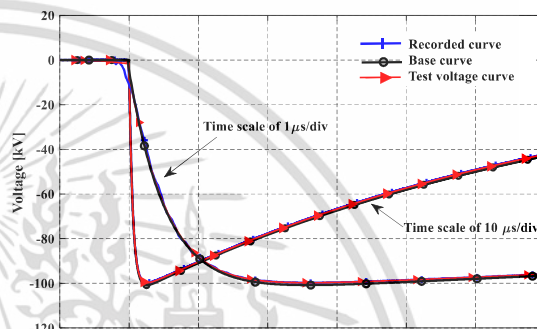
(ค) กรณี M5



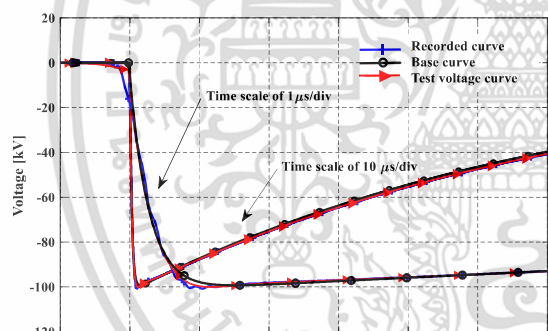
(ต) กรณี M6



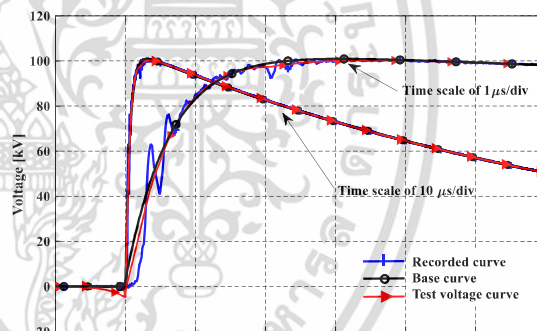
(ถ) กรณี M7



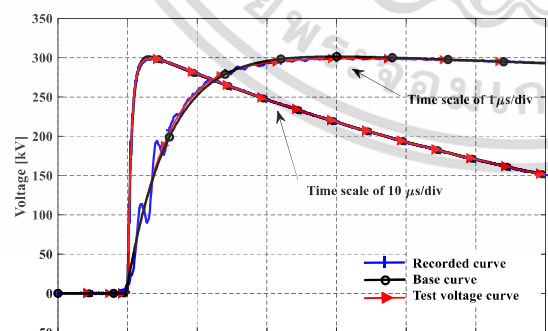
(ท) กรณี M8



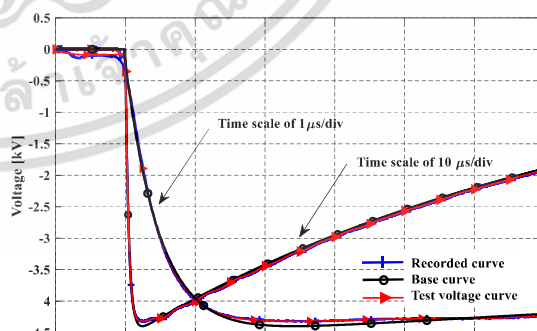
(ธ) กรณี M9



(ณ) กรณี M10

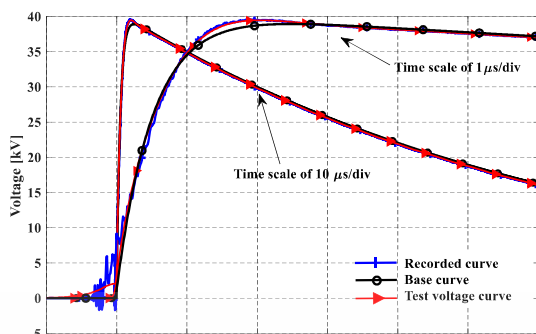


(บ) กรณี M11

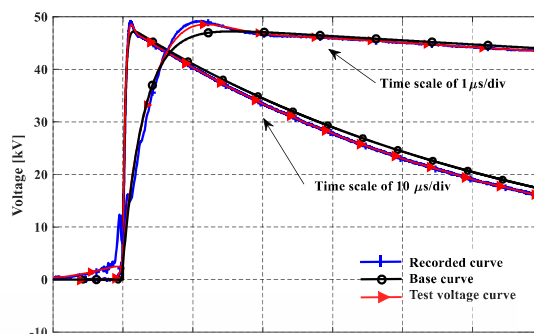


(ป) กรณี M12

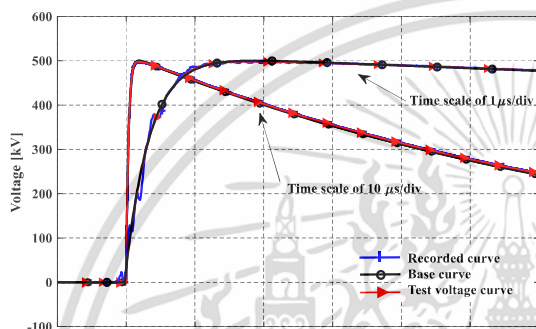
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



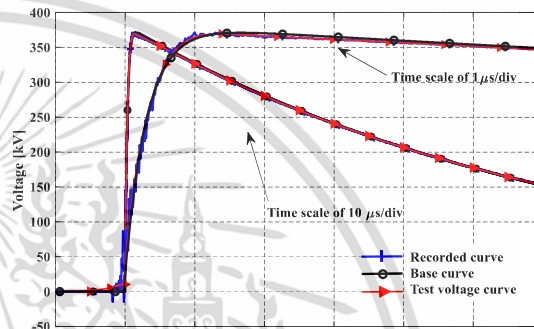
(ข) กรณี M13



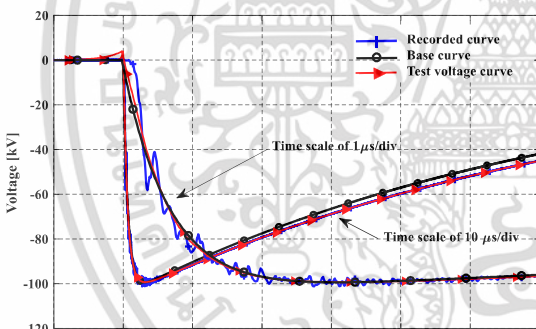
(ค) กรณี M14



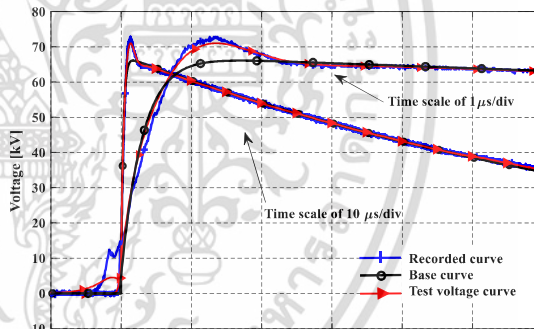
(ง) กรณี M15



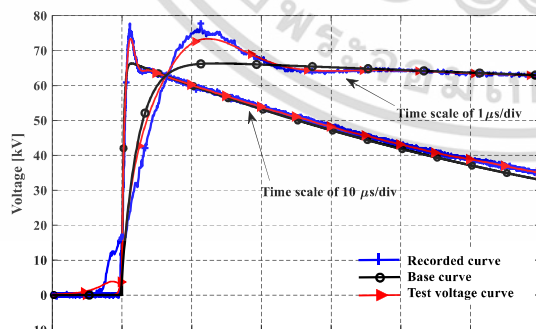
(ฉ) กรณี M16



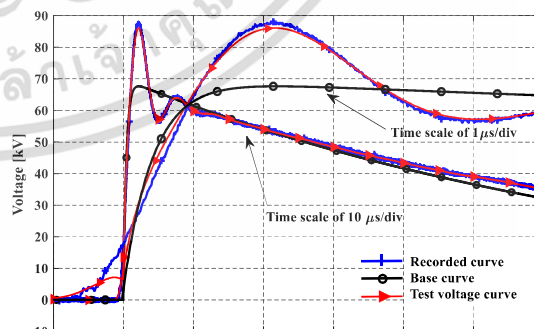
(ช) กรณี M17



(ฅ) กรณี X1



(ฉ) กรณี X2



(จ) กรณี X3

รูปที่ 4.6 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันทดสอบ และรูปคลื่น Base curve ที่ประมวลผลด้วยนิวโรเน็ตเวิร์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์แรงดันอิมพัลส์ และอัตราส่วนของเวลาดำเนินการเทียบกับวิธีมาตรฐาน (ประมวลผลโดยแล็ปท็อป Lenovo ThinkPad X13 10th Generation Intel® Core™ i7-10510U Processor)

Case	Deviations of impulse voltage parameters.				Ratio of the execution times	Kind of sample
	A	B	α	β		
LI-A1	0.00%	0.53%	-0.45%	0.09%	11.12	Training data
LI-A2	0.00%	0.12%	-0.61%	-0.26%	12.39	Training data
LI-A3	0.66%	-0.85%	-0.28%	-0.09%	10.87	Testing data
LI-A4	0.00%	-1.72%	1.85%	1.73%	12.53	Validation data
LI-A5	0.00%	0.98%	-4.63%	0.33%	12.96	Training data
LI-A6	1.16%	0.75%	1.87%	-2.60%	12.55	Validation data
LI-A7	0.00%	-0.42%	-2.45%	0.93%	14.72	Testing data
LI-A8	0.00%	-1.92%	0.16%	2.39%	13.92	Training data
LI-A9	0.00%	0.27%	-0.04%	-3.62%	12.28	Training data
LI-A10	0.00%	0.27%	4.04%	-1.92%	16.68	Training data
LI-A11	0.26%	-0.16%	0.07%	-0.73%	10.75	Validation data
LI-A12	-0.03%	-0.99%	0.83%	0.01%	11.66	Training data
LI-M1	-0.80%	0.92%	0.27%	0.18%	12.56	Training data
LI-M2	-0.18%	-1.34%	-0.40%	2.85%	14.29	Testing data
LI-M3	0.00%	-0.81%	-6.32%	4.27%	12.12	Testing data
LI-M4	0.00%	1.42%	3.63%	0.14%	10.69	Training data
LI-M5	0.00%	-0.63%	2.94%	-7.20%	16.91	Testing data
LI-M6	0.00%	-1.27%	-1.03%	-0.22%	13.45	Training data
LI-M7	0.75%	0.83%	2.77%	0.81%	13.32	Validation data
LI-M8	0.46%	-1.05%	-1.34%	0.42%	10.58	Validation data
LI-M9	0.00%	-0.14%	2.59%	0.33%	11.92	Training data
LI-M10	0.00%	1.11%	0.26%	0.63%	10.48	Training data

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์แรงดันอิมพัลส์ และอัตราส่วนของเวลาดำเนินการเทียบกับวิธีมาตรฐาน (ประมวลผลโดยแล็ปท็อป Lenovo ThinkPad X13 10th Generation Intel® Core™ i7-10510U Processor) (ต่อ)

Case	Deviations of impulse voltage parameters.				Ratio of the execution times	Kind of samples
	A	B	α	β		
LI-M11	0.00%	1.87%	0.04%	-2.47%	10.79	Validation data
LI-M12	-0.04%	-1.82%	1.73%	-1.42%	10.45	Training data
LI-M13	0.00%	1.24%	-1.40%	0.64%	12.18	Testing data
LI-M14	0.00%	-1.61%	-7.62%	-0.17%	12.18	Training data
LI-M15	0.00%	-0.87%	1.98%	1.21%	11.16	Training data
LI-M16	0.69%	3.10%	0.99%	-0.66%	10.42	Training data
LI-M17	0.00%	0.64%	8.31%	-3.62%	10.67	Training data
LI-X1	0.00%	-2.20%	7.29%	2.38%	13.82	Testing data
LI-X2	0.00%	-1.43%	1.19%	2.56%	12.77	Testing data
LI-X3	0.00%	2.00%	7.66%	-1.38%	11.74	Testing data
ค่าเฉลี่ย					12.34	

ผลการเทรนโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คในรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์เชิงถดถอยระหว่างเอาต์พุต และค่าเป้าหมายของ Neural network ที่ประกอบด้วย 1 layer, 2 Neurons ซึ่งหากค่าความสัมพันธ์เชิงถดถอย (R) มีค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 มากเท่าใดจะยิ่งมีความแม่นยำสูง และหากเข้าใกล้ 0 จะมีความแม่นยำต่ำมาก โดยค่า R ของ Training data มีค่าเท่ากับ 0.989, ค่า R ของ Validation data มีค่าเท่ากับ 0.98493, ค่า R ของ Test data มีค่าเท่ากับ 0.98865 และค่า R รวม มีค่าเท่ากับ 0.98466 ซึ่งผลของการทดสอบการเทรนมีความแม่นยำสูง

จากตารางที่ 4.2 ตารางความเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์สมการสร้าง Base curve และระยะเวลาในการประมวลผลเปรียบเทียบกับวิธีตามมาตรฐาน ค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดของ A มีค่าเท่ากับ 1.6% ในกรณี LI-A6 ,ค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดของ B มีค่าเท่ากับ 2.20% ในกรณี LI-X1 ค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดของ α มีค่าเท่ากับ 8.31% และในกรณี LI-M17 ค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดของ β มีค่าเท่ากับ 7.20% ในกรณี LI-M5 ซึ่งค่าเบี่ยงเบนทั้งหมดอยู่ในลิมิตของค่าเบี่ยงเบนสูงสุดที่กำหนดไว้

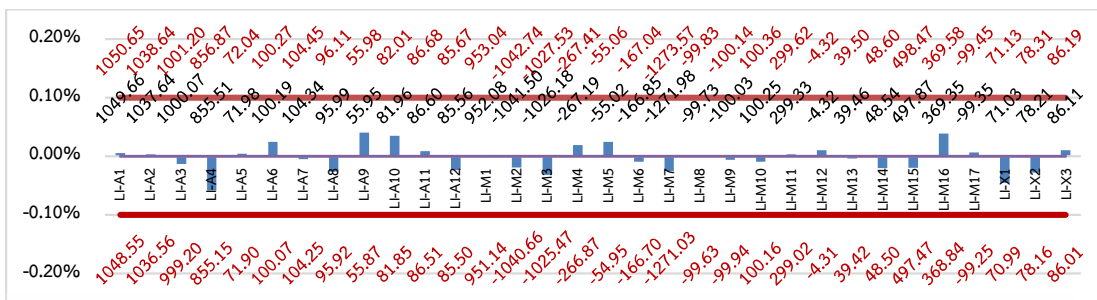
ในวิธีการประมวลผลด้วยโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีความรวดเร็วในการประมวลผลสูงกว่าวิธีตามมาตรฐานซึ่งต้องทำการคำนวณซ้ำซึ่งวิธีดังกล่าวมีความเร็วในการประมวลผลสูงกว่าการคำนวณด้วยวิธีมาตรฐานอยู่ที่ 10-16 เท่า

ในการทดสอบการประมวลผลด้วยโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในส่วนของแรงดันสูงสุด (Peak voltage) แสดงในรูปที่ 4.7 (ก) แสดงให้เห็นว่าในทุกๆกรณีเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดโดยค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต้องไม่เกิน 0.10% ซึ่งในกรณีที่มีค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดอยู่ที่กรณี LI-A4 มีค่าเท่ากับ 0.06%

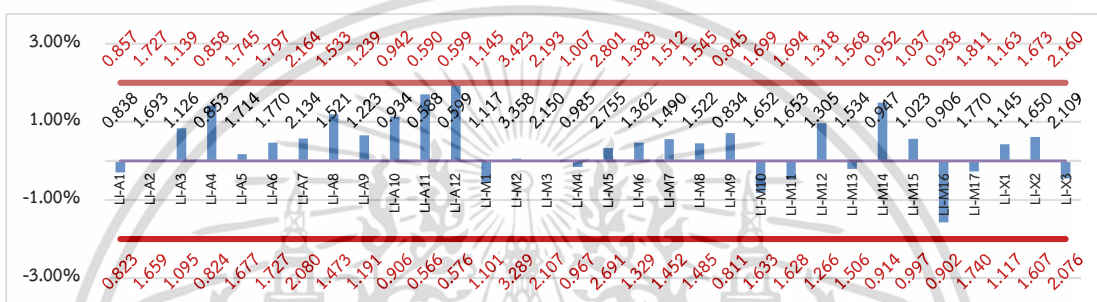
ในการทดสอบการประมวลผลด้วยโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในส่วนของระยะเวลาหน้าคลื่น (Front time) แสดงในรูปที่ 4.7 (ข) แสดงให้เห็นว่าในทุกๆกรณีเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดโดยค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต้องไม่เกิน 2.00% ซึ่งในกรณีที่มีค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดอยู่ที่กรณี LI-A12 มีค่าเท่ากับ 2.00%

ในการทดสอบการประมวลผลด้วยโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในส่วนของระยะเวลาหลังคลื่น (Time to half) แสดงในรูปที่ 4.7 (ค) แสดงให้เห็นว่าในทุกๆกรณีเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดโดยค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต้องไม่เกิน 2.00% ซึ่งในกรณีที่มีค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดอยู่ที่กรณี LI-A4 มีค่าเท่ากับ 0.12%

ในการทดสอบการประมวลผลด้วยโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในส่วนของ Over shoot rate แสดงในรูปที่ 4.7 (ง) แสดงให้เห็นว่าในทุกๆกรณีเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดโดยค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต้องไม่เกิน 1.00% ซึ่งในกรณีที่มีค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดอยู่ที่กรณี LI-A6 มีค่าเท่ากับ 0.79%



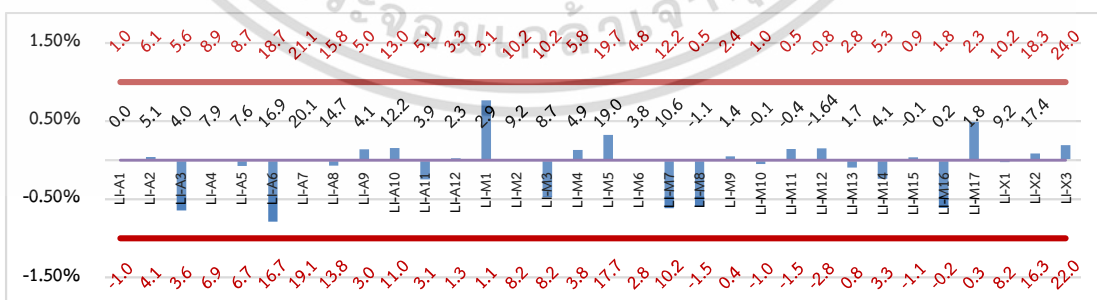
(น) Voltage Peak (U_p , kV)



(ข) Front Time (T_1 , μs)



(ค) Time to half (T_2 , μs)



(ง) Overshoot rate (B_o)

รูปที่ 4.7 ผลการประเมินจากอัลกอริทึมที่ออกแบบเทียบกับค่าความยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประมวลผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมโดยมีการมุ่งเน้นในด้านความแม่นยำให้เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐาน และพัฒนาความเร็วในด้านการประมวลผลเพื่อให้มีการประมวลผลได้รวดเร็วยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยจะอ้างอิงรูปคลื่นตามมาตรฐาน IEC61083-2 (TDG) ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 29 Case และเพื่อทดสอบความแม่นยำทางผู้วิจัยได้นำลูกคลื่นที่สร้างจากการทดลองเพิ่มเข้ามาอีกจำนวน 3 กรณี รวมเป็นทั้งหมด 32 กรณี โดยในช่วงแรกจะทำตามระเบียบวิธีที่มาตรฐานกำหนด เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง และทำการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์จำนวน 2 โมเดลดังนี้

5.1.1 โมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าโดยตรง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าโดยตรง ซึ่งใช้ระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมโดยอ้างอิงข้อมูลตามรูปคลื่นจำลอง ซึ่งถูกสร้างด้วยโปรแกรมสร้างรูปคลื่นจำลอง (TDG) ตามมาตรฐาน IEC61083-2 จำนวน 29 กรณี สำหรับเป็นตัวสร้างสมการโครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นเตรียมค่าอินพุต (Input layer) ชั้นของการประมวลผล (Hidden layer) จำนวน 1 layer, 2 Node และชั้นของการเตรียมค่าเอาต์พุต (Output layer)

หลังจากการทดสอบใช้งานโปรแกรมร่วมกับรูปคลื่นจำลองตามมาตรฐาน IEC61083-2 จำนวน 29 กรณี ร่วมกับรูปคลื่นที่สร้างจากการทดลองเพิ่มเข้ามาอีก 3 กรณี พบว่าค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของแรงดันสูงสุดคือ 0.09%, ค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของระยะเวลาหน้าคลื่นคือ 1.58%, ค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของระยะเวลาหางคลื่นคือ 1.77% และค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของ Overshoot rate คือ 0.9%

การสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ผลการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานสามารถใช้งานได้โดยมีความเร็วในการประมวลผลมากกว่าวิธีตามมาตรฐาน 12-20 เท่า ที่ดังกล่าวจะไม่สามารถแสดงรูปคลื่นที่ทำการประมวลผลได้เนื่องจากเป็นวิธีการหามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรง

5.1.2 โมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นฟ้าผ่า

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งใช้ระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมโดยอ้างอิงข้อมูลตามรูปคลื่นจำลองซึ่งถูกสร้างด้วยโปรแกรมสร้างรูปคลื่นจำลอง (TDG) ตามมาตรฐาน IEC61083-2 จำนวน 29 กรณี สำหรับเป็นตัวสร้างสมการโครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นเตรียมค่าอินพุต (Input layer) ชั้นของการประมวลผล (Hidden layer) จำนวน 1 layer, 2 Node และชั้นของการเตรียมค่าเอาต์พุต (Output layer)

หลังจากการทดสอบใช้งานโปรแกรมร่วมกับรูปคลื่นจำลองตามมาตรฐาน IEC61083-2 จำนวน 29 Case และรูปคลื่นที่สร้างจากการทดลองเพิ่มเข้ามาอีก 3 กรณี พบว่าค่าความเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์สมการสร้าง Base curve และระยะเวลาในการประมวลผลเปรียบเทียบกับวิธีตามมาตรฐาน ค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดของ A มีค่าเท่ากับ 1.6% ค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดของ B มีค่าเท่ากับ 2.20% ค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดของ α มีค่าเท่ากับ 8.31% และค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดของ β มีค่าเท่ากับ 7.20% โดยเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มาคำนวณสร้าง Base curve และทำตามกระบวนการระเบียบวิธีของมาตรฐานได้ผลคือค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของแรงดันสูงสุดคือ 0.06%, ค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของระยะเวลาหน้าคลื่นคือ 2.00%, ค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของระยะเวลาหลังคลื่นคือ 0.12% และค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของ Overshoot rate คือ 0.79%

การสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ผลการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานสามารถใช้งานได้โดยมีความเร็วในการประมวลผลมากกว่าวิธีตามมาตรฐาน 10-16 เท่า รวมทั้งสามารถสร้างรูปคลื่นแสดงเป็นรูปกราฟได้ ซึ่งเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำประยุกต์ใช้งาน

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการพัฒนาสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อทำการประมวลผลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยการระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งได้ทดลองสร้างสมการประมวลผลใน 2 รูปแบบ คือการหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรง และการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และดำเนินการสร้าง Base curve เพื่อหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารายการอ้างอิงวิธีตามมาตรฐาน ซึ่งข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์ด้วยการใช้ระเบียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำการประมวลผลหาพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสามารถทำได้ ซึ่งผลของการประมวลผลอยู่ภายในลิมิตของค่าที่มาตรฐานกำหนด
2. การประมวลผลของสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรงมีความเร็วสูงกว่าวิธีตามมาตรฐานอยู่ 12 ถึง 20 เท่าซึ่งมีความเร็วมากกว่าการประมวลผลของสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ประกอบสมการแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอยู่เล็กน้อย แต่จะไม่สามารถแสดงผลออกเป็นรูปภาพได้
3. การประมวลผลของสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ประกอบสมการลูกคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า สามารถสร้างกราฟแล้วทำการเปรียบเทียบได้ ซึ่งในความเป็นจริงการประมวลผลของโมเดลสมการเชิงคณิตศาสตร์ชุดนี้มีความน่าสนใจในการพัฒนาไปใช้ในการประมวลผลเนื่องจากได้ผลของข้อมูลครบถ้วน
4. ในการพัฒนาต่อยอดควรทำการศึกษาการสร้างโมเดลสมการ เชิงคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลในรูปคลื่นตัด เพื่อให้โปรแกรมครบถ้วนสมบูรณ์ในการใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60060-1. “High-Voltage Test Techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements,” **International standard**, Edition 3.0, 2010.
- [2] IEEE Standard “Techniques for High-Voltage Testing”, **IEEE Standard 4-2013**, 2013.
- [3] IEC 61083-2. “Instruments and software used for measurement in high-voltage and high-current Part 2: Requirements for software for tests with impulse voltages and currents,” **International standard**, Edition 1.0, 2011.
- [4] สุรินทร์ คำฝอย. โครงข่ายประสาทเทียมเชิงปฏิบัติสำหรับงานวิศวกรรมไฟฟ้า, หน้า 320 ถึง 335, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2554.
- [5] N. Pattanadech and P. Yutthagowith, "Fast curve fitting algorithm for parameter evaluation in lightning impulse test technique," **IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.**, vol. 22, no. 5, pp. 2931-2936, Oct. 2015.
- [6] P. Yutthagowith and N. Pattanadech, "Improved least square Prony analysis technique for parameter evaluation of lightning impulse voltage and current," **IEEE Trans. Power Del.**, vol. 31, no. 1, pp. 271-277, Jan. 2016.
- [7] สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, หน้า 2-27 ถึง 2-48 และ หน้า 9-1 ถึง 9-14, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 3, มีนาคม 2549.
- [8] S. Okabe, T. Tsuboi, G. Ueta, J. Takami, and H. Hirose, “Basic study of fitting method for base curve extraction in lightning impulse test techniques,” **IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.**, Vol. 17, No. 1, pp. 2–4, 2010.
- [9] G. Ueta, T. Tsuboi and S. Okabe, “Evaluation of overshoot rate of lightning impulse withstand voltage test waveform based on new base curve fitting methods - study on overshoot waveform in an actual test circuit,” **IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.**, Vol. 18, No. 3, pp. 783–791, 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] G. Ueta, T. Tsuboi and S. Okabe, "Evaluation of overshoot rate of lightning impulse withstand voltage test waveform based on new base curve fitting methods - application to practical diverse waveforms," **IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.**, Vol. 19, No. 1, pp. 352–364, 2012.
- [11] P. L. Lewin, T. N. Tran, D. J. Swaffield, and J. K. Hällström, "Zerophase 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.
- [12] 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.
- [13] F. Garnacho, A. Khamlichi, A. Valladolid, P. Simon, and R. Guirado, "Procedures to determine k- factor function for air gaps," **IEEE Trans. Power Del.**, Vol. 28, No. 2, pp. 686–692, 2013.
- [14] F. Garnacho, A. Khamlichi, A. Valladolid, P. Simon, and M. Valcarcel, "K-factor test voltage function for oscillating lightning impulses in nonhomogenous air gaps," **IEEE Trans. Power Del.**, Vol. 29, No. 5, pp. 2254–2260, 2014.
- [15] P. Simon, F. Garnacho, S. M. Berlijn, and E. Gockenbach, "Determining the test voltage factor function for the evaluation of lightning impulse with oscillation and/or an overshoot," **IEEE Trans. Power Del.**, Vol. 21, No. 2, pp. 560–566, 2006.
- [16] 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.
- [17] B. M. Wilamowski, H. Yu, "Improved Computation for Levenberg Marquardt Training," **IEEE Trans. on Neural Networks**, vol. 21, no. 6, pp. 930-937, June 2010.

ภาคผนวก ก.

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] K. Kitwattana., and P. Yutthagowith. “Lightning Impulse Voltage Parameter Evaluation Using Neuron Network Algorithm” **14th International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures (ISET)**, Kyoto, Japan, 8 Dec. 2018.
- [2] K. Kitwattana., and P. Yutthagowith. “Application of A Neural Network Algorithm for Evaluation of Lightning Impulse Voltage Parameters,” **The 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2019)**, Hong Kong, China, 12-14 June. 2019.
- [3] P. Yutthagowith., K. Kitwattana., and A. Kunakorn. “Fast and Effective Technique in Evaluation of Lightning Impulse Voltage Parameters” **Journal of Electrical Engineering & Technology**, vol. 16, pp 459–467.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISET / ISS 2018 – KYOTO
**The 12th International Symposium on
 EMC and Transients in Infrastructures**

The 14th International Student Session

8 December 2018
 Kyoto, Japan



Organized by

Doshisha University, Kyoto, Japan

In Cooperation with

University of Bologna, Bologna, Italy
 Seoul National University, Seoul, Korea

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lightning Impulse Voltage Parameter Evaluation Using Neuron Network Algorithm

Krit Kitwattana

Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang., Thailand.
highvoltage.eg@gmail.com

Peerawut Yurthagowith

Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang., Thailand
kypeeraw@kmitl.ac.th

Abstract—This paper presents the evaluation of peak voltage (U_p), Front time (T_f), Time to half (T_2) and Overshoot (B_1) of lightning Impulse voltage. The objective of this paper is to evaluate the peak voltage, front time, time to half and overshoot of lightning impulse voltage according to the standard. Input of algorithm was prepared by separating lightning impulse waveform to 15 point, starting the first point at 20% of the peak voltage at the wave front to 40% of the peak voltage at the wave tail, each point between front and tail is different by 10% of the peak voltage. The results of evaluation in peak voltage, front time, time to half, and overshoot are in accordance with the standard. Maximum absolute errors of peak voltage, front time, time to half and overshoot of lightning Impulse voltage are 0.92%, 1.72%, 1.59% and 1.00%, respectively.

Index Terms—neuron network, lightning impulse voltage, prediction, waveform parameters, curve fitting.

I. INTRODUCTION

Lightning impulse voltage is performed to evaluate insulation durability, such as the potentiality to withstand transient stress of voltage and to investigate overvoltage limitation. According to the standard the impulse voltage is generated in laboratory for applying to test objects.

In real testing for extracting the base curve, it is better to not use complex procedure. However, the testing often has oscillation and overshoot in the measured data influenced by parasitic inductance in generation circuit [1-3]. For this reason, the new standard of IEC [4] and ANSI/IEEE [5] specifies the procedure for parameter calculation of impulse voltage with superimposed oscillation and overshoot. By base curve much to reconstructed and implemented with k-factor.

There is also nonlinear fitting with least square method [6-11] i.e. Levenberg-Marquardt, Newton, Gauss-Newton method were used. In the process to develop fitting algorithm need to use waveform data provided by the test data generator (TDG) program, recommended by IEC 61083-2 [12].

Nonetheless, the nonlinear approaches have problems because the process of curve fitting method requires a great number of iterations to implement data with k-factor before calculating the waveform parameter.

This paper selects the neuron network method to predict the result of waveform parameter. This technique is non-iteration curve fitting and do not have to implement data with k-factor. The propose for fastest of evaluation in processing to determine waveform parameter.

II. METHODOLOGY

A. Standard curve fitting method

In figure 1, the standard [4-5] recommend evaluating test voltage waveforms using the frequency-dependent (k-factor) function is:

(1) Firstly, remove the wave front less than 20% of peak voltage and the wave tail more than 40% of peak voltage and thus extract the substance of the record waveform.

(2) Normalize the above waveform in order to prepare the data for fitting curve by double exponential function of equation (1) which consists of 4 parameter, A, B, α and β to get a base curve.

$$f(t) = Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t} \quad (1)$$

(3) Subtract record curve with base curve to obtain the residual curve and filtered that by k-factor filter as shown in equation (2). According to the suggestion form standard, zero phase shift IIR filter can be easily implemented form using k-factor filter recommended by Lewin et al [8].

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

(4) Test voltage curve come from combination of residual curve filter and base curve. This curve is used to evaluate

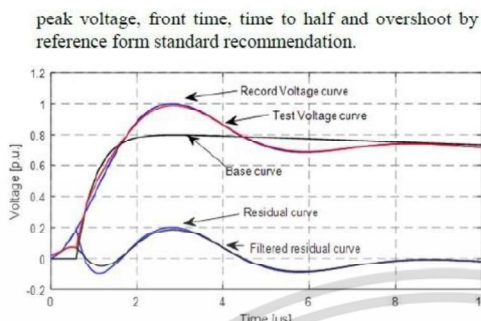


Figure 1. Process used in evaluation of impulse voltage and current waveforms.

B. Proposed curve fitting method

Proposed method using neuron network algorithm for predict the peak voltage, front time, time to half and overshoot follow is:

- (1) Remove the wave front less than 20% of peak voltage and the wave tail more than 40% of peak voltage and thus extract the substance of the record waveform.
- (2) Separate the lightning impulse waveform to 15 point, start first point at 20% of the peak voltage at the wave front to 40% of the peak voltage at the wave tail, each point between front and tail are different by 10% of the peak voltage.
- (3) Inject the time series to neuron network algorithm, calculated flow chart shown in figure 2
- (4) The finally get the result of peak voltage, front time, time to half and overshoot for decide of standard accepted.



Figure 2. Flow chart of Neuron network algorithm

III. SIMULATION

The 29 impulse voltage waveform (LI-A1 to LI-A12 and LI-M1 to LI-M17) glean from the test data generator program (TDG) [12] were used to predict the lightning impulse waveform components. The resolution of vertical is 12 bits and the sampling time step by 10 ns in all cases. The proposed method simulates lightning impulse voltage with the test data generator (TDG) 29 cases by keeping the domain time series (15 point) form recorded curve to evaluate peak voltage, front time, time to half and overshoot in the neuron network algorithm

Firstly, figure 3 shows part of preparing data input. This part injects time series domain to processing input layer, thus extracting important data by selector data and subtract with $PI_{xmin}(\text{offset})$ and multiply with PI_{gain} and added with PI_{ymin}

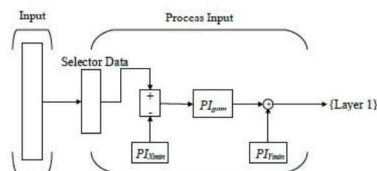


Figure 3 part of preparing data input.

Secondly, figure 4 shows part of neuron network algorithm to get the data from the above layer for multiplying and added bias. To inject data to Tansig function and Purelin function in layer 1 and layer 2, respectively.

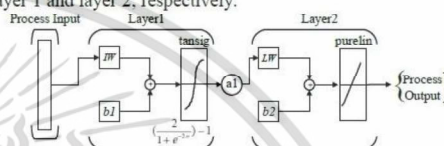


Figure 4 part of neuron network algorithm

Finally, transfer data from part of neuron network algorithm to part of preparing data output. In this process, have to subtract with PO_{ymin} and multiply with PO_{gain} and added with PO_{xmin} . The output is peak voltage, front time, time to half and overshoot. The process is shown in figure 5.

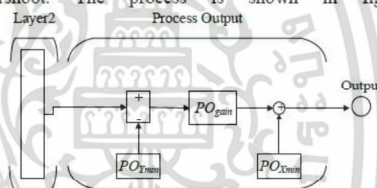


Figure 5 part of preparing data output

IV. RESULTS

The result from prediction of lightning impulse voltage components, in part of peak voltage is shown in figure 6, all of cases is in the standard. By standard is recommended to the deviation is not over 1 percent. Maximum error in this part is -0.92 percent at LI-M2 case.

In part of the Front time is shown in figure 7, all of cases is in the standard. By standard is recommended to the deviation is not over 2 percent. Maximum error in this part is -1.72 percent at LI-A12 case.

In part of time to half is shown in figure 8, all of cases is in the standard. By standard is recommended to the deviation is not over 2 percent. Maximum error in this part is -1.59 percent at LI-M11 case.

In part of overshoot is shown in figure 9, all of cases is in the standard. By standard is recommended to the deviation is not over 1 percent. Maximum error in this part is 1.00 percent at LI-A8 and LI-M12 cases.

V. CONCLUSION

This paper proposes a prediction of waveform parameters by neuron network algorithm. It does not have iteration and does not have to implement with k-factor filter. The procedure of preparing input data were separate time of record curve to 15 points for applying to a neuron network algorithm for predict the waveform components. The time of computation is far shorter than nonlinear least square method recommended by standard. In the real practice for prediction of waveform components were testing with 29 cases of waveform form test data generator program (TDG) attached with standard. The result of maximum absolute errors of peak voltage (U_p), front time (T_f), time to half (T_2) and overshoot rate (B_o) of lightning Impulse voltage are 0.92%, 1.72%, 1.59% and 1.00%, respectively.

Finally, for the waveform parameters of lightning impulse voltage using the neuron network algorithm can be used to determine the results accurately and quickly due to no iteration.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank a lady, who is an inspiration in education and research work. This research verifies that encouragement can significantly motivate and develop everything that impossible to possible. Finally, the authors are much obliged to the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for providing the facility in this research work.

REFERENCES

- [1] T. 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.
- [2] F. Gamacho, A. Khamlich, A. Valladolid, P. Simon, and R. Gaurado, "Procedures to determine k-factor function for air gaps," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 28, No. 2, pp. 686–692, 2013.
- [3] F. Gamacho, A. Khamlich, A. Valladolid, P. Simon, and M. Valcarcel, "K-factor test voltage function for oscillating lightning impulses in nonhomogenous air gaps," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 29, No. 5, pp. 2254–2260, 2014.
- [4] High-Voltage Test Techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements, IEC Standard 60060-1, 2010.
- [5] IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing, IEEE Standard 4-2013, 2013.
- [6] P. Simon, F. Gamacho, S. M. Berlijn, and E. Gockenbach, "Determining the test voltage factor function for the evaluation of lightning impulse with oscillation and/or an overshoot," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 21, No. 2, pp. 560–566, 2006.
- [7] M. Hnovo, 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.
- [8] P. L. Lewin, T. N. Tran, D. J. Swaffield, and J. K. Hallström, "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.
- [9] S. Okabe, T. Tsuboi, G. Ueta, J. Takami, and H. Hirose, "Basic study of fitting method for base curve extraction in lightning impulse test techniques," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 17, No. 1, pp. 2–4, 2010.
- [10] G. Ueta, T. Tsuboi and S. Okabe, "Evaluation of overshoot rate of lightning impulse withstand voltage test waveform based on new base curve fitting methods - study on overshoot waveform in an actual test circuit," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 18, No. 3, pp. 783–791, 2011.
- [11] G. Ueta, T. Tsuboi and S. Okabe, "Evaluation of overshoot rate of lightning impulse withstand voltage test waveform based on new base curve fitting methods - application to practical diverse waveforms," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 19, No. 1, pp. 352–364, 2012.
- [12] Instruments and Softwares 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, 2013.



K. Kitwattana obtained B. Eng. and M. Eng. in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Presently he is pursuing PhD. Eng. in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand



P. Yuthagowith received the B.Eng. and M. Eng. degrees from Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, in 1998 and 2002, respectively, and Ph. D. degree from Doshisha University, Kyoto, Japan, in 2010. He joined King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang as a Lecturer in 2007. His research interests are in area of a high voltage engineering and electromagnetic transient in power systems. Dr. Yuthagowith is also a member of International Council on Large Electric Systems (CIGRE) WG C4.37.

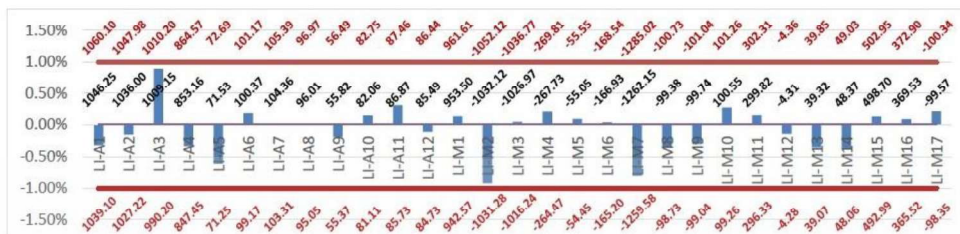


Figure 6 Values and deviation of peak voltage (U_p) in unit of kV in compare with the standard acceptance limits.

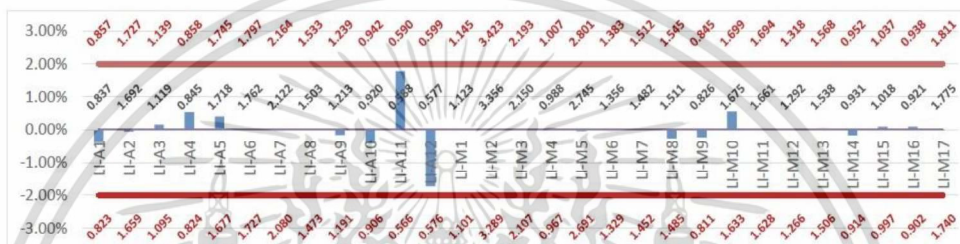


Figure 7 Values and deviation of Front time (T_f) in unit of μ s in compare with the standard acceptance limits

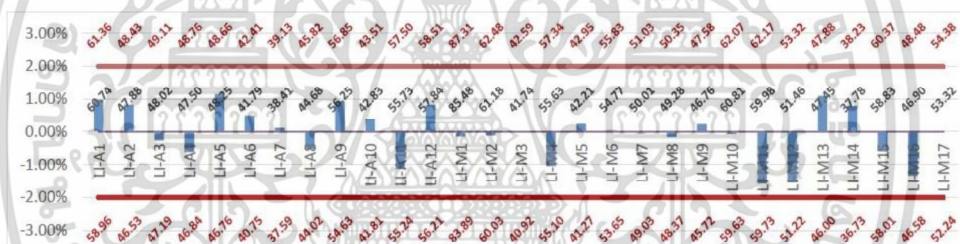


Figure 8 Values and deviation of Time to half (T_t) in unit of μ s in compare with the standard acceptance limits

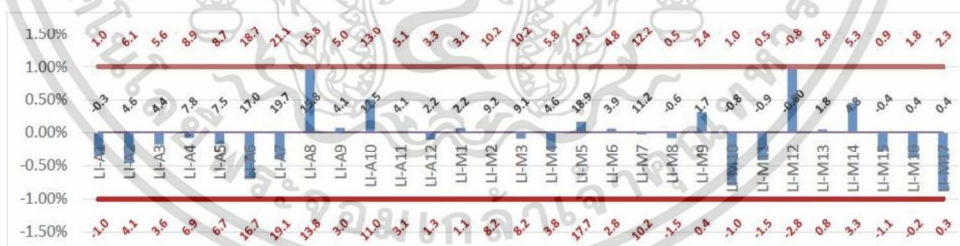


Figure 9 Values and deviation of Overshoot (B_o) in percent in compare with the standard acceptance limits

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2019
12-14 JUN
HK
APL
THE 11 ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING

ABSTRACT BOOK
The 11th Asia-Pacific International
Conference on Lightning (APL 2019)

June 12-14, 2019
Hong Kong, China

中光防雷
LIGHTNING PROTECTION

Grand Top Electric
冠图电气

IEEE
Hong Kong Section 2019

INSTITUTION OF
BUILDING SERVICES ENGINEERING
楼宇服务工程师学会

THE HONG KONG
POLYTECHNIC UNIVERSITY
香港理工大学

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Application of A Neural Network Algorithm for Evaluation of Lightning Impulse Voltage Parameters

K. Katwatana

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalongsung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
highvoltage.eg@gmail.com

P. Yuthagowith

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

Abstract— This paper presents the effective approach for the waveform evaluation of lightning impulse voltage used in insulation tests according to the IEC standard. Those parameters are composed of 4 parameters, i.e. peak voltage (U_p), front time (T_f), time to half (T_2), and overshoot rate (B_r). A neural network was applied to evaluate the waveform parameters. The input parameters of the neural network are 15 points along the recorded waveform from 20% of the peak voltage on the wave front up to 40% of the peak voltage on the wave tail. The voltage difference of the adjacent points is 10% of the peak voltage. The 29 waveforms recommended by the standard were used in the training process of the development of the network, and 2 additional experimental cases were also utilized for validation of the proposed method. The results of parameter evaluation using the proposed approach are in accordance with the standard requirement. Maximum absolute deviations of the peak voltage, the front time, the time to half, and the overshoot are 0.09%, 1.58%, 1.77%, and 0.90%, respectively. Due to no requirement of the waveform fitting process, the proposed approach has very short execution time, when it is compared to the standard recommended approach. The developed approach is a good candidate for the waveform parameter evaluation.

Keywords— curve fitting, lightning impulse voltage, neural network, waveform parameter evaluation.

I. INTRODUCTION

Lightning impulse voltage is performed to evaluate insulation durability, such as the potentiality to withstand transient stress of voltage and to investigate overvoltage limitation. According to the standard the impulse voltage is generated in laboratory for applying to test objects.

In the real testing for evaluating the waveform parameters, it is better to not use complex procedure. However, the testing voltage waveform often has oscillation and overshoot in the measured data influenced by parasitic inductance in the generation circuit [1-3]. For this reason, the standard of IEC [4] and ANSI/IEEE [5] specifies the procedure for parameter calculation of lightning impulse voltage with superimposed oscillation and overshoot based on the implementation of the base curve and the k-factor filter.

There is also nonlinear fitting with the least square methods [6-11], i.e. Levenberg-Marquardt, Newton, and Guess-Newton methods used in determination of the base curve. For confirming

the performance of the developed fitting algorithm, the developed algorithm needs to use waveform data provided by the test data generator (TDG) program, provided by IEC 61083-2 [12]. Nonetheless, the nonlinear approaches have the crucial problems, which the process of the curve fitting method requires a great number of iterations and long computation time.

This paper proposes a neural network method to determine the waveform parameters. This technique has advantages that there is no iteration process for the curve fitting and no process of the k-factor filtering. The method calculates the waveform parameters directly. Therefore, the proposed approach has very fast execution time in determination of the waveform parameters.

II. METHODOLOGY

A. Standard recommended curve fitting method

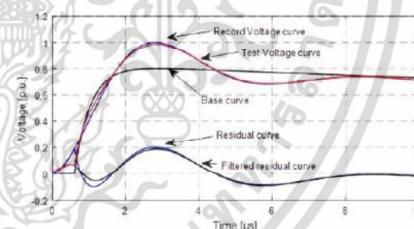


Fig. 1. Lightning impulse voltage waveforms in evaluation.

As shown in Fig. 1, the standards [4, 5, 13] recommend the approach for evaluating test voltage waveform parameters as follows:

(1) Firstly, remove the wave front less than 20% of the peak voltage and the wave tail less than 40% of peak voltage. The left waveform is called the recorded waveform used in the process of the parameter evaluation.

(2) Normalize the recorded waveform in order to prepare the data for fitting curve by two exponential function of equation (1) which consists of 4 parameters; A , B , α and β to get the base curve.

$$f(t) = Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t} \quad (1)$$

(3) Subtract the recorded curve with the base curve to obtain the residual curve, and filtered that by k-factor filter as shown in equation (2). According to the suggestion from standard, zero phase shift IIR filter can be easily implemented from using k-factor filter recommended by the standard [4, 8, 14].

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

(4) The test voltage curve is constructed from the combination of the filtered residual curve and the base curve. This curve is used to evaluate the waveform parameters, i.e. the peak voltage, the front time, the time to half, and the overshoot rate.

B. Proposed curve fitting method

The proposed method uses a neural network for evaluating the waveform parameters. The process for the parameter evaluation is as follows:

(1) Collect 15 points along the recorded waveform from 20% of the peak voltage at the wave front to 40% of the peak voltage at the wave tail as shown in Fig. 2. The voltage difference of the considered point and the adjacent point is set to be 10%. These points are employed to calculate the relative slope (S_i) as given in Eq. (3).

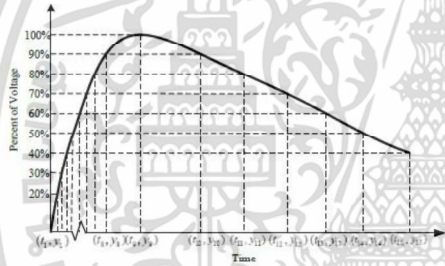


Fig. 2. The selected points on the lightning impulse voltage waveform used in the waveform parameter evaluation.

$$S_i = \frac{V_i - V_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (3)$$

(2) The 14 calculated slopes are employed as the input parameters of the neural network and the output of the network being the waveform parameters are calculated by the developed network.



Fig. 3. Process of the parameter calculation used the neural network.

Please note that in the process of the network construction, the 29 waveforms (LI-A1 to LI-A12 and LI-M1 to LI-M17) provided by the standard [12] were employed in the training process. The vertical resolution is set to be 12 bits and the sampling time step is set to be 10 ns in all cases. The neural network should not be complex, so in this paper the 2-layer network can be achieved the calculation of the accurate waveform parameters as shown in Fig. 3, and it is extracted in the matrix form for convenience in the

waveform parameter evaluation in the real practice. The details and the development process of the developed neural network are as follows;

Firstly, the raw data of the selected 15 points are used for calculation of the 14 relative slopes which are normalized with offset of PI_{xmin} , PI_{ymin} , and scaling with PI_{gain} as shown in Fig. 4 and Eq. (4).

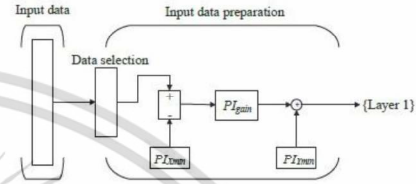


Fig. 4. Data preparing process.

$$P_{input} = (t_{input} - PI_{xmin})PI_{gain} + PI_{ymin} \quad (4)$$

Secondly, the normalized data are input to the neural network of which structure is shown in Fig. 5. The activation functions of the first and second layers are given in Eqs. (5) and (6).

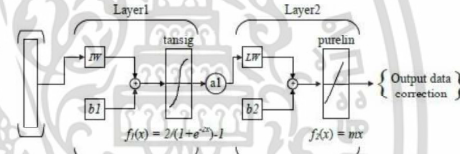


Fig. 5. Structure of the neural network.

$$f_1(x) = \left(\frac{2}{1 + e^{-2x}} \right) - 1 \quad (5)$$

$$f_2(x) = mx \quad (6)$$

Finally, the data from the neural network will be transferred to the part of the data output correction. In this process, the data from the network will be corrected using Eq. (7) with PO_{ymin} , PO_{gain} , and scaling with PO_{xmin} . The output data (the evaluated waveform parameters), i.e. the peak voltage, the front time, the time to half, and the overshoot rate will be obtained. The process of the output data correction is shown in Fig. 6.

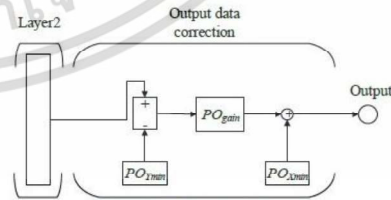


Fig. 6. Process of the output data correction.

$$P_{output} = (a2 - PO_{ymin})PO_{gain} + PO_{xmin} \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

All constant parameters in Eqs. (4) to (7) were calculated by a nonlinear least square method for matching the calculated output parameters and the values recommended by the standard. The maximum deviations of the peak voltage, the front time, the time to half, and the overshoot rate are set to be 0.1%, 2%, 2%, and 1%, respectively.

III. VALIDATION OF THE PROPOSED METHOD

The 29 impulse voltage waveforms collected from the standard and two additional waveforms collected from the experiment were used to examine the validity of the proposed method in evaluation of the waveform parameters. The two additional experimental waveforms named LI-X1 and LI-X2 have overshoot rates of 9% and 16%, respectively. The waveform parameters of these waveforms were calculated by the developed neural network. The parameters and the deviation from the standard recommended values are presented in Figs. 7 to 9.

As shown in Fig. 7, the evaluated peak voltages of all cases are within the standard acceptance limit of 0.1%. The maximum deviation of 0.09% occurs in the case of LI-M14.

As shown in Fig. 8, the evaluated front times of all cases are within the standard acceptance limit of 2%. The maximum deviation of 1.58% occurs in the case of LI-A11.

As shown in Fig. 9, the evaluated times to half of all cases are within the standard acceptance limit of 2%. The maximum deviation of 1.77% occurs in the case of LI-A5.

As shown in Fig. 10, the evaluated overshoot rates of all cases are within the standard acceptance limit of 1%. The maximum deviation of 0.9% occurs in the case of LI-X2.

IV. CONCLUSION

This paper proposes an approach based on the neural network for evaluation of the waveform parameters of the lightning voltage waveform. There is no iteration process and no implementation of the k-factor filter. Only 15 points (14 relative slopes) on the waveform are required as the input parameters of the developed neural network. The time of computation is far shorter than nonlinear least square method recommended by standard. The 29 cases of waveforms from the test data generator program (TDG) attached with the standard and the two additional experimental cases were used for validation of the proposed method. The maximum deviations of the peak voltage (U_p), the front time (T_f), the time to half (T_2), and the overshoot rate (B_o) of lightning impulse voltage are 0.09%, 1.58%, 1.77%, and 0.90%, respectively. From all evaluated results, the proposed method based on the neural network algorithm can be used to determine the waveform parameters of lightning impulse voltage accurately and quickly. Therefore, the proposed method is a good candidate for waveform parameters evaluation.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to give special thanks to High Voltage Engineering Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand for facilitating this research.

REFERENCES

- [1] T. 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.
- [2] F. Gamacho, A. Khamlichi, A. Valladolid, P. Simon, and R. Guirado, "Procedures to determine k-factor function for air gaps," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 28, No. 2, pp. 686–692, 2013.
- [3] F. Gamacho, A. Khamlichi, A. Valladolid, P. Simon, and M. Valcarcel, "K-factor test voltage function for oscillating lightning impulses in nonhomogenous air gaps," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 29, No. 5, pp. 2254–2260, 2014.
- [4] High-Voltage Test Techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements, IEC Standard 60060-1, 2010.
- [5] IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing, IEEE Standard 4-2013, 2013.
- [6] P. Simon, F. Gamacho, S. M. Berlijn, and E. Gockenbach, "Determining the test voltage factor function for the evaluation of lightning impulse with oscillation and/or an overshoot," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 21, No. 2, pp. 560–566, 2006.
- [7] M. Himov, 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.
- [8] P. L. Lewin, T. N. Tran, D. J. Swaffield, and J. K. Hallström, "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.
- [9] S. Okabe, T. Tsuboi, G. Ueta, J. Takami, and H. Hirose, "Basic study of fitting method for base curve extraction in lightning impulse test techniques," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 17, No. 1, pp. 2–4, 2010.
- [10] G. Ueta, T. Tsuboi and S. Okabe, "Evaluation of overshoot rate of lightning impulse withstand voltage test waveform based on new base curve fitting methods - study on overshoot waveform in an actual test circuit," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 18, No. 3, pp. 783–791, 2011.
- [11] G. Ueta, T. Tsuboi and S. Okabe, "Evaluation of overshoot rate of lightning impulse withstand voltage test waveform based on new base curve fitting methods - application to practical diverse waveforms," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 19, No. 1, pp. 352–364, 2012.
- [12] Instruments and Softwares 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, 2013.
- [13] H. Jouybari-Moghaddam, B. Valhidi, and S. H. Hosseini, "Rotational invariance technique for evaluation of perturbed lightning impulses," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 28, No. 1, pp. 531–533, 2013.
- [14] E. A. Feilat, "Prony analysis technique for estimation of the mean curve of lightning impulses," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 21, No. 4, pp. 2088–2090, 2006.



K. Kitwattana obtained B. Eng. and M. Eng. in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Presently he is pursuing Ph.D. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand



P. Yuthagowith received the B.Eng. and M. Eng. degrees from Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, in 1998 and 2002, respectively, and Ph. D. degree from Doshisha University, Kyoto, Japan, in 2010. He joined King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang as a Lecturer in 2007. His research interests are in area of a high voltage engineering and electromagnetic transient in power systems. Dr. Yuthagowith is also a member of International Council on Large Electric Systems (CIGRE) WG C4.37.

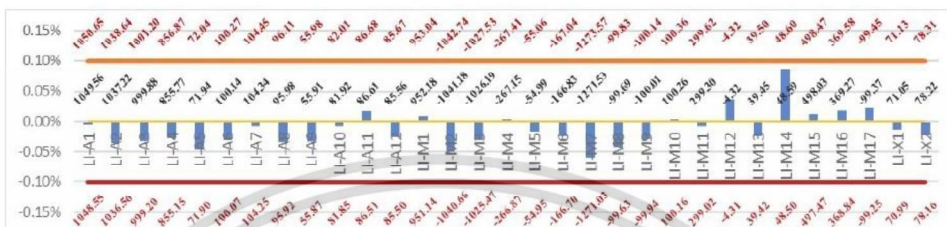


Fig. 7. Values and deviations of the peak voltage (U_p) in the unit of kV in comparison with the standard acceptance limits.

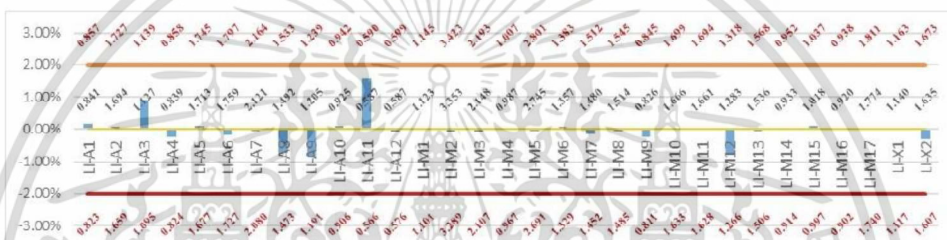


Fig. 8. Values and deviations of the front time (T_f) in the unit of μ s in comparison with the standard acceptance limit.

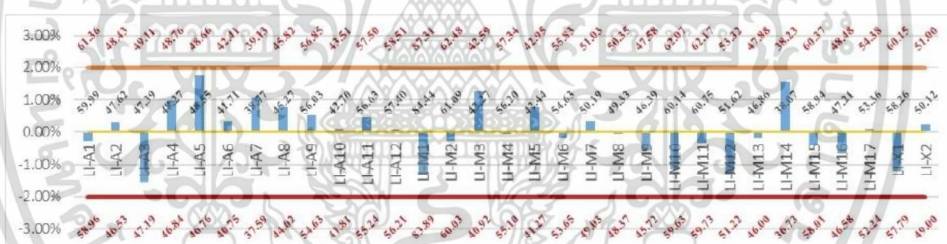


Fig. 9. Values and deviations of The time to half (T_t) in the unit of μ s in comparison with the standard acceptance limit.

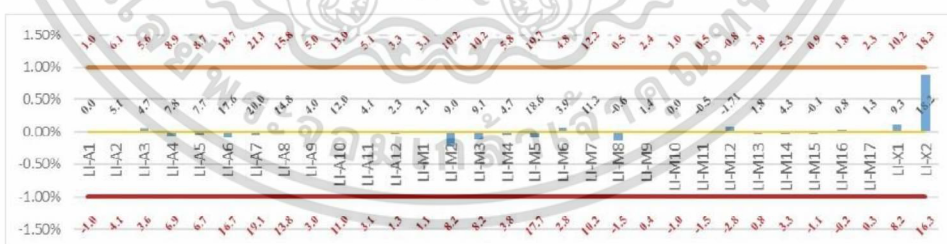


Fig. 10. Values and deviations of the overshoot rate (B_o) in percent in comparison with the standard acceptance limit.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fast and Effective Technique in Evaluation of Lightning Impulse Voltage Parameters

**Peerawut Yutthagowith, Krit Kitwattana
& Anantawat Kunakorn**

**Journal of Electrical Engineering &
Technology**

ISSN 1975-0102

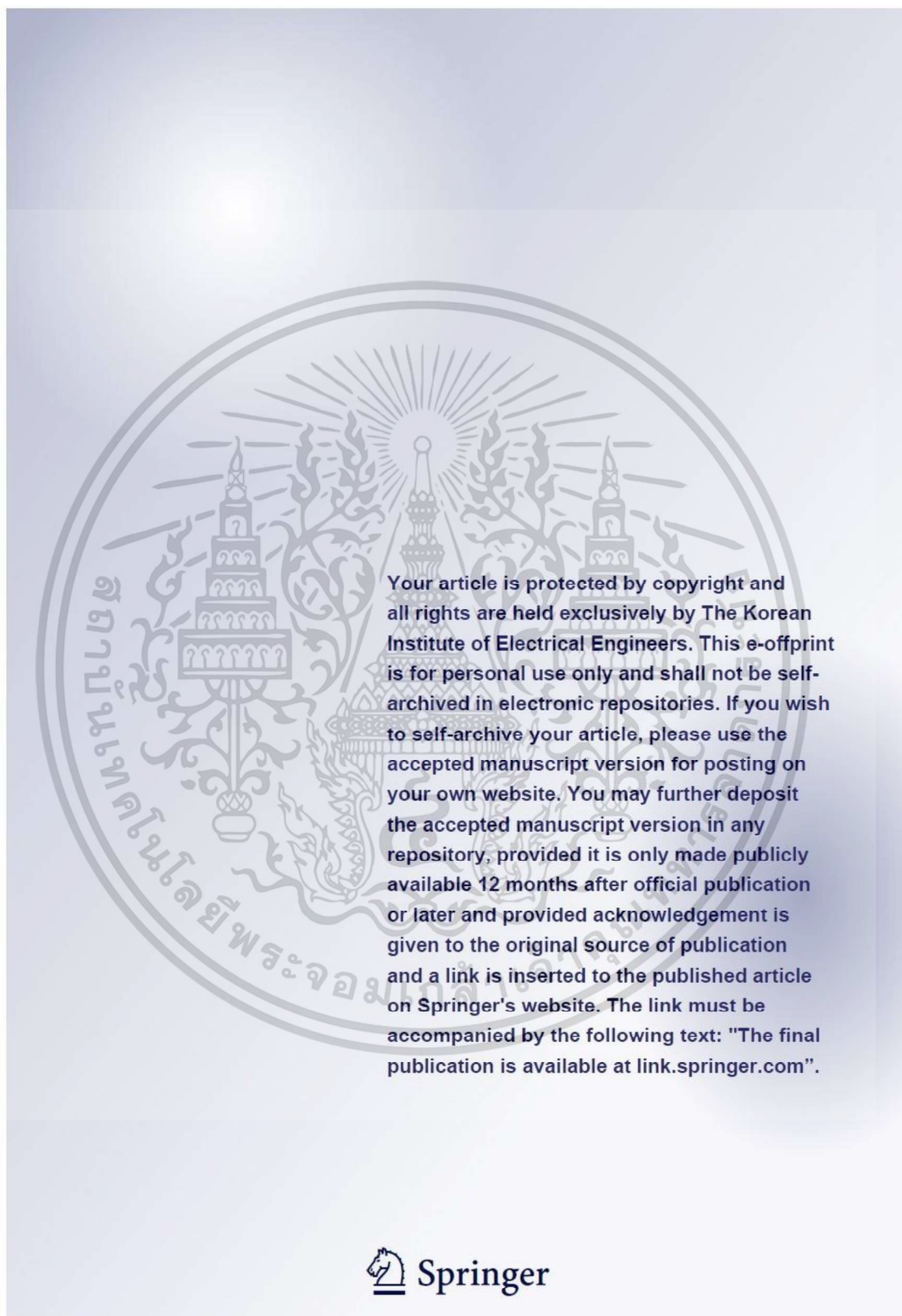
J. Electr. Eng. Technol.

DOI 10.1007/s42835-020-00555-x

**ONLINE
FIRST**

 Springer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fast and Effective Technique in Evaluation of Lightning Impulse Voltage Parameters

Peerawat Yutthagowith¹ · Krit Kitwattana¹ · Anantawat Kunakorn¹ Received: 1 March 2020 / Revised: 23 July 2020 / Accepted: 21 September 2020
© The Korean Institute of Electrical Engineers 2020

Abstract

This paper presents an approach for the waveform parameter evaluation of lightning impulse voltage in high voltage tests according to the IEC standards. Such waveform parameters are composed of peak voltage (U_p), front time (T_f), time to half (T_2), and the overshoot rate (B_e). An artificial neural network with a back-propagation learning algorithm was applied to determine a base curve and its parameters from 14 points along the recorded waveform between 20% of the peak voltage on the wave front part to 40% of the peak voltage on the wave tail part. The 29 waveforms recommended by the standard were used in the training process of the development of the network model, and some experimental cases were also utilized for verification of the proposed method. It is found that the waveform parameters evaluated by the proposed approach are in the tolerances of the standard requirements. Maximum absolute deviations of U_p , T_f , T_2 , and B_e are 0.06%, 2.00%, 0.12%, and 0.79%, respectively. Due to that no iteration process in the proposed approach is required, the efficiency in calculation process is significantly faster than the standard recommended approach.

Keywords Artificial neural network · Curve fitting · Evaluation · Lightning impulse voltage · Waveform parameters

1 Introduction

Lightning impulse voltage test is required in order to evaluate electrical power equipment insulation withstand under an overvoltage condition. The test is performed in a testing laboratory with a standard lightning impulse waveform. The international standards [1, 2] specify the standard lightning impulse waveform by waveform parameters with their tolerances, which are defined by the front time (T_f) of $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$, the time to half (T_2) of $50 \mu\text{s} \pm 20\%$, and the peak voltage depended on the voltage rating of the equipment under test.

An impulse generator with a simple resistor–capacitor circuit can produce the lightning impulse voltage waveform. However, in the actual tests, the testing waveform might often be superimposed of an oscillation and an overshoot due to a parasitic inductance in the generation circuit. Such overshoot and oscillation on the generated voltage waveform have to be taken into account in assessing the insulation withstand performance [3–5]. Therefore, the standards [1, 2] introduce the k-factor approach for evaluation of the peak voltage, which is equivalent to the peak voltage of the smooth lightning impulse voltage without oscillation and overshoot on the waveform.

In the modern impulse voltage measuring systems, the voltage waveform is recorded by a digital oscilloscope, which has an advantage over the analog oscilloscope in analysis and evaluation of waveform parameters with the digital signal processing aided tools. Therefore, standards [1, 2, 6] define a procedure in evaluation of the waveform parameters, i.e. the peak voltage (U_p), the front time (T_f), the time to half (T_2), and overshoot rate (B_e) from the raw digital recorded data (the recorded waveform) as follows:

✉ Peerawat Yutthagowith
peerawat.yu@kmitl.ac.th
Krit Kitwattana
highvoltage.eg@gmail.com
Anantawat Kunakorn
anantawat.ku@kmitl.ac.th

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1 Soi Chalangkung 1, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

- 1) Select the recorded waveform (u_r) from 20% of the peak voltage on the front part to 40% of the peak voltage on the tail part.
- 2) Fit the selected waveform stated above in (1) with two exponential functions as given in Eq. (1) which can be written in another form as Eq. (2). The fitted waveform is called the base curve (u_b).

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

$$f(t) = Ae^{-\alpha t} + Be^{-\beta t} \quad (2)$$

Parameters of A , B , C , t_d , α , and β can be determined by a nonlinear least square method.

- 3) Subtract the base curve from the waveform in (1), and the residual voltage curve is obtained.
- 4) Filter the residual voltage curve by the k -factor function expressed in Eq. (3) and Fig. 1, and the filtered residual curve is obtained. For implementation of the filter, the IIR filter with discretization in the time domain was proposed by Lewin et al. [7].

$$k(f) = \frac{1}{(1 + 2.2f^2)} \quad (3)$$

where, f is frequency in unit of MHz.

- 5) Add the filtered residual curve to the based curve, and the test voltage curve (u_t) is obtained. The relations of the recorded curve, the test voltage curve, the base curve, and the k -factor function can be expressed as Eq. (4)

$$u_t(t) = u_b(t) + k\{u_r(t) - u_b(t)\} \quad (4)$$

where, $k\{\cdot\}$ is denoted to the filtered waveform by k -factor function in Eq. (3).

Equation (4) means that the residual curve ($u_r(t) - u_b(t)$) shall be filtered to obtain the additional peak voltage, and the sum of the additional and base curve

voltages is equivalent to the smooth voltage waveform without overshoot and oscillation.

- 6) Use the test voltage curve in evaluation of the waveform parameters (U_p , T_1 , T_2 , and B_e).

The evaluated waveform according the procedure of the parameter evaluation is expressed in Fig. 2.

On the basis of the standard procedure in the parameter evaluation of the full lightning impulse voltage waveform, when a computer software is developed for analyzing lightning impulse voltage waveforms, it is necessary to verify an accuracy of the software with some test impulse waveforms generated by the test data generator (TDG) program attached with IEC 61083-2 [6]. In the standard, there are 29 cases which are named by the abbreviations of LI-A1 to LI-A12 and LI-M1 to LI-M17 [6]. These abbreviations are also in use as case studies throughout this paper to be compatible with the standard. The evaluated parameters with their tolerance limits are also provided in the standard. The maximum deviations of U_p , T_1 , T_2 , and B_e from the standard recommended values are defined by 0.1%, 2%, 2%, and 1%, respectively.

In the process for determination of the base curve using the curve fitting with two exponential functions, nonlinear least square methods [8–12], i.e. Newton, Gauss–Newton, and Levenberg–Marquardt methods are recommended. However, in some cases with high overshoot rate (B_e), a great number of iterations and long execution time are required. Also, in some specific cases, very slowly convergent is found [13, 14].

To overcome such problems, algorithms based on an integration approach [13] and a modified Prony method [14] used in evaluation of the base curve have been proposed. It is found that these base curve determination approaches give highly reasonable accuracies in parameter evaluation. Furthermore, an iteration process, which is always employed in the standard routine of a common parameter evaluation, is not required in such approaches. Instead, these approaches

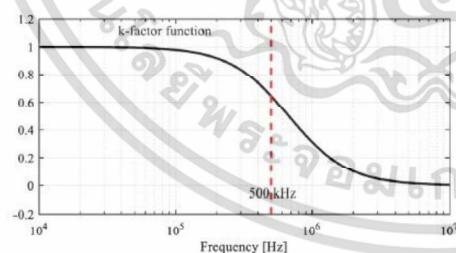


Fig. 1 The k -factor filter function

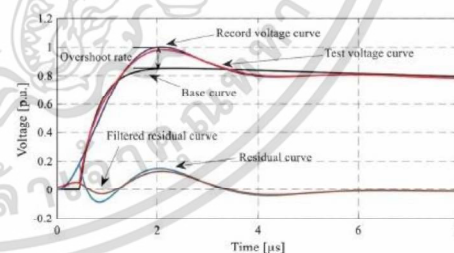


Fig. 2 Lightning impulse voltage waveform in the waveform parameter evaluation

employ the use of weighting functions. The weighting functions must be properly selected, and the selection of the weighting functions is mathematically complicated for test engineers in a laboratory.

In this paper, a fast and effective approach based on an ANN model in determination of the base curve is proposed. The low complexity model is developed. The fourteen points along the recorded waveform are selected as the input parameters of the model. Due to no iteration process requirement, the execution time for determination of the waveform parameters is fast and high accuracy compared with the standard recommended method.

2 Proposed Curve Fitting Method

An artificial neural network (ANN) model is employed in constructing a curve fitting technique used in the base curve parameter determination. There are several types of neural networks. In this paper, the multi-layer feed-forward ANN with a back-propagation learning algorithm is selected.

In the process of input parameter selection, the waveform is normalized or scaled down by the peak voltage of the recorded waveform. Then, the fifteen points composed of the initial point and the fourteen adjacent points along the waveform with increment of 10% of the voltage from 20% of the peak voltage value on the front part to 40% of the peak voltage value on the tail part are collected. As depicted in Fig. 3 and considering the initial point, the time parameter of t_0 is set to the starting time ($t_0=0$), and the other time parameters are redefined as t_1 to t_{14} . These time parameters of the fourteen points along the waveform, are selected as input parameters. The output parameters of the model are set to be the base curve parameters (A, B, α , and β) as given in Eq. (2).

In the training process, 29 lightning impulse voltage waveforms (LI-A1 to LI-A12 and LI-M1 to LI-M17) from the TDG program were selected as training data. The specification of the typical digital oscilloscope used in the lightning

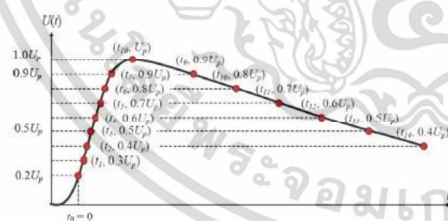


Fig. 3 The selected points (the initial point and the fourteen adjacent points) on the lightning impulse voltage waveform used in the waveform parameter evaluation

impulse voltage measurement should be considered. Therefore, the vertical resolution is set to be 12 bits, and the sampling time step is set to be 10 ns in all cases. In this paper, an ANN model with simplicity is concerned.

It is found that the dimension of the developed model has three layers composed of an input layer with 14 neurons, a hidden layer with two neurons, and an output layer with a neuron as it is depicted in Fig. 4. The mathematical function of a neuron is composed of weighting, summation, biasing, and activating by an activation function as shown in Fig. 5. The training procedure is also presented in Fig. 6. The developed models were trained to obtain the output matching with the base curve parameters (A, B, α , and β) evaluated by the standard recommended method (Levenberg–Marquardt method). The maximum deviations of the base curve parameters, i.e. A, B, α , and β were set to be 3.5%, 3.5%, 10% and 10%, respectively. With these setting maximum deviations, the developed model still has an acceptable performance in evaluation of the waveform

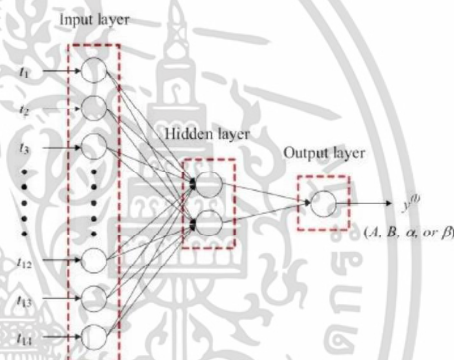


Fig. 4 The ANN model used in the waveform parameter evaluation

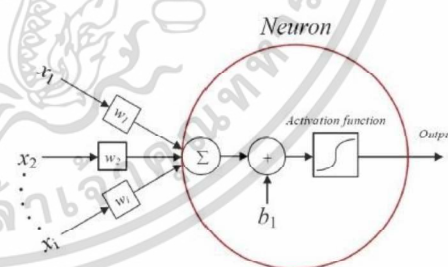


Fig. 5 Mathematical function of a neuron in an ANN model

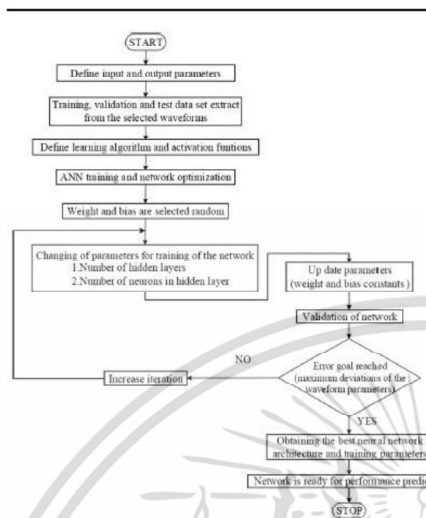


Fig. 6 Flowchart of an ANN training

parameters (U_p , T_1 , T_2 , and B_c) precisely. It is noted that the maximum deviations can be set to be lower than the specified ones, but the model will have high complexity, and be improper in a software development process.

It is noted that in the training process for determine the network models, many iterations are required as pre-calculation. However, due to the fact that the number of the considered parameters is less than ten and the developed model is not complicated, the training process requires short execution time. Furthermore, the developed network

can be extracted in the matrix form, which can be used to determine the base curve without iteration. Therefore, the proposed approach is very fast, and it can be utilized the lightning waveform parameters effectively.

For simplicity and reduction of the model dimension, weighting and bias constants of the output layer are transferred to include in weighting and bias constants of the hidden layer. Therefore, the predicted output parameters from the developed model can be calculated by Eq. (5), where $y^{(l)}$ (A , B , α , or β) is a predicted parameter of (l), $w_{1,ij}^{(l)}$ and $b_{1,ij}^{(l)}$ are weighting and bias constants of the input layer associated with an input parameter of i and a neuron of j of the hidden layer, respectively. $w_{2,j}^{(l)}$ and $b_{2,j}^{(l)}$ are weighting and bias parameters of the hidden layer associated with neuron of j of the hidden layer, respectively. $f(\cdot)$ is a selected activation function being a Tansig function as given in Eq. (6).

$$y^{(l)} = \sum_{j=1}^n \left\{ w_{2,j}^{(l)} f \left(\sum_{i=1}^N \left(w_{1,ij}^{(l)} \cdot t_i + b_{1,ij}^{(l)} \right) \right) + b_{2,j}^{(l)} \right\} \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (6)$$

For convenience in calculation, Eq. (5) can be rewritten in the matrix form as Eq. (6), where $W_1^{(l)}$ and $B_1^{(l)}$ are a weighting matrix and a bias vector of the input layer, respectively. $W_2^{(l)}$ and $B_2^{(l)}$ are a weighting matrix and a bias vector of the hidden layer, respectively.

$$y^{(l)} = W_2^{(l)} \left\{ f \left(W_1^{(l)} t + B_1^{(l)} \right) \right\} + B_2^{(l)} \quad (7)$$

The values of $W_1^{(l)}$, $W_2^{(l)}$, $B_1^{(l)}$, and $B_2^{(l)}$ are given as Eqs. (8)–(11).

$$(W_1^{(A)})^T = \begin{bmatrix} -61.506 & 18.159 \\ 26.755 & -5.808 \\ 12.400 & 0.594 \\ 24.522 & -18.076 \\ -3.162 & 11.162 \\ -1.645 & 4.141 \\ -7.514 & -2.029 \\ -3.587 & -0.421 \\ -0.993 & -0.538 \\ -0.642 & 0.028 \\ -0.008 & -0.422 \\ -0.528 & -0.076 \\ -0.011 & 0.244 \\ 0.090 & 0.116 \end{bmatrix} \times 10^5$$

$$(W_1^{(B)})^T = \begin{bmatrix} 51.667 & -146.764 \\ -91.626 & -149.886 \\ -214.953 & 60.025 \\ -47.346 & -7.743 \\ 69.943 & 38.234 \\ -35.945 & 24.661 \\ 1.686 & -13.733 \\ 30.821 & 1.307 \\ -3.264 & 1.841 \\ -0.494 & -1.823 \\ -0.932 & -0.960 \\ 1.007 & -0.225 \\ 0.212 & 0.109 \\ -0.476 & 0.641 \end{bmatrix} \times 10^5$$

$$(W_1^{(C)})^T = \begin{bmatrix} 26.044 & 18.918 \\ 18.180 & -15.102 \\ -29.064 & -7.234 \\ -17.291 & 8.817 \\ -7.753 & -2.914 \\ 1.410 & 16.576 \\ -0.737 & 2.566 \\ -3.743 & -1.215 \\ 0.151 & 0.812 \\ -0.344 & -0.087 \\ -0.346 & 0.184 \\ -0.027 & 0.293 \\ 0.215 & 0.191 \\ 0.184 & -0.149 \end{bmatrix} \times 10^5$$

$$(W_1^{(D)})^T = \begin{bmatrix} 130.890 & 131.970 \\ -222.122 & 387.183 \\ 116.380 & 22.135 \\ -116.856 & -28.745 \\ -63.227 & -1.959 \\ 55.074 & -1.559 \\ -4.837 & 39.078 \\ -0.587 & -9.766 \\ 2.634 & 2.554 \\ 1.537 & 6.366 \\ 2.301 & 1.219 \\ -1.117 & -3.095 \\ -3.740 & -3.223 \\ -3.402 & -0.034 \end{bmatrix} \times 10^4$$

$$\begin{aligned} W_2^{(A)} &= [-1.244 \quad -1.598] \times 10^{-1} \\ W_2^{(B)} &= [4.733 \quad 7.692] \times 10^{-2} \\ W_2^{(C)} &= [-4.137 \quad -3.383] \times 10^{-5} \\ W_2^{(D)} &= [-34.917 \quad 9.436] \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} B_1^{(A)} &= \begin{bmatrix} 1.150 \\ -0.012 \end{bmatrix}, B_1^{(B)} = \begin{bmatrix} 4.784 \\ -0.856 \end{bmatrix} \\ B_1^{(C)} &= \begin{bmatrix} 3.653 \\ 1.819 \end{bmatrix}, B_1^{(D)} = \begin{bmatrix} -0.273 \\ -2.837 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} B_2^{(A)} &= 9.209 \times 10^{-1} \\ B_2^{(B)} &= -7.916 \times 10^{-1} \\ B_2^{(C)} &= -1.881 \times 10^{-4} \\ B_2^{(D)} &= -5.472 \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (11)$$

After the base curve with the predicted parameters from the developed model is obtained, the test voltage and its waveform parameters can be determined by the procedures (4)–(7) recommended by the standard.

3 Validation of the Proposed Method

For validation of the proposed approach, the developed ANN models were applied to evaluate the waveform parameters. Twenty-nine cases (From LI-A1 to LI-A12 and from LI-M1 to LI-M17) from the TDG and some additional cases with various overshoot rates from 9 to 25% were considered. Only three cases with the overshoot rate of 9.2%, 17.4% and 23.2% (LI-X1, LI-X2 and LI-X3) were selected to present in this paper. In cases of the collected from TDG, the evaluated parameters by the proposed approach are compared with parameters provided by the standard. In case of the additional cases, the evaluated parameters by the proposed approach are compared with parameters from the standard recommended method [6].

In Table 1, the deviations of base curve parameters and the ratios of the execution times in comparison with those of the standard recommended method are presented. The maximum deviation of A , B , α and β are 1.16% occurring in case of LI-A6, -2.20% occurring in case of LI-X1, 8.31% occurring in case of LI-M17 and -7.20% occurring in case of LI-M5, respectively. It is found that all base parameters (A , B , α , or β) evaluated the proposed method are in the limit of the setting maximum deviations. The waveform parameters and the deviations are presented in Fig. 7. As shown in Fig. 7a, the evaluated peak voltages of all cases are within the standard acceptance limit of 0.1%. The maximum deviation of 0.06%

occurs in the case of LI-A4. In Fig. 7b, the evaluated front times of all cases are within the standard acceptance limit of 2%. The maximum deviation of 2.00% occurs in the case of LI-A12. In Fig. 7c, the evaluated times to half of all cases are within the standard acceptance limit of 2%. The maximum deviation of 0.12% occurs in the case of LI-A4. In Fig. 7d, the evaluated overshoot rates of all cases are within the standard acceptance limit of 1%. The maximum deviation of 0.79% occurs in the case of LI-A6. In addition, the proposed method is faster and more efficient than the standard recommended method in terms of the execution time due to no iteration process involved in the proposed method. The ratios of the execution times (execution time of the standard method/execution time of the proposed method) are about ten upto sixteen as expressed in Table 1.

In this paper, only some results of the test cases are depicted in Figs. 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 and 15. The blue solid lines stand for recorded waveform collected from TDG or the experiments, the black solid lines represent the base curves evaluated by the proposed method, and the red dotted lines denote the test voltage curves calculated by the proposed method.

4 Conclusions

In this paper, an artificial neural network (ANN) model with a back-propagation learning algorithm has been applied for prediction of the base curve parameters and evaluation of the waveform parameters of the lightning voltage waveform. The fourteen points along the normalized waveform were selected as the input parameters of the developed models. The developed ANN models with low complexity are composed of three layers, i.e. an input layer with 14 neurons, a hidden layer with two neurons, and an output layer with a neuron. The 29 waveforms generated by the test data generator (TDG) program were employed in the training process of the model development. The models have been validated by the 29 cases from TDG program and some additional experiment cases with different overshoot rates. It is found that the developed models can predict the waveform parameters accurately. The maximum deviations of the peak voltage (U_p), the front time (T_f), the time to half (T_2), and the overshoot rate (B_p) of lightning Impulse voltage are 0.06%, 2.00%, 0.12%,

Table 1 Deviation of impulse voltage parameter and the ratio of the execution times of the standard recommended and proposed methods

Case	Deviations of impulse voltage parameters				Ratio of the execution times
	A (%)	B (%)	α (%)	β (%)	
LI-A1	0.00	0.53	-0.45	0.09	11.12
LI-A2	0.00	0.12	-0.61	-0.26	12.39
LI-A3	0.66	-0.85	-0.28	-0.09	10.87
LI-A4	0.00	-1.72	1.85	1.73	12.53
LI-A5	0.00	0.98	-4.63	0.33	12.96
LI-A6	1.16	0.75	1.87%	-2.60	12.55
LI-A7	0.00	-0.42	-2.45	0.93	14.72
LI-A8	0.00	-1.92	0.16	2.39	13.92
LI-A9	0.00	0.27	-0.04	-3.62	12.28
LI-A10	0.00	0.27	4.04	-1.92	16.68
LI-A11	0.26	-0.16	0.07	-0.73	10.75
LI-A12	-0.03	-0.99	0.83	0.01	11.66
LI-M1	-0.80	0.92	0.27	0.18	12.56
LI-M2	-0.18	-1.34	-0.40	2.85	14.29
LI-M3	0.00	-0.81	-6.32	4.27	12.12
LI-M4	0.00	1.42	3.63	0.14	10.69
LI-M5	0.00	-0.63	2.94	-7.20	16.91
LI-M6	0.00	-1.27	-1.03	-0.22	13.45
LI-M7	0.75	0.83	2.77	0.81	13.32
LI-M8	0.46	-1.05	-1.34	0.42	10.58
LI-M9	0.00	-0.14	2.59	0.33	11.92
LI-M10	0.00	1.11	0.26	0.63	10.48
LI-M11	0.00	1.87	0.04	-2.47	10.79
LI-M12	-0.04	-1.82	1.73	-1.42	10.45
LI-M13	0.00	1.24	-1.40	0.64	12.18
LI-M14	0.00	-1.61	-7.62	-0.17	12.18
LI-M15	0.00	-0.87	1.98	1.21	11.16
LI-M16	0.69	3.10	0.99	-0.66	10.42
LI-M17	0.00	0.64	8.31	-3.62	10.67
LI-X1	0.00	-2.20	7.29	2.38	13.82
LI-X2	0.00	-1.43	1.19	2.56	12.77
LI-X3	0.00	2.00	7.66	-1.38	11.74

and 0.79%, respectively. In addition, due to no iteration process involved, the execution time of the proposed approach is far shorter than the standard recommended method (around ten upto sixteen times). Therefore, the proposed method is a good candidate the full lightning waveform parameter evaluation.

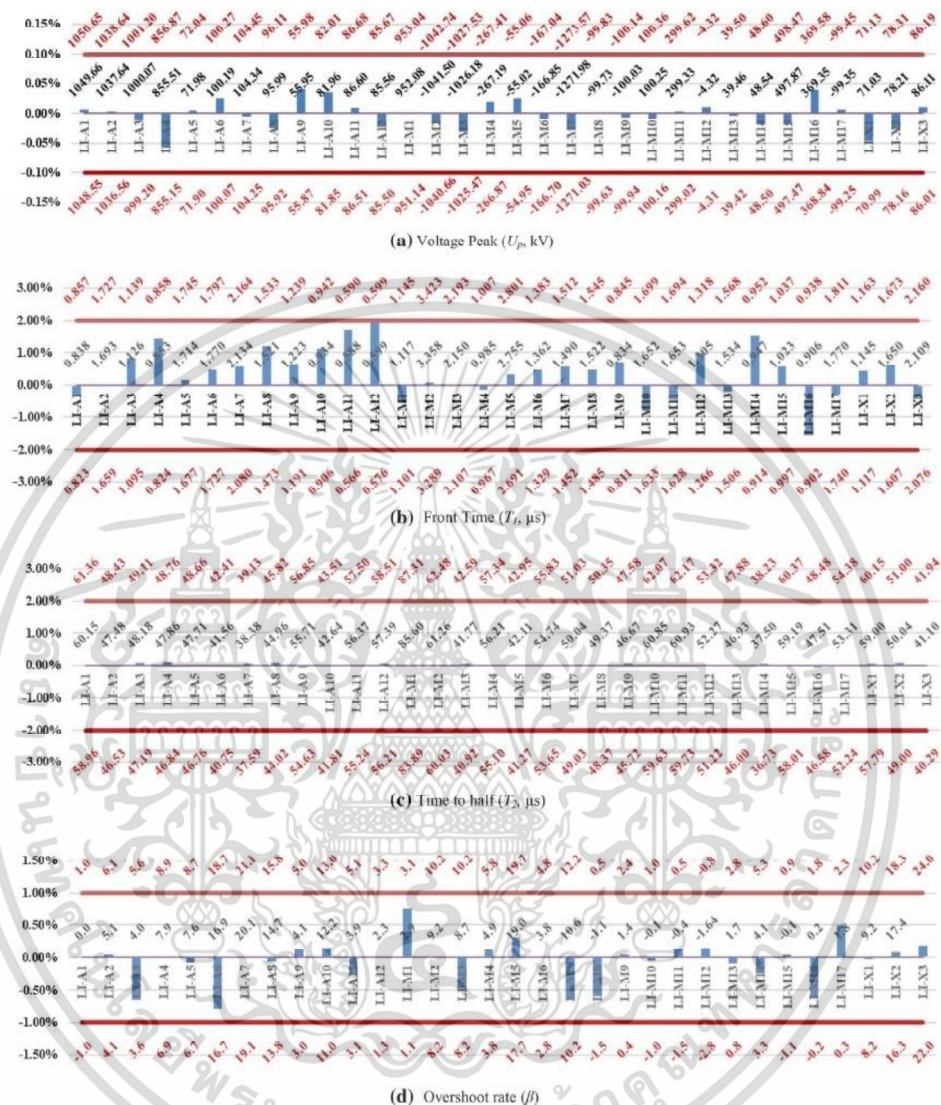


Fig. 7 Value of waveform parameter evaluated by proposed in comparison of acceptance standard value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

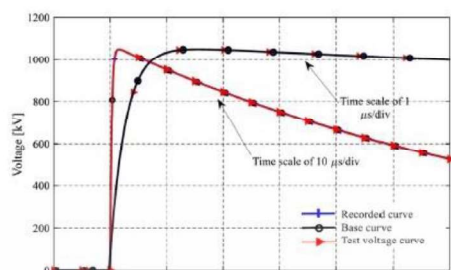


Fig. 8 The test data signal, test voltage, and base voltage waveforms evaluated by the proposed method in case LI-A1

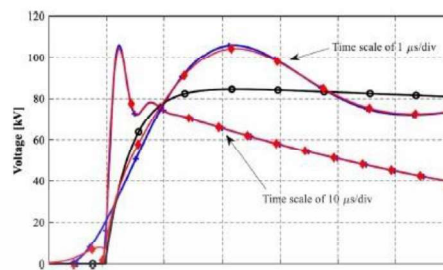


Fig. 11 The test data signal, test voltage, and base voltage waveforms evaluated by the proposed method in case LI-A7

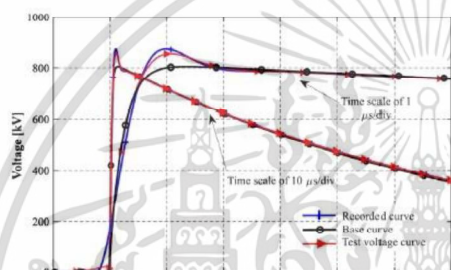


Fig. 9 The test data signal, test voltage, and base voltage waveforms evaluated by the proposed method in case LI-A4

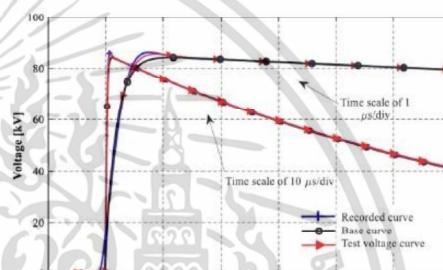


Fig. 12 The test data signal, test voltage, and base voltage waveforms evaluated by the proposed method in case LI-A12

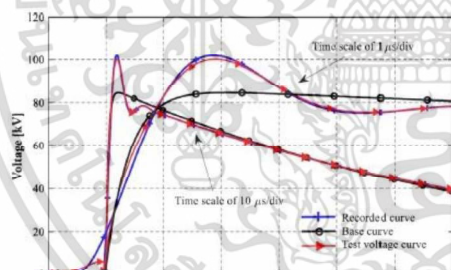


Fig. 10 The test data signal, test voltage, and base voltage waveforms evaluated by the proposed method in case LI-A6

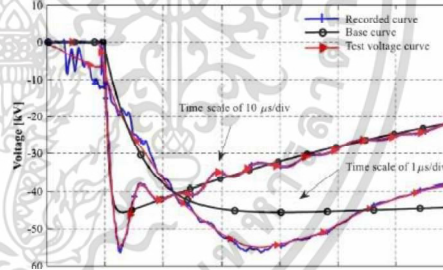


Fig. 13 The test data signal, test voltage, and base voltage waveforms evaluated by the proposed method in case LI-M5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

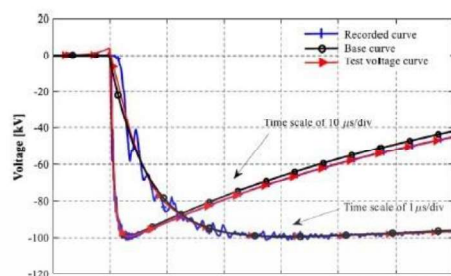


Fig. 14 The test data signal, test voltage, and base voltage waveforms evaluated by the proposed method in case LI-M17

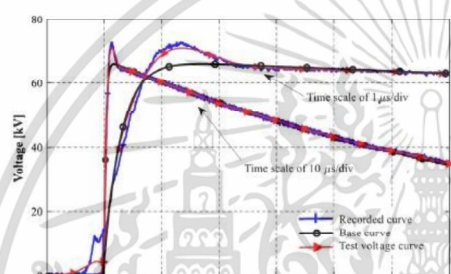


Fig. 15 The test data signal, test voltage, and base voltage waveforms evaluated by the proposed method in case LI-X1

Acknowledgements The authors wish to give special thanks to High Voltage Engineering Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand for facilitating this research.

References

- (2010) High-voltage test techniques part 1: general definitions and test requirements. IEC Standard 60060-1
- (2013) IEEE standard techniques for high-voltage testing. IEEE Standard 4-2013
- Tsuboi T, Ueta G, Okabe S, Shimizu Y, Ishikura T, Hino E (2013) K-factor value and front-time-related characteristics in negative polarity lightning impulse test for UHV-class air insulation. *IEEE Trans Power Deliv* 28(2):1148–1155
- Garnacho F, Khamlichi A, Valladolid A, Simon P, Guirado R (2013) Procedures to determine k-factor function for air gaps. *IEEE Trans Power Deliv* 28(2):686–692
- Garnacho F, Khamlichi A, Valladolid A, Simon P, Valcarcel M (2014) K-factor test voltage function for oscillating lightning impulses in nonhomogenous air gaps. *IEEE Trans Power Deliv* 29(5):2254–2260
- (2013) Instruments and softwares 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
- Lewin PL, Tran TN, Swaffield DJ, Hallström JK (2010) Zero-phase filtering for lightning impulse evaluation: a k-factor filter for the revision of IEC60060-1 and -2. *IEEE Trans Power Deliv* 23(1):3–12
- Simon P, Garnacho F, Berlijn SM, Gockenbach E (2006) Determining the test voltage factor function for the evaluation of lightning impulse with oscillation and/or an overshoot. *IEEE Trans Power Deliv* 21(2):560–566
- Hinow M, Hauschild W, Gockenbach E (2010) Lightning impulse voltage and overshoot evaluation proposed in drafts of IEC 60060-1 and future UHV testing. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 17(5):1628–1634
- Okabe S, Tsuboi T, Ueta G, Takami J, Hirose H (2010) Basic study of fitting method for base curve extraction in lightning impulse test techniques. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 17(1):2–4
- Ueta G, Tsuboi T, Okabe S (2011) Evaluation of overshoot rate of lightning impulse withstand voltage test waveform based on new base curve fitting methods - study on overshoot waveform in an actual test circuit. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 18(3):783–791
- Ueta G, Tsuboi T, Okabe S (2012) Evaluation of overshoot rate of lightning impulse withstand voltage test waveform based on new base curve fitting methods - application to practical diverse waveforms. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 19(1):352–364
- Pattanadech N, Yuthagowith P (2015) Fast curve fitting algorithm for parameter evaluation in lightning impulse test technique. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 22(5):2931–2936
- Yuthagowith P, Pattanadech N (2016) Improved least square Prony analysis technique for parameter evaluation of lightning impulse voltage and current. *IEEE Trans Power Deliv* 31(1):271–277

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Peerawat Yuthagowith received the B. Eng. and M. Eng. degrees in electrical engineering from Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, in 1998 and 2002, respectively, and Ph. D. degree in electrical engineering from Doshisha University, Kyoto, Japan, in 2010. Dr. Yuthagowith joined King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang in 2007. His research interests are in area of a high voltage engineering and electromagnetic transient in power systems. He is a member of International Council on Large Electric Systems (CIGRE) WG C4.37. He is also an exceptional reviewer of the IEEE Transactions on Power delivery and a regular reviewer of the IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, the IEEE Transactions on Industry Applications, and the Electric Power Systems Research.

Krit Kitwattana obtained B. Eng. and M. Eng. in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Presently he is pursuing Ph.D. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

Anantawat Kunakorn graduated with his B. Eng. (Hons) in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand in 1992. He received his M. Sc in Electrical Power Engineering from University of Manchester, UK in 1996, and his Ph.D. degree in Electrical Engineering from Heriot-Watt University, Scotland, UK in 2000. He is currently an associate professor at the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. He is a member of IEEE. His research interests are electrical machines and electromagnetic transients in power systems.

ภาคผนวก ข.

ค่าแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LI) อ้างอิงและค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

Designation in test data generator	Description	U_t		T_1		T_2		β'	
		Reference Value kV	Acceptance Limit % of U_t	Reference Value μs	Acceptance Limit % of T_1	Reference Value μs	Acceptance Limit % of T_2	Reference Value %	Acceptance Limit %, abs.
LI-A1	Superposition of two ideal exponential functions	1 049.6	± 0.10	0.840	± 2	60.16	± 1.0	0.0	± 1.0
LI-A2	Slow oscillations	1 037.6	± 0.10	1.693	± 2	47.48	± 1.0	5.1	± 1.0
LI-A3	Fast oscillations	1 000.2	± 0.10	1.117	± 2	48.15	± 1.0	4.6	± 1.0
LI-A4	Overshoot 8%, f = 500 kHz	856.01	± 0.10	0.841	± 2	47.80	± 1.0	7.9	± 1.0
LI-A5	Overshoot 8%, $f = 200$ kHz	71.972	± 0.10	1.711	± 2	47.71	± 1.0	7.7	± 1.0
LI-A6	Overshoot 18%, $f = 200$ kHz	100.17	± 0.10	1.762	± 2	41.58	± 1.0	17.7	± 1.0
LI-A7	Overshoot 20%, $f = 200$ kHz	104.35	± 0.10	2.122	± 2	38.36	± 1.0	20.1	± 1.0
LI-A8	Overshoot 15 %, $f = 250$ kHz	96.012	± 0.10	1.503	± 2	44.92	± 1.0	14.8	± 1.0

Designation in test data generator	Description	U_t		T_1		T_2		Be	
		Reference Value kV	Acceptance Limit % of U_t	Reference Value μ s	Acceptance Limit % of T_1	Reference Value μ s	Acceptance Limit % of T_2	Reference Value %	Acceptance Limit %, abs.
LI-A9	Overshoot 4 %, $f = 300$ kHz	55.928	± 0.10	1.215	± 2	55.74	± 1.0	4.0	± 1.0
LI-A10	Overshoot 12 %, $f = 400$ kHz	81.929	± 0.10	0.924	± 2	42.66	± 1.0	12.0	± 1.0
LI-A11	Overshoot 4 %, $f = 800$ kHz	86.597	± 0.10	0.578	± 2	56.37	± 1.0	4.1	± 1.0
LI-A12	Overshoot 2 %, $f = 900$ kHz	85.584	± 0.10	0.587	± 2	57.36	± 1.0	2.3	± 1.0
LI-A9	Overshoot 4 %, $f = 300$ kHz	55.928	± 0.10	1.215	± 2	55.74	± 1.0	4.0	± 1.0
LI-A10	Overshoot 12 %, $f = 400$ kHz	81.929	± 0.10	0.924	± 2	42.66	± 1.0	12.0	± 1.0
LI-A11	Overshoot 4 %, $f = 800$ kHz	86.597	± 0.10	0.578	± 2	56.37	± 1.0	4.1	± 1.0
LI-A12	Overshoot 2 %, $f = 900$ kHz	85.584	± 0.10	0.587	± 2	57.36	± 1.0	2.3	± 1.0

Designation in test data generator	Description	U_t		T_1		T_2		Be	
		Reference Value kV	Acceptance Limit % of U_t	Reference Value μs	Acceptance Limit % of T_1	Reference Value μs	Acceptance Limit % of T_2	Reference Value %	Acceptance Limit %, abs.
LI-M1	Front Oscillations	952.09	± 0.10	1,123	± 2	85.60	± 1.0	2.1	± 1.0
LI-M2	Long duration overshoot	-1,041.7	± 0.10	3,356	± 2	61.25	± 1.0	9.2	± 1.0
LI-M3	Short duration overshoot	-1,026.5	± 0.10	2,150	± 2	41.75	± 1.0	9.2	± 1.0
LI-M4	Oscillations, transformer testing	-267.14	± 0.10	0.987	± 2	56.22	± 1.0	4.8	± 1.0
LI-M5	Oscillations, transformer testing	-55.003	± 0.10	2.746	± 2	42.11	± 1.0	18.7	± 1.0
LI-M6	Oscillations, transformer testing	-166.87	± 0.10	1.356	± 2	54.74	± 1.0	3.8	± 1.0

Designation in test data generator	Description	U_t		T_1		T_2		Be	
		Reference Value kV	Acceptance Limit % of U_t	Reference Value μs	Acceptance Limit % of T_1	Reference Value μs	Acceptance Limit % of T_2	Reference Value %	Acceptance Limit %, abs.
LI-M7	Oscillations, transformer testing	-1,272.3	± 0.10	1.482	± 2	50.03	± 1.0	11.2	± 1.0
LI-M8	Long front, Smooth	-99.732	± 0.10	1.515	± 2	49.36	± 1.0	-0.5	± 1.0
LI-M9	Short front, some overshoot	-100.04	± 0.10	0.828	± 2	46.65	± 1.0	1.4	± 1.0
LI-M10	Heavy front oscillations	100.26	± 0.10	1.666	± 2	60.85	± 1.0	0.0	± 1.0
LI-M11	Heavy front oscillations	299.32	± 0.10	1.661	± 2	60.95	± 1.0	-0.5	± 1.0
LI-M12	Changing offset level, oscillations at peak	-4.3193	± 0.10	1.292	± 2	52.27	± 1.0	-1.8	± 1.0
LI-M13	Oscillations after onset	39.460	± 0.10	1.537	± 2	46.94	± 1.0	1.8	± 1.0

Designation in test data generator	Description	U_t		T_1		T_2		Be	
		Reference Value kV	Acceptance Limit % of U_t	Reference Value μ s	Acceptance Limit % of T_1	Reference Value μ s	Acceptance Limit % of T_2	Reference Value %	Acceptance Limit %, abs.
LI-M14	Oscillations after onset, and overshoot	48.549	± 0.10	0.933	± 2	37.48	± 1.0	4.3	± 1.0
LI-M15	Oscillations after onset, and overshoot	497.97	± 0.10	1.017	± 2	59.19	± 1.0	-0.1	± 1.0
LI-M16	Front oscillations	369.21	± 0.10	0.920	± 2	47.53	± 1.0	0.8	± 1.0
LI-M17	Heavy oscillations at front and peak	-99.346	± 0.10	1.775	± 2	53.31	± 1.0	1.3	± 1.0

ภาคผนวก ค.

ค่าน้ำหนัก (Weight) และตัวปรับค่า (Bias) ของโมเดลเชิง
คณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่า
โดยตรง

1. ตัวปรับค่า (Bias)

$$B_1^{(U_e)} = \begin{bmatrix} -4.018 \\ -2.141 \end{bmatrix}, B_1^{(\tau_1)} = \begin{bmatrix} 1.081 \\ -3.076 \end{bmatrix}, B_1^{(\tau_2)} = \begin{bmatrix} -2.044 \\ 7.067 \end{bmatrix}, B_1^{(B_e)} = \begin{bmatrix} -0.033 \\ -0.037 \end{bmatrix}$$
$$B_2^{(U_e)} = 0.946, B_2^{(\tau_1)} = 3.297$$
$$B_2^{(\tau_2)} = 6.442 \times 10^{-1}, B_2^{(B_e)} = 2.630$$

2. ค่าน้ำหนัก (Weight)

$$\begin{pmatrix} W_1^{(U_e)} \end{pmatrix}^T = \begin{bmatrix} -0.204 & -0.506 \\ 0.460 & 0.031 \\ 2.284 & -2.375 \\ -2.028 & -0.913 \\ -3.940 & 2.042 \\ 0.293 & 1.604 \\ 0.562 & 4.234 \\ 6.249 & -2.424 \\ -2.093 & -13.981 \\ -7.977 & -5.020 \\ -11.667 & 30.272 \\ 493.236 & -92.968 \\ -79.082 & 369.758 \\ -785.212 & 1048.546 \end{bmatrix} \times 10^{-1}$$
$$\begin{pmatrix} W_1^{(\tau_1)} \end{pmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0.005 & -0.004 \\ 0.005 & -0.044 \\ 0.041 & 0.110 \\ -0.067 & -0.072 \\ -0.103 & 0.104 \\ -0.099 & -0.045 \\ 0.042 & 0.067 \\ -0.132 & 0.232 \\ -0.060 & -0.145 \\ 0.537 & 1.599 \\ 0.224 & -0.953 \\ -3.419 & -15.132 \\ -87.117 & 8.873 \\ 175.710 & 23.552 \end{bmatrix} \times 10^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 (W_1^{(T_2)})^T &= \begin{bmatrix} -0.009 & -0.054 \\ 0.002 & -0.069 \\ -0.006 & -0.170 \\ 0.032 & 0.248 \\ -0.024 & -0.054 \\ -0.001 & -0.066 \\ 0.006 & -0.171 \\ 0.004 & 0.386 \\ -0.024 & -0.336 \\ -0.228 & -2.753 \\ 0.061 & 1.402 \\ -3.308 & -45.744 \\ 32.585 & 16.950 \\ 40.334 & 72.064 \end{bmatrix} \times 10^3 & \quad (W_1^{(B_e)})^T &= \begin{bmatrix} 0.036 & 0.012 \\ -0.003 & 0.024 \\ -0.039 & -0.060 \\ -0.058 & -0.006 \\ 0.030 & -0.019 \\ -0.007 & 0.013 \\ 0.073 & 0.122 \\ 0.013 & -0.070 \\ 0.018 & -0.031 \\ 2.969 & 0.083 \\ -1.807 & 0.110 \\ 5.213 & -9.735 \\ -25.105 & -28.437 \\ 22.441 & 104.055 \end{bmatrix} \times 10^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_2^{(U_e)} &= \begin{bmatrix} -0.036 & 0.015 \end{bmatrix}, & W_2^{(T_1)} &= \begin{bmatrix} 2.469 & -0.257 \end{bmatrix} \\
 W_2^{(T_2)} &= \begin{bmatrix} -2.836 & 0.303 \end{bmatrix} \times 10^{-1}, & W_2^{(B_e)} &= \begin{bmatrix} 1.815 & -1.984 \end{bmatrix} \times 10^{-1}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าน้ำหนัก (Weight) และตัวปรับค่า (Bias) ของโมเดลเชิง คณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นฟ้าผ่า

1. ตัวปรับค่า (Bias)

$$B_1^{(A)} = \begin{bmatrix} 1.150 \\ -0.012 \end{bmatrix}, B_1^{(B)} = \begin{bmatrix} 4.784 \\ -0.856 \end{bmatrix}, B_1^{(\alpha)} = \begin{bmatrix} 3.653 \\ 1.819 \end{bmatrix}, B_1^{(\beta)} = \begin{bmatrix} -0.273 \\ -2.837 \end{bmatrix}$$

$$B_2^{(A)} = 9.209 \times 10^{-1}, B_2^{(B)} = -7.916 \times 10^{-1}$$

$$B_2^{(\alpha)} = -1.881 \times 10^{-4}, B_2^{(\beta)} = -5.472 \times 10^{-2}$$

2. ค่าน้ำหนัก (Weight)

$$\begin{pmatrix} W_1^{(A)} \end{pmatrix}^T = \begin{bmatrix} -61.506 & 18.159 \\ 26.755 & -5.808 \\ 12.400 & 0.594 \\ 24.522 & -18.076 \\ -3.162 & 11.162 \\ -1.645 & 4.141 \\ -7.514 & -2.029 \\ -3.587 & -0.421 \\ -0.993 & -0.538 \\ -0.642 & 0.028 \\ -0.008 & -0.422 \\ -0.528 & -0.076 \\ -0.011 & 0.244 \\ 0.090 & 0.116 \end{bmatrix} \times 10^5$$

$$\begin{pmatrix} W_1^{(B)} \end{pmatrix}^T = \begin{bmatrix} 51.667 & -146.764 \\ -91.626 & -149.886 \\ -214.953 & 60.025 \\ -47.346 & -7.743 \\ 69.943 & 38.234 \\ -35.945 & 24.661 \\ 1.686 & -13.733 \\ 30.821 & 1.307 \\ -3.264 & 1.841 \\ -0.494 & -1.823 \\ -0.932 & -0.960 \\ 1.007 & -0.225 \\ 0.212 & 0.109 \\ -0.476 & 0.641 \end{bmatrix} \times 10^5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 (W_1^{(\beta)})^T &= \begin{bmatrix} 26.044 & 18.918 \\ 18.180 & -15.102 \\ -29.064 & -7.234 \\ -17.291 & 8.817 \\ -7.753 & -2.914 \\ 1.410 & 16.576 \\ -0.737 & 2.566 \\ -3.743 & -1.215 \\ 0.151 & 0.812 \\ -0.344 & -0.087 \\ -0.346 & 0.184 \\ -0.027 & 0.293 \\ 0.215 & 0.191 \\ 0.184 & -0.149 \end{bmatrix} \times 10^5 & \quad (W_1^{(\alpha)})^T = \begin{bmatrix} 130.890 & 131.970 \\ -222.122 & 387.183 \\ 116.380 & 22.135 \\ -116.856 & -28.745 \\ -63.227 & -1.959 \\ 55.074 & -1.559 \\ -4.837 & 39.078 \\ -0.587 & -9.766 \\ 2.634 & 2.554 \\ 1.537 & 6.366 \\ 2.301 & 1.219 \\ -1.117 & -3.095 \\ -3.740 & -3.223 \\ -3.402 & -0.034 \end{bmatrix} \times 10^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_2^{(A)} &= \begin{bmatrix} -1.244 & -1.598 \end{bmatrix} \times 10^{-1}, & W_2^{(B)} &= \begin{bmatrix} 4.733 & 7.692 \end{bmatrix} \times 10^{-2} \\
 W_2^{(\alpha)} &= \begin{bmatrix} -4.137 & -3.383 \end{bmatrix} \times 10^{-5}, & W_2^{(\beta)} &= \begin{bmatrix} -34.917 & 9.436 \end{bmatrix} \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

โปรแกรมประมวลผลรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามวิธีมาตรฐาน

ตัว Run โปรแกรม

```
LISI = input('filename : ','s');
M = importdata(LISI);
y=M.data(:,2);
n=length(y);
t=0:(n-1);
[ymax tmax]=max(abs(y));
tmax1=tmax;
offs=mean(y(1:round(tmax/4)));
y=y-offs;
ymax=y(tmax);
y=y/ymax;
Yu=y;
i=tmax;
Yumax=ymax;
while y(i)>=0.2
    i=i-1;
end
1=i;
td=t1;
[~, t40]=min(abs(y(tmax:end)-0.4));
t40=t40+tmax;
tmaxn=tmax-i+1;
Y1=y(i:t40);
T1=t(1:t40-i+1);
x0=[1;-1;-1/7000;-1/40];
F = @(x,T1)x(1)*exp(x(3)*T1)+ x(2)*exp(x(4)*T1);
[x,resnorm,residual,exitflag,output] = lsqcurvefit(F,x0,T1,Y1); % คำสั่ง curve-fitting
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
F = @(x,T1)x(1)*exp(x(3)*T1)+ x(2)*exp(x(4)*T1);
```

```
YP = F(x,T1);%ประมาณ Base curve
```

```
output.iterations
```

```
c(1)=-x(3);c(2)=-x(4);c(3)=x(1);c(4)=-x(2);
```

```
tc=round(td-log(c(4)/c(3))/(c(1)-c(2)));
```

```
if tc<0
```

```
tc=0;
```

```
end
```

```
z=c(3)*exp(-c(1)*(t-td+1))-c(4)*exp(-c(2)*(t-td+1));
```

```
z=[zeros(1,tc) z(tc+1:end)];
```

```
zu=z*Yumax;
```

```
tnx=(10*t);
```

```
iu=1;
```

```
while z(iu)<=0.01;
```

```
iu=iu+1;
```

```
end
```

```
ti=(t-iu);
```

```
Yuu=Yu*yumax;
```

```
tu=tnx-(10*iu);
```

```
Be=1-max(z);
```

```
res=y'-z;
```

```
k=tan(pi*0.00000001/sqrt(2.2e-12));
```

```
a1=k/(1+k);
```

```
a2=(1-k)/(1+k);
```

```
w=filtfilt([a1 a1],[1 -a2],res);
```

```
yn=z+w;
```

```
Yun=yn*Yumax;
```

```
[ynmax,tnmax]=max(yn);
```

```
ynmax
```

```
i=tnmax;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

while yn(i)>=0.9*ynmax
    i=i-1;
end
T90=i-2+(0.9*ynmax-yn(i-1))/(yn(i)-yn(i-1));
while yn(i)>=0.3*ynmax
    i=i-1;
end
T30=i-2+(0.3*ynmax-yn(i-1))/(yn(i)-yn(i-1));
T1=(T90-T30)/0.6;
i=tnmax;
while yn(i)>=0.5*ynmax
    i=i+1;
end
T2=(i-2+(0.5*ynmax-yn(i-1))/(yn(i)-yn(i-1)))-(T30-0.5*(T90-T30));%
p=[ynmax*y_max/1000;T1/100;T2/100;Be*100];
Yunx=transpose(Yun);
zux=transpose(zu);
Yx1=[Yuu zux Yunx];
Yx2=[Yuu Yunx zux];
%p=[ynmax*y_max/1000;T1/100];
rr=transpose(x);
Vm=num2str(p(1,1));
Tf=num2str(p(2,1));
Tt=num2str(p(3,1));
Bt=num2str(p(4,1));
PA5(ti,Yx1,tu,Yx2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าโดยตรง

ตัว Run โปรแกรม

```

LISI = input('filename : ','s');
M = importdata(LISI);
y=M.data(:,2);
n=length(y);
t=0:(n-1);
[ymax tmax]=max(abs(y));
tmax1=tmax;
offs=mean(y(1:round(tmax/4)));
y=y-offs;
ymax=y(tmax);
y=y/ymax;
Yu=y;
Yumax=ymax;
i=tmax1;
while y(i)>=0.2;
    i=i-1;
end
t1=i;
td=t1;
[~, t40]=min(abs(y(tmax1:end)-0.4));
t40=t40+tmax;
tx=t(1:t40-i+1);
Tee=tx;
t15=t40+tmax1;
Y1=y(t1:t40);
[ymax2 tmax2]=max(abs(Y1));
tt=t1;
t1=1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

i=tmax2;
while Y1(i)>=0.3;
    i=i-1;
end
t2=i;
i=tmax2;
while Y1(i)>=0.4;
    i=i-1;
end
t3=i;
i=tmax2;
while Y1(i)>=0.5;
    i=i-1;
end
t4=i;
i=tmax2;
while Y1(i)>=0.6;
    i=i-1;
end
t5=i;

i=tmax2;
while Y1(i)>=0.7;
    i=i-1;
end
t6=i;
i=tmax2;
while Y1(i)>=0.8;
    i=i-1;
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

t7=i;
i=tmax2;
while Y1(i)>=0.9;
    i=i-1;
end
t8=i;
t9=tmax2;
[~, t90]=min(abs(Y1(tmax2:end)-0.9));
t10=t90+tmax2;
[~, t80]=min(abs(Y1(tmax2:end)-0.8));
t11=t80+tmax2;
[~, t70]=min(abs(Y1(tmax2:end)-0.7));
t12=t70+tmax2;
[~, t60]=min(abs(Y1(tmax2:end)-0.6));
t13=t60+tmax2;
[~, t50]=min(abs(Y1(tmax2:end)-0.5));
t14=t50+tmax2;
t15=t40-tt+1;
TT=[t1 t2 t3 t4 t5 t6 t7 t8 t9 t10 t11 t12 t13 t14 t15];
TTT=[t1 t2 t3 t4 t5 t6 t7 t8 t9 ];
YY=Y1(TT);
m1=0.1/(t2-t1);
m2=0.2/(t3-t1);
m3=0.3/(t4-t1);
m4=0.4/(t5-t1);
m5=0.5/(t6-t1);
m6=0.6/(t7-t1);
m7=0.7/(t8-t1);
m8=0.8/(t9-t1);
m9=0.7/(t10-t1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

m10=0.6/(t11-t1);
m11=0.5/(t12-t1);
m12=0.4/(t13-t1);
m13=0.3/(t14-t1);
m14=0.2/(t15-t1);
MM=[m1 m2 m3 m4 m5 m6 m7 m8 m9 m10 m11 m12 m13 m14];
PE=pee4(MM)*ymax/1000;
Fo=xt2(MM);
To=xt1(MM);
BB=hzbe(MM);

```

Function นีวรอนเน็ตเวิร์ค node แรงดันสูงสุด (U_e), (Code: hzp1)

```

function [y1] = hzp1(x1)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Generated by Neural Network Toolbox function genFunction, 19-Jan-2019 15:12:28.
%
% [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:
% x = Qx14 matrix, input #1
% and returns:
% y = Qx1 matrix, output #1
% where Q is the number of samples.
%#ok<*RPMT0>
% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====
% Input 1
x1_step1.xoffset =
[0.004166667;0.004761905;0.004285714;0.004395604;0.00390625;0.003409091;0.003125;0.
002605863;0.000560448;0.000222552;0.000115527;6.44e-05;3.56e-05;1.8e-05];
x1_step1.gain =
[43.636363953719;44.2105265484765;96.5517228061831;112.191779730737;112.15238368

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

6763;120.547945866016;139.130434782609;230.900408843809;577.610488944391;1292.52
404094716;2078.87458045712;17419.9336300529;42194.0928270042;84388.1856540085];
x1_step1.ymin = -1;
% Layer 1
b1 = [-1.235806984884595;1.3534505942645787];
IW1_1 = [-0.46638483136643677 1.0398524936897469 2.365268275195977 -
1.8075551704811852 -3.5132658990111754 0.24299377724270871 0.4038587013853624
2.7062179216535811 -0.36232719032765576 -0.61715857994611989 -
0.56120268612149171 2.8314485326581624 -0.18742338763225749 -
0.93047619471233678;-1.1605484301864302 0.070531626723211074 -
2.4593295602048153 -0.81414344621217727 1.8204233312395122 1.3307791101222946
3.0431974423770232 -1.0496647508317238 -2.4204136280009161 -0.38835090657771021
1.4561680095017757 -0.53368477836601091 0.87632531861118879
1.2425275828826692];
% Layer 2
b2 = -1.6336988727264348;
LW2_1 = [-1.7725213731208662 0.73734524493739528];
% Output 1
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 48.7242255850764;
y1_step1.xoffset = 0.959224621;
% ===== SIMULATION =====
% Dimensions
Q = size(x1,1); % samples
% Input 1
x1 = x1';
xp1 = mapminmax_apply(x1,x1_step1);
% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);
% Layer 2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;
% Output 1
y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
y1 = y1';
end
% ===== MODULE FUNCTIONS =====
% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end
% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end
% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end

```

Function นีวرونเน็ตเวิร์ค node ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1), (Code: xt2)

```

function [y1] = xt2(x1)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Generated by Neural Network Toolbox function genFunction, 21-Feb-2019 04:48:52.
%
% [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% x = Qx14 matrix, input #1
% and returns:
% y = Qx1 matrix, output #1
% where Q is the number of samples.
%#ok<*RPMT0>
% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====
% Input 1
x1_step1.xoffset =
[0.004166667;0.004761905;0.004285714;0.004395604;0.00390625;0.003409091;0.003125;0.
002605863;0.000560448;0.000222552;0.000115527;6.44e-05;3.56e-05;1.8e-05];
x1_step1.gain =
[43.636363953719;44.2105265484765;96.5517228061831;112.191779730737;112.15238368
6763;120.547945866016;139.130434782609;230.900408843809;577.610488944391;1223.21
690143257;2078.87458045712;17419.9336300529;42194.0928270042;84388.1856540085];
x1_step1.ymin = -1;
% Layer 1
b1 = [-1.6747112108354225;-0.48233652397331284];
IW1_1 = [0.12209508473596695 0.12274950962827783 0.42619871547287669 -
0.59874817416946513 -0.91984311242483174 -0.82445008595550862
0.2993114633074887 -0.57253139478898285 -0.10418082239262376
0.43932341152941895 0.10766523328680135 -0.1962911869389459 -2.064673394115693
2.0821672143265819;-0.088123208658563351 -0.99948505570712487
1.1391505827924489 -0.63819981723023034 0.92788119290994375 -
0.37278601988708865 0.47837411347217218 1.0038727137415089 -
0.25177951861462933 1.3074623455785512 -0.45821496013968732 -
0.86867069622278259 0.21029143536720266 0.27909484529830419];
% Layer 2
b2 = 0.95725267633597644;
LW2_1 = [1.7774730513563326 -0.1852290206771173];
% Output 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 0.719942404607631;
y1_step1.xoffset = 0.578;
% ===== SIMULATION =====
% Dimensions
Q = size(x1,1); % samples
% Input 1
x1 = x1';
xp1 = mapminmax_apply(x1,x1_step1);
% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);
% Layer 2
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;
% Output 1
y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
y1 = y1';
end
% ===== MODULE FUNCTIONS =====
% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end
% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end

% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end

```

Function นีวرونเน็ตเวิร์ค node ช่วงเวลาหลังคลื่น (T_2), (Code: xt1)

```

function [y1] = xt1(x1)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Generated by Neural Network Toolbox function genFunction, 21-Feb-2019 04:29:11.
%
% [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:
% x = Qx14 matrix, input #1
% and returns:
% y = Qx1 matrix, output #1
% where Q is the number of samples.
%#ok<*RPMT0>
% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====
% Input 1
x1_step1.xoffset =
[0.004166667;0.004761905;0.004285714;0.004395604;0.00390625;0.003409091;0.003125;0.
002605863;0.000560448;0.000222552;0.000115527;6.44e-05;3.56e-05;1.8e-05];
x1_step1.gain =
[43.636363953719;44.2105265484765;96.5517228061831;112.191779730737;112.15238368
6763;120.547945866016;139.130434782609;230.900408843809;577.610488944391;1223.21
690143257;2078.87458045712;17419.9336300529;42194.0928270042;84388.1856540085];
x1_step1.ymin = -1;
% Layer 1
b1 = [0.33682570225464065;-1.2561610495755435];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

IW1_1 = [-0.21187508714398146 0.047257723849904662 -0.065415581589814045
0.28349906460103735 -0.21419743593248508 -0.010622404658703288
0.042327882085659754 0.01699725812256149 -0.041123460659025127 -
0.18624841838094408 0.029514264967602725 -0.18992591104632756
0.77226483540548463 0.47796103228222669;-1.2432837173559992 -
1.5622806374483822 -1.7650901874585085 2.2073953262171386 -0.48200359765798495
-0.5471654760345277 -1.227499253070593 1.6696977907509514 -0.58104916964730446 -
2.250537256302322 0.67444642864947046 -2.625950753685522 0.4017203921968433
0.85396037916789669];
% Layer 2
b2 = 0.11989014950135583;
LW2_1 = [-1.1788649290135751 0.12603579011406624];
% Output 1
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 0.0415627597672485;
y1_step1.xoffset = 37.48;
% ===== SIMULATION =====
% Dimensions
Q = size(x1,1); % samples
% Input 1
x1 = x1';
xp1 = mapminmax_apply(x1,x1_step1);
% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);
% Layer 2
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;
% Output 1
y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
y1 = y1';
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% ===== MODULE FUNCTIONS =====
% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end
% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end
% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end

```

Function นิวรอนเน็ตเวิร์ค node Overtshoot (B_e), (Code: hzbe)

```

function [y1] = hzbe(x1)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Generated by Neural Network Toolbox function genFunction, 28-Jan-2019 14:21:14.
%
% [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:
% x = Qx14 matrix, input #1
% and returns:
% y = Qx1 matrix, output #1
% where Q is the number of samples.
%#ok<*RPMT0>

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====
% Input 1
x1_step1.xoffset =
[0.004166667;0.004761905;0.004285714;0.004395604;0.00390625;0.003409091;0.003125;0.
002605863;0.000560448;0.000222552;0.000115527;6.44e-05;3.56e-05;1.8e-05];
x1_step1.gain =
[43.636363953719;44.2105265484765;96.5517228061831;112.191779730737;112.15238368
6763;120.547945866016;139.130434782609;230.900408843809;577.610488944391;1292.52
404094716;2078.87458045712;17419.9336300529;42194.0928270042;84388.1856540085];
x1_step1.ymin = -1;
% Layer 1
b1 = [2.4054284044654732;0.95786173520101336];
IW1_1 = [0.82158161982963474 -0.06767330118513093 -0.40296755530256906 -
0.51991810222729096 0.27086092784048438 -0.054664909519718106
0.52798606539507587 0.054940883763192373 0.031708046881716953
2.2969777679203158 -0.86918973418839918 0.2992780291119207 -
0.59499077653246013 0.26592325223688712;0.26847542200200852
0.53371308454891109 -0.62542110835132003 -0.054614772606944417 -
0.16592175002055068 0.10657396039913929 0.87641947710736812 -
0.30143326544334226 -0.053991127154273386 0.064053042019809325
0.052833786915637823 -0.55882089758912867 -0.67396332758237509
1.2330506660635028];
% Layer 2
b2 = -0.59545237507871662;
LW2_1 = [1.6570893468340531 -1.8119102768975264];
% Output 1
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 0.091324200913242;
y1_step1.xoffset = -1.8;
% ===== SIMULATION =====

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Dimensions
Q = size(x1,1); % samples
% Input 1
x1 = x1';
xp1 = mapminmax_apply(x1,x1_step1);
% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);
% Layer 2
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;
% Output 1
y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
y1 = y1';
end
% ===== MODULE FUNCTIONS =====
% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end
% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end
% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์สมการรูปคลื่นฟ้าผ่า

```

LISI = input('filename : ','s');
M = importdata(LISI);
y=M.data(:,2);
hold on
n=length(y);
t=0:(n-1);
[ymax tmax]=max(abs(y));
tmax1=tmax;
offs=mean(y(1:round(tmax/4)));
y=y-offs;
ymax=y(tmax);
y=y/ymax;
Yu=y;
Yumax=ymax;
i=tmax1;
while y(i)>=0.2;
    i=i-1;
end
t1=i;
td=t1;
[~, t40]=min(abs(y(tmax1:end)-0.4));
t40=t40+tmax;
tx=t(1:t40-i+1);
Tee=tx;
t15=t40+tmax1;
Y1=y(t1:t40);
[ymax2 tmax2]=max(abs(Y1));
tt=t1;
t1=1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

i=tmax2;
while Y1(i)>=0.3;
    i=i-1;
end
t2=i;
i=tmax2;
while Y1(i)>=0.4;
    i=i-1;
end
t3=i;
i=tmax2;
while Y1(i)>=0.5;
    i=i-1;
end
t4=i;
i=tmax2;
while Y1(i)>=0.6;
    i=i-1;
end
t5=i;
i=tmax2;
while Y1(i)>=0.7;
    i=i-1;
end
t6=i;
i=tmax2;
while Y1(i)>=0.8;
    i=i-1;
end
t7=i;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

i=tmax2;
while Y1(i)>=0.9;
    i=i-1;
end
t8=i;
t9=tmax2;
[~, t90]=min(abs(Y1(tmax2:end)-0.9));
t10=t90+tmax2;
[~, t80]=min(abs(Y1(tmax2:end)-0.8));
t11=t80+tmax2;
[~, t70]=min(abs(Y1(tmax2:end)-0.7));
t12=t70+tmax2;
[~, t60]=min(abs(Y1(tmax2:end)-0.6));
t13=t60+tmax2;
[~, t50]=min(abs(Y1(tmax2:end)-0.5));
t14=t50+tmax2;
t15=t40-tt+1;
TT=[t1 t2 t3 t4 t5 t6 t7 t8 t9 t10 t11 t12 t13 t14 t15];
YY=Y1(TT);
A=ggX3(TT)
B=B44(TT)/100
a=n7ar2(TT)/1000000
b=aa11(TT)/10000
Y9=A*exp(a*Tee)+ B*exp(b*Tee);
d1=[A,B,a,b];
c(1)=-d1(3);c(2)=-d1(4);c(3)=d1(1);c(4)=-d1(2);
tc=round(td-log(c(4)/c(3))/(c(1)-c(2)));
if tc<0
    tc=0;
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

z=c(3)*exp(-c(1)*(t-td+1))-c(4)*exp(-c(2)*(t-td+1));
z=[zeros(1,tc) z(tc+1:end)];
zu=z*Yumax;
tnx=(10*t);
iu=1;
while z(iu)<=0.01;
    iu=iu+1;
end
ti=(t-iu);
Yuu=Yu*yumax;
tu=tnx-(10*iu);
Be=1-max(z);
res=y'-z;
k=tan(pi*0.00000001/sqrt(2.2e-12));
a1=k/(1+k);
a2=(1-k)/(1+k);
w=filtfilt([a1 a1],[1 -a2],res);
hold on
yn=z+w;
Yun=yn*Yumax;
[ynmax,tnmax]=max(yn);
i=tnmax;
while yn(i)>=0.9*ynmax
    i=i-1;
end
T90=i-2+(0.9*ynmax-yn(i-1))/(yn(i)-yn(i-1));
while yn(i)>=0.3*ynmax
    i=i-1;
end
T30=i-2+(0.3*ynmax-yn(i-1))/(yn(i)-yn(i-1));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

T1=(T90-T30)/0.6;
i=tnmax;
while yn(i)>=0.5*ynmax
    i=i+1;
end
T2=(i-2+(0.5*ynmax-yn(i-1)))/(yn(i)-yn(i-1))-(T30-0.5*(T90-T30));%
p=[ynmax*yamax/1000 T1/100 T2/100 Be*100];
Yunx=transpose(Yun);
zux=transpose(zu);
Yx1=[Yuu zux Yunx];
Yx2=[Yuu Yunx zux];
text(1500,4.3*10000,['Time scale of 1 \mus/div for the fornt part of 10 \mus/div'])
PA4(ti,Yx1,tu,Yx2);

```

Function นิวรอนเน็ตเวิร์ค node คำ A, (Code: ggX3)

```

function [y1] = ggX3(x1)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Generated by Neural Network Toolbox function genFunction, 23-Aug-2018 14:14:22.
%
% [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:
% x = Qx15 matrix, input #1
% and returns:
% y = Qx1 matrix, output #1
% where Q is the number of samples.
%#ok<*RPMT0>
% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====
% Input 1
x1_step1.keep = [2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15];
x1_step2.xoffset = [3;5;13;19;24;31;41;72;172;324;411;2095;3614;4792];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

x1_step2.gain =
[0.0909090909090909;0.0526315789473684;0.0344827586206897;0.0273972602739726;0.0
19047619047619;0.0136986301369863;0.0108695652173913;0.00847457627118644;0.0018
5528756957328;0.000842815002107038;0.000510464522715671;0.000485672656629432;0.
000415454923140839;0.000315905860053704];

x1_step2.ymin = -1;

% Layer 1
b1 = [-2.5218613991314918;0.80010874759387529];
IW1_1 = [-0.67656601371411407 0.508342404727266 0.35958782161350655
0.89505065879446566 -0.16601842699508743 -0.12006529785798166 -
0.69131317964205286 -0.42323007420726921 -0.53518895669891176 -
0.76225349456736635 -0.016512554269460272 -1.0881362972996333 -
0.026066538892405223 0.28495643622985101;0.19974803269586316 -
0.11035890089069311 0.017214168773749421 -0.65976926309432404
0.58601641280287853 0.30228437063909303 -0.18670203677668898 -
0.049727863669007714 -0.29002313713276456 0.033496471793829093 -
0.8260812279217824 -0.15555036879151063 0.58767097839063875
0.36762746061698748]

% Layer 2
b2 = -0.046753316043007011;
LW2_1 = [-0.93794890714032431 -1.2045018073076923];

% Output 1
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 7.53726771874463;
y1_step1.xoffset = 0.794383787;

% ===== SIMULATION =====

% Dimensions
Q = size(x1,1); % samples

% Input 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

x1 = x1';
xp1 = removeconstantrows_apply(x1,x1_step1);
xp1 = mapminmax_apply(xp1,x1_step2);
% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);
% Layer 2
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;
% Output 1
y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
y1 = y1';
end
% ===== MODULE FUNCTIONS =====
% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end
% Remove Constants Input Processing Function
function y = removeconstantrows_apply(x,settings)
y = x(settings.keep,:);
end
% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end
% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end
```

Function นิวรอนเน็ตเวิร์ค node ค่า B, (Code: B44)

```
function [y1] = B44(x1)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Generated by Neural Network Toolbox function genFunction, 14-Sep-2018 22:22:12.
%
% [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:
% x = Qx15 matrix, input #1
% and returns:
% y = Qx1 matrix, output #1
% where Q is the number of samples.
%#ok<*RPMT0>
% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====
% Input 1
x1_step1.keep = [2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15];
x1_step2.xoffset = [3;5;13;19;24;31;41;72;172;324;411;2095;3614;4792];
x1_step2.gain =
[0.0909090909090909;0.0526315789473684;0.0344827586206897;0.0273972602739726;0.0
19047619047619;0.0136986301369863;0.0108695652173913;0.00847457627118644;0.0018
5528756957328;0.000842815002107038;0.000510464522715671;0.000485672656629432;0.
000415454923140839;0.000315905860053704];
x1_step2.ymin = -1;
% Layer 1
b1 = [-4.2550794062324675;0.58961763839046721];
IW1_1 = [0.56833277901887314 -1.7408958748132395 -6.2336452449163966 -
1.7281399122017782 3.67200876909315 -2.6239574481405055 0.15511166710931573
3.6368235034976832 -1.759051966639267 -0.58658287955650101 -1.8257564570311768
2.0736676571273964 0.51020941185526136 -1.5052542148190222;-1.6144084649182679
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

-2.8478399635673184 1.7407343009383514 -0.28261551308422167 2.0072761794333513
1.8002571234058693 -1.2634502394366611 0.15418657050223541 0.99230143990190556
-2.163388495663733 -1.8801596572860655 -0.46416126520547446 0.26143561597400028
2.027638284163582];

% Layer 2
b2 = 0.020716448425684465;
LW2_1 = [0.37409231674893778 0.607989891844536];

% Output 1
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 0.079042645469069;
y1_step1.xoffset = -92.07084663;
% ===== SIMULATION =====
% Dimensions
Q = size(x1,1); % samples
% Input 1
x1 = x1';
xp1 = removeconstantrows_apply(x1,x1_step1);
xp1 = mapminmax_apply(xp1,x1_step2);
% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);
% Layer 2
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;
% Output 1
y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
y1 = y1';
end

% ===== MODULE FUNCTIONS =====
% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end
% Remove Constants Input Processing Function
function y = removeconstantrows_apply(x,settings)
y = x(settings.keep,:);
end
% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end
% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end

```

Function นิวรอนเน็ตเวิร์ค node ค่า α , (Code: n7ar2)

```

function [y1] = n7ar2(x1)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Generated by Neural Network Toolbox function genFunction, 13-Sep-2018 19:27:39.
%
% [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:
%   x = Qx15 matrix, input #1
% and returns:
%   y = Qx1 matrix, output #1
% where Q is the number of samples.
%#ok<*RPMT0>
% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Input 1
x1_step1.keep = [2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15];
x1_step2.xoffset = [3;5;13;19;24;31;41;72;172;324;411;2095;3614;4792];
x1_step2.gain =
[0.0909090909090909;0.0526315789473684;0.0344827586206897;0.0273972602739726;0.0
19047619047619;0.0136986301369863;0.0108695652173913;0.00847457627118644;0.0018
5528756957328;0.000842815002107038;0.000510464522715671;0.000485672656629432;0.
000415454923140839;0.000315905860053704];
x1_step2.ymin = -1;
% Layer 1
b1 = [-1.3010866913216284;1.3483383807263709];
IW1_1 = [0.14397871465054363 -0.42203138658085149 0.33750309059628747 -
0.42652270380007495 -0.33194405146422618 0.40204115340736352 -
0.044496186999595178 -0.0069260433658406215 0.14197348930522447
0.18242040116425229 0.45076906449151899 -0.2299640891359149 -
0.90029474901224293 -1.0769379946225572;0.14516649188254066
0.73564831068558567 0.064191519351611298 -0.10492014912326625 -
0.010286071078149266 -0.011380209211870735 0.35952142340911725 -
0.11523529592270226 0.13765230164358061 0.75529994311922466
0.23885784945990352 -0.63728948123621687 -0.77575154944261238 -
0.010740646851361238];
% Layer 2
b2 = 0.30836321765690372;
LW2_1 = [-0.78033392679745872 -0.63816717960004254];
% Output 1
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 0.0188620291263621;
y1_step1.xoffset = -188.1429572;
% ===== SIMULATION =====
% Dimensions

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Q = size(x1,1); % samples
% Input 1
x1 = x1';
xp1 = removeconstantrows_apply(x1,x1_step1);
xp1 = mapminmax_apply(xp1,x1_step2);
% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);
% Layer 2
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;
% Output 1
y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
y1 = y1';
end
% ===== MODULE FUNCTIONS =====
% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end

% Remove Constants Input Processing Function
function y = removeconstantrows_apply(x,settings)
y = x(settings.keep,:);
end

% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end

% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end
```

Function นีวรอนเน็ตเวิร์ค node ค่า β , (Code: aa11)

```
function [y1] = aa11(x1)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Generated by Neural Network Toolbox function genFunction, 13-Sep-2018 23:21:17.
%
% [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:
% x = Qx15 matrix, input #1
% and returns:
% y = Qx1 matrix, output #1
% where Q is the number of samples.
%#ok<*RPMT0>
% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====
% Input 1
x1_step1.keep = [2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15];
x1_step2.xoffset = [3;5;13;19;24;31;41;72;175;340;465;2233;3614;4792];
x1_step2.gain =
[0.0909090909090909;0.0526315789473684;0.0344827586206897;0.0273972602739726;0.0
19047619047619;0.0136986301369863;0.0108695652173913;0.00847457627118644;0.0018
6046511627907;0.000848536274925753;0.0005175983436853;0.00050251256281407;0.000
415454923140839;0.000315905860053704];
x1_step2.ymin = -1;
% Layer 1
b1 = [-1.5019561921912334;0.95054574363321009];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

IW1_1 = [0.28647906466234402 0.3454242642443634 -0.84286197644369576 -
0.63112551673818718 -0.40702823466525745 0.10295178107618978 -
0.067803088361935007 -0.44169799527525866 0.081418393805043496 -
0.40539370066815528 -0.66900874365479135 -0.053626337935106003
0.51853325298401176 0.58355094379449923;0.20810020957503142 -
0.28694512516932946 -0.20977200022811326 0.32182060392520162 -
0.15300812617630882 1.2100627350918447 0.23609180285933257 -
0.14338639899019576 0.43642629544050437 -0.10224556762234593
0.35503560376222054 0.58210512963585104 0.45964905491909835 -
0.4711927667708426];

% Layer 2
b2 = -1.0167579825027182;
LW2_1 = [-1.5899168974722355 0.42965054722101537];

% Output 1
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 0.00455336868726936;
y1_step1.xoffset = -543.5376068;

% ===== SIMULATION =====

% Dimensions
Q = size(x1,1); % samples

% Input 1
x1 = x1';
xp1 = removeconstantrows_apply(x1,x1_step1);
xp1 = mapminmax_apply(xp1,x1_step2);

% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);

% Layer 2
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;

% Output 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
y1 = y1';
end
% ===== MODULE FUNCTIONS =====
% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end
% Remove Constants Input Processing Function
function y = removeconstantrows_apply(x,settings)
y = x(settings.keep,:);
end
% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end
% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายกฤษณ์ กิจวัฒนา
วัน เดือน ปีเกิด	8 ธันวาคม พ.ศ.2531
ที่อยู่	1599/79 หมู่ 6 ต.ท้ายบ้านใหม่ อ.เมืองฯ จ.สมุทรปราการ 10280 โทร.0-8743-59311
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2556 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง 2.) การประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้า 3.) การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] กฤษณ์ กิจวัฒนา, ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, สุธี ลีจ้งเพิ่มพูน “การศึกษาผลของสนามไฟฟ้าแบบแผ่นฉนวนบางต่อการลดก๊าซมลพิษจากท่อไอเสียรถยนต์เครื่องเบนซิน”, **EECON34**, 2554
- [2] กฤษณ์ กิจวัฒนา, ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, สุธี ลีจ้งเพิ่มพูน “การศึกษาผลของสนามไฟฟ้า 3 แบบ ต่อการลดก๊าซมลพิษจากท่อไอเสียรถยนต์เครื่องเบนซิน”, **EECON35**, 2555.
- [3] K. Kitwattana., S. Potivejkul., and S. Leejongpermpoon., “A Study of Effect of Electric Field and Catalytic Converter for Reducing Pollution Gas from a Gasoline Engine,” **ISTS 2011, 5th International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS 2011)**, Bangkok, Thailand, 23-26 Nov. 2011
- [4] K. Kitwattana., S.Potivejkul., and Sutee Leejongpermpoon., “A Study of Effect of Electric Field to Reduce Polluted Gases from a Gasoline Engine,” **The 5th International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures (ISTS 2011)**
- [5] K. Kitwattana., S. Potivejkul., V. Kinnares., and W. Limpjareun. “A Study Effect of Frequency of Electric Field on Exhaust Emission Reduction from Benzene Engine” **ICEAST 2012**, November 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [6] ปณิธาน อุดมเดช, ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, และกฤษณ์ กิจวัฒนา “ผลของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า และความยาวของอิเล็กทรอนิกส์ต่อการลดก๊าซมลพิษจากไอเสียรถยนต์” , **EECON35**, 2555.
- [7] ปณิธาน อุดมเดช, ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, และกฤษณ์ กิจวัฒนา “การพัฒนาชุดต้นแบบลดก๊าซมลพิษ จากไอเสียรถยนต์เครื่องยนต์แก๊สโซลีน” , **EECON35**, 2555.
- [8] S. Potivejkul., P. Udomdat., K. Kitwattana., and V. Kinnarees., “The Development of a Prototype of Polluted Gas Reducing Instrument Used for Gasoline Vehicle” **IEEE Region 10 Conference (TENCON)**, 2013.
- [9] K. Kit Wattana., and P. Yutthagowith. “**Lightning Impulse Voltage Parameter Evaluation Using Neuron Network Algorithm**” **14th International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures (ISET)**, Kyoto, Japan, 8 Dec. 2018.
- [10] K. Kitwattana., and P. Yutthagowith. “Application of A Neural Network Algorithm for Evaluation of Lightning Impulse Voltage Parameters,” **The 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2019)**, Hong Kong, China, 12-14 June. 2019.
- [11] P. Yutthagowith., K. Kitwattana., and A. Kunakorn “Fast and Effective Technique in Evaluation of Lightning Impulse Voltage Parameters” **Journal of Electrical Engineering & Technology**, vol. 16, pp 459–467.