

การหาค่าประกอบวงจรไฟฟ้าแฉ่งและโหลดในวงจรสร้าง
แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในวัฏจักรความถี่

DETERMINATION OF STRAY AND LOAD PARAMETERS IN LIGHTNING
IMPULSE VOLTAGE GENERATION CIRCUIT IN THE FREQUENCY DOMAIN



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-M-027-033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DETERMINATION OF STRAY AND LOAD PARAMETERS IN LIGHTNING
IMPULSE VOLTAGE GENERATION CIRCUIT IN THE FREQUENCY DOMAIN



PONGSATORN TERMTACHATIPONGSA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
(MULTI-DISCIPLINARY PROGRAM)

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

KMITL-2023-EN-M-027-033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแรงและโหนดในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในวัฏจักรความถี่
นักศึกษา	นายพงศธร เต็มเตชาติพงศ์
รหัสประจำตัว	64601092
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พีรฤดี ยุทธโกวิท

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการหาค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแรงในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในวัฏจักรความถี่ เพื่อนำองค์ประกอบวงจรที่ได้ไปใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse voltage withstand test) ให้มีองค์ประกอบรูปคลื่นได้แก่เวลาหน้าคลื่น (Front time) เวลาหลังคลื่น (Time to half) และอัตราส่วนพุ่งเกิน (Overshoot rate) เป็นไปตามมาตรฐาน IEC60060-1 (2010) ได้อย่างรวดเร็วและลดขั้นตอนการลองผิดลองถูกที่อาจก่อให้เกิดการเสียหายและเสื่อมสภาพของฉนวนในอุปกรณ์ทดสอบไฟฟ้าแรงสูง โดยปกติแล้วในทางปฏิบัติการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่านั้นไม่สามารถทราบค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าบางตัวได้อย่างแม่นยำ เช่น องค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแรงต่างๆ ได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำรวมในวงจร ความจุไฟฟ้าในวงจร หรืออุปกรณ์ทดสอบชนิดต่างๆ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีอิทธิพลต่อรูปคลื่นที่สร้างขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การวัดองค์ประกอบเหล่านี้ค่อนข้างซับซ้อนและใช้เวลานาน โดยจุดเด่นที่สำคัญของวิธีการที่นำเสนอคือไม่จำเป็นต้องทราบค่าองค์ประกอบของอุปกรณ์ทดสอบหรือองค์ประกอบชุดวัด โดยสามารถรวมเป็นอิมพีแดนซ์โหนดได้เลย อีกทั้งกรณีที่มีการต่อองค์ประกอบเพิ่มเข้ากับวงจรไฟฟ้าสามารถนำค่าองค์ประกอบที่เพิ่มมารวมกับอิมพีแดนซ์โหนดได้เช่นเดียวกับการรวมกับระบบวัด ซึ่งหลักการของวิธีที่นำเสนอเริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปจากการทดสอบขณะไม่มีอุปกรณ์ทดสอบ จากนั้นใช้การแปลงฟูริเยร์เพื่อให้สัญญาณถูกแปลงจากวัฏจักรเวลาเป็นวัฏจักรความถี่ และใช้การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานโหนด และความจุไฟฟ้าโหนด หลังจากหาค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแรงและองค์ประกอบโหนดอันเกิดจากระบบวัด ทำให้สามารถจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยการปรับค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าส่วนอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้เวลาหน้าคลื่น เวลาหลังคลื่น และอัตราส่วนพุ่งเกินอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดโดยไม่จำเป็นต้องทำการทดลองจริง นอกจากนี้เพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการนี้จึงได้มีการทดสอบด้วยการจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการทดสอบด้วยทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ จากผลลัพธ์การหาค่าประกอบวงจรไฟฟ้าแฉงและองค์ประกอบโหนดจากการคำนวณมีความผิดพลาดไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าวิธีการที่นำเสนอมีความแม่นยำและสามารถใช้งานได้จริง ความสำเร็จในงานวิจัยนี้จึงมีประโยชน์อย่างมากในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากสามารถทำให้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในการทดสอบให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานด้วยการทดลองเพียงแค่นี้ก็ครั้ง ช่วยให้ลดเวลาการทดสอบและช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายและการเกิดความผิดพลาดโดยไม่ตั้งใจของฉนวนในอุปกรณ์ทดสอบไฟฟ้าแรงสูงได้เป็นอย่างดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Determination of Stray and Load Parameters in Lightning Impulse Voltage Generation Circuit in the Frequency Domain
Student	Mr.Pongsatorn Termtachatipongsa
Student ID.	64601092
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Peerawut Yutthagowith

ABSTRACT

This thesis presents a frequency domain method for determining the stray and load circuit parameters of the lightning impulse voltage generator. The determined stray and load impedance parameters are utilized in the simulation of the lightning impulse voltage generation and for controlling the waveform parameters (the front time, the time to half, and the overshoot rate) to be within the standard IEC 60060-1 (2010) requirement with the fast process and reduction of the trial and error process. Due to the trial and error process, the insulation in the high-voltage equipment deteriorates and wastes time in testing. In practice, for lightning impulse voltage testing, some generating circuit parameters such as stray inductance, stray capacitance, and high voltage test equipment are often unknown. These parameters significantly influence the generated waveform. Also, the measurement of these parameters is quite complicated and time-consuming. However, a great advantage of the proposed method is that the impedances of a measuring system and an additional load can be combined as a combined equivalent impedance. In the first step for the determination of such circuit parameters, the lightning impulse voltage waveforms generated by the generator with a measuring system and without a test object are measured and recorded by a digital oscilloscope. Using the Fourier transform, signals are converted from the time domain to the frequency domain. Then, multiple linear regression is utilized to determine the stray series inductance, paralleled resistance, and paralleled capacitance. From the determined stray circuit components and the load circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ III อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

parameters, the other generator circuit components can be effectively adjusted with the help of a circuit simulator to obtain the waveform parameters, including the front time, the time to half, and the overshoot rate, as per the standard requirements. For the verification of the proposed method, some simulations and experiments were performed and compared. From the simulation and experimental results of the determination of the stray circuit parameters, the proposed method is fairly accurate, and the deviations are within 3%. Also, the simulation results agree well with the experimental ones. The achievements in this research are very useful in testing the lightning impulse voltage with high-voltage test equipment. Using the proposed method, the lightning impulse voltage waveform parameters can be controlled within the standard requirement with the minimum amount of tests. Consequently, testing process time, risk of unintentional damage, and insulation degradation of the HV equipment are significantly reduced.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาจากหลายท่าน ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พีรฤติ ยุทธโกวิท ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา และมอบความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ดร.ปณยวีร์ ฉายศิริ คุณณัฐพล มฤคทัต และคุณสรารุติ ประมวลสิงห์ ที่คอยให้ความรู้และแนะนำการใช้งานอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และแสดงความคิดเห็นที่มีประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลอื่น ๆ ที่มีได้กล่าวถึงที่คอยให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตั้งแต่อดีตจนปัจจุบัน

สำหรับคุณงามความดีที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พงศธร เต็มเตชาติพงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.6 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 แรงดันอิมพัลส์มาตรฐานและการวิเคราะห์ในวัฏจักรความถี่.....	4
2.1 รูปลักษณ์แรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน.....	4
2.2 วงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	6
2.3 การออกแบบวงจรแรงดันอิมพัลส์.....	8
2.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น.....	9
2.5 การวัดรูปลักษณ์แรงดันอิมพัลส์.....	12
2.6 การหาค่าประกอบรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60060-1 (2010).....	13
2.7 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการหาค่าประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	14
2.7.1 ทฤษฎีการหาส่วนโค้งที่เหมาะสม.....	14
2.7.2 ทฤษฎีการแปลงฟูรีเยร์.....	18
2.7.3 ทฤษฎีวิเคราะห์การถดถอย.....	21
บทที่ 3 การหาค่าประกอบแอมพลิจูดและโหนดของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	23
3.1 โปรแกรมสำหรับหาค่าประกอบแอมพลิจูดและโหนด.....	23
3.2 การจำลองสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	25

สารบัญ(ต่อ)

3.2.1 การจำลองปรับค่าองค์ประกอบแฝงในวงจรแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	25
3.2.2 การจำลองปรับค่าองค์ประกอบโพลดในวงจรแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า...	26
3.3 การปรับคุณภาพข้อมูลดิบหลังจากการทดลอง.....	27
3.3.1 การแก้ปัญหาเรื่องจำนวนข้อมูลไม่เพียงพอ.....	29
3.3.2 การแก้ปัญหาเรื่องส่วนพุ่งเกินในช่วงเวลาเริ่มต้นแรงดันอิมพัลส์.....	30
3.4 การแปลงข้อมูลจากวัฏจักรเวลาไปสู่วัฏจักรความถี่โดยใช้การแปลงฟูริเยร์..	31
3.5 การหาค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้า.....	33
3.5.1 หาค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฝง.....	34
3.5.2 หาค่าองค์ประกอบโพลด.....	36
3.6 การปรับค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าเพื่อให้ได้รูปคลื่นตามมาตรฐาน.....	38
บทที่ 4 การทดสอบและการประเมินผล.....	39
4.1 ทดสอบด้วยการจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	39
4.1.1 กรณีทดสอบ.....	39
4.1.2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณกับค่าจริง.....	42
4.2 ทดสอบด้วยการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ.....	46
4.2.1 กรณีที่ 1 การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่ขดลวด แรงดันปานกลาง.....	46
4.2.2 กรณีที่ 2 การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลังที่ขดลวด แรงดันไฟฟ้าปานกลาง.....	52
4.2.3 กรณีที่ 3 การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลังโดยใช้วงจรเกล นิงเกอร์.....	54
4.2.4 กรณีที่ 4 การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลังที่ขดลวด แรงดันไฟฟ้าแรงสูง.....	58
4.3 การประเมินผลการหาค่าองค์ประกอบแฝงและโพลดในวงจรสร้างแรงดัน อิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	60
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	64
5.1 สรุป.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหา.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	69
ภาคผนวก ข โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบผง และโพลีเมอร์ในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	79
ภาคผนวก ค เวลาที่ใช้ในการคำนวณองค์ประกอบวงจรผงและโพลี.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	85



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 ของแรงดันอิมพัลส์.....	9
ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของการวัฏจักรเวลากับวัฏจักรความถี่.....	32
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าองค์ประกอบของกรณีทดสอบ.....	39
ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำแฝง L_s ที่คำนวณได้กับค่าที่ใช้ จำลอง.....	43
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าไหลต C_f ที่คำนวณได้กับค่าที่ใช้ จำลอง.....	43
ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานไหลต R_f ที่คำนวณได้กับค่าที่ใช้ จำลอง.....	43
ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันอัดประจุ U_0 ที่คำนวณได้กับค่าที่ใช้จำลอง	44
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบองค์ประกอบรูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณด้วย องค์ประกอบวงจรมอดูเลเตอร์และองค์ประกอบรูปคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์.....	45
ตารางที่ 4.7 กรณีทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ.....	46
ตารางที่ 4.8 ค่าองค์ประกอบแฝงที่คำนวณได้.....	48
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบวงจรมอดูเลเตอร์ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณเทียบกับค่าที่ ใช้จำลอง.....	61
ตารางที่ 4.10 แสดงค่า R-square เมื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นจากการคำนวณกับรูปคลื่น จากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ.....	63
ตารางที่ ค.1 แสดงเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลต่อ 1 รอบของการทดสอบแบบจำลอง รูปคลื่นขึ้นมา.....	83
ตารางที่ ค.2 แสดงเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลต่อ 1 รอบของการทดสอบจริงใน ห้องปฏิบัติการ.....	84

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน.....	5
รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงมาตรฐาน.....	5
รูปที่ 2.3 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าพื้นฐาน.....	6
รูปที่ 2.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานในวัฏจักร S.....	7
รูปที่ 2.5 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ 2 ชั้น.....	10
รูปที่ 2.6 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ 4 ชั้น.....	11
รูปที่ 2.7 ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์.....	12
รูปที่ 2.8 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบเชิงเส้น.....	15
รูปที่ 2.9 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบลอการิทึม.....	16
รูปที่ 2.10 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบโพลีโนเมียล.....	16
รูปที่ 2.11 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบยกกำลัง.....	17
รูปที่ 2.12 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบเอกซ์โพเนนเชียล.....	17
รูปที่ 2.13 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่.....	18
รูปที่ 2.14 การสุ่มสัญญาณ $f(t)$ ด้วยคาบ T	19
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนของโปรแกรมหาค่าประกอบวงจรแฉงและโหลดในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	24
รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลในการจำลองแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	25
รูปที่ 3.3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีอัตราส่วนพุ่งเกินมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์.....	26
รูปที่ 3.4 การเก็บข้อมูลจากการทดสอบที่มีช่วงเวลาสั้นเกินไป.....	28
รูปที่ 3.5 การเกิดส่วนพุ่งเกินขนาดเล็กส่วนหน้าของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	28
รูปที่ 3.6 การเกิดสัญญาณรบกวนมากเกินไปจากสภาพแวดล้อม.....	28
รูปที่ 3.7 การเพิ่มจำนวนข้อมูลจนกว่าเปอร์เซ็นต์จุดต่ำกว่า 0.01 เปอร์เซ็นต์.....	29
รูปที่ 3.8 การแก้ปัญหาส่วนพุ่งเกินในส่วนหน้าคลื่นด้วยการหาส่วนโค้งที่เหมาะสม.....	30
รูปที่ 3.9 กราฟเปรียบเทียบการหาส่วนโค้งที่เหมาะสมด้วยวิธีต่าง ๆ	31
รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบดิจิทัลที่ได้มาจากออสซิลโลสโคป.....	32
รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หลังแปลงฟูริเยร์.....	33
รูปที่ 3.12 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หลังแปลงฟูริเยร์และตัดความถี่มากกว่า 250 kHz	33
รูปที่ 3.13 วงจรสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในวัฏจักร S.....	34
รูปที่ 3.14 ค่าองค์ประกอบแฉงในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ X อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปลูกภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.15 วงจรสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบรวมโหลดและชุดวัดเป็นอิมพีแดนซ์โหลด.....	37
รูปที่ 3.16 วงจรสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าพร้อมปรับค่าองค์ประกอบรูปคลื่น.....	38
รูปที่ 4.1 การจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	39
รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L15.....	40
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L30.....	40
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L60.....	41
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L120.....	41
รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L240.....	41
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L480.....	42
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L960.....	42
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบรูปคลื่นที่ใช้จำลองกับรูปคลื่นที่จำลองจากองค์ประกอบที่คำนวณได้.....	44
รูปที่ 4.10 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีไม่ต่อโหลด.....	47
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 1(1).....	47
รูปที่ 4.12 องค์ประกอบแผงที่ทำได้ในวงจรไฟฟ้า.....	48
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 1(2) (ก) ช่วงเวลายาว (ข) ช่วงเวลาสั้น.....	49
รูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 1(3) (ก) ช่วงเวลายาว (ข) ช่วงเวลาสั้น.....	51
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 2(1).....	52
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 2(2) (ก) ช่วงเวลายาว (ข) ช่วงเวลาสั้น.....	53
รูปที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 3(1).....	55
รูปที่ 4.18 วงจรแกลนิงเกอร์.....	56
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 3(2) (ก) ช่วงเวลายาว (ข) ช่วงเวลาสั้น.....	57
รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 4(1).....	58
รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 4(2) (ก) ช่วงเวลายาว (ข) ช่วงเวลาสั้น.....	59

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความผิดพลาดความเหนียวนำแฝง L_s จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้จำลองแรงดันอิมพัลส์.....	61
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความผิดพลาดความจุไฟฟ้าไหลต C_t จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้จำลองแรงดันอิมพัลส์.....	62
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความผิดพลาดความต้านทานไหลต R_t จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้จำลองแรงดันอิมพัลส์.....	62
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความผิดพลาดแรงดันอัดประจุ U_0 จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้จำลองแรงดันอิมพัลส์.....	63
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่า R-square เมื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นจากการคำนวณกับรูปคลื่นจากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ.....	63
รูปที่ ข.1 หน้าแสดงผลของโปรแกรม MATLAB.....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้นตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องมีระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูงที่มีเสถียรภาพและมีความน่าเชื่อถือสูง นั่นคือต้องมีระบบป้องกันการเกิดผิดพร่องไม่ให้ส่งผลกระทบต่อระบบ อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในระบบส่งจ่ายพลังงานจำเป็นต้องมีการฉนวนที่เพียงพอ ทนต่อสภาวะอากาศทุกรูปแบบ และอายุการใช้งานยืนยาว เพื่อให้ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงและระบบไฟฟ้าใช้งานได้ในระดับแรงดันไฟฟ้าใช้งานและแรงดันเกินได้อย่างมีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดมาตรฐานต่าง ๆ

ด้วยเหตุนี้การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์ IEC 60060-1 (2010) [1] จึงเป็นหนึ่งในหัวข้อที่นำมาทดสอบก่อนเอาอุปกรณ์ไปติดตั้งจริงในระบบ เนื่องจากมีโอกาสที่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะได้รับแรงดันอิมพัลส์ ไม่ว่าจะจากปรากฏการณ์ธรรมชาติฟ้าผ่า เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse voltage) หรือการทำงานของสวิตช์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ผิดพลาด เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ (Switching impulse voltage) โดยจะใช้วงจร RC [2] ในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นมาเพื่อทดสอบและวิเคราะห์อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงให้ผ่านเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานกำหนด ในกรณีที่ผลการทดสอบไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดโดยทั่วไปแล้วจะปรับองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าที่กำหนดหน้าคลื่นและหลังคลื่นหรือมีการต่อองค์ประกอบอื่นเพิ่มเติมเข้าวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อให้รูปคลื่นอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนดไว้ แต่เนื่องจากผู้ทดสอบอาจมีความผิดพลาดได้ไม่ว่าจากการขาดทักษะ ความรู้ หรือความรอบคอบ ทำให้ต้องมีการทดสอบหลายรอบจึงส่งผลให้ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่นำมาทดสอบเกิดความเสียหาย จึงมีความเป็นไปได้ที่ผลลัพธ์จากการทดสอบจะเกิดความคลาดเคลื่อนและผิดพลาด

จากปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการใช้วัฏจักรความถี่ในการหาองค์ประกอบแผงและโหลดของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับกรณีที่รูปคลื่นไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด การวิเคราะห์ในวัฏจักรความถี่นั้นทำได้ง่ายกว่าและการคำนวณไม่ซับซ้อนเท่าวัฏจักรเวลา ซึ่งการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณนั้นช่วยลดจำนวนครั้งการทดสอบ อีกทั้งยังแม่นยำ รวดเร็ว และน่าเชื่อถือในผลลัพธ์การทดสอบ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังให้นำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวัดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์รวมถึงคำนวณหาค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่เหมาะสม เพื่อให้การทดสอบและการวิเคราะห์มีความแม่นยำ สามารถกำหนดองค์ประกอบในวงจรได้ถูกต้องโดยไม่ต้องลองผิดลองถูกในทางปฏิบัติ ซึ่งจะนำไปทดสอบโดยที่ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงไม่เกิดความเสียหายและผ่านเกณฑ์ที่มาตราฐานกำหนด

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาองค์ประกอบแผงและโหนดของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในวัฏจักรความถี่ โดยที่มีความแม่นยำและมีความผิดพลาดไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ เพื่อที่จะนำองค์ประกอบแผงและโหนดมาคำนวณหาองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าที่ใช้กำหนดหน้าคลื่นและหลังคลื่นได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้การทดสอบได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาองค์ประกอบแผงและโหนดในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในวัฏจักรความถี่ด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์ โดยทำการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงตามมาตรฐานกำหนดก่อน ถ้าเกิดว่าไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตราฐานกำหนดต้องมีการปรับองค์ประกอบหน้าคลื่นและหลังคลื่นจึงใช้โปรแกรมคำนวณในวัฏจักรความถี่หาค่าองค์ประกอบแผงและโหนด จากนั้นจึงทำการคำนวณต่อว่าองค์ประกอบที่ใช้ปรับหน้าคลื่นและหลังคลื่นต้องมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลง โดยมีการเปรียบเทียบรูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณกับรูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณเพื่อให้สอดคล้องกับทฤษฎี

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการวางแผนลำดับขั้นตอนอย่างรอบคอบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและผิดพลาดน้อยที่สุด โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า
- 2) ศึกษาโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม ATPDraw เพื่อใช้ในการจำลองและวิเคราะห์วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า
- 3) ออกแบบการทำงานของโปรแกรม MATLAB ให้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบรูปคลื่นและสามารถคำนวณความต้านทานที่ใช้กำหนดหน้าคลื่นและหลังคลื่นให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) แก้ไขส่วนที่ผิดพลาดในโปรแกรม MATLAB
- 5) ทดสอบการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB เทียบผลลัพธ์กับองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าที่ใช้จำลองด้วยโปรแกรม ATPDraw และรูปคลื่นที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ
- 6) สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ
- 7) จัดทำรูปฉบับวิทยานิพนธ์

1.6 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปีค.ศ. 2002 Robert M. Del Vecchio และคณะ [3] ได้นำเสนอแบบจำลองชุดองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้กับหม้อแปลงทุกชนิดในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยนำเสนอแบบจำลองวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์และแบบจำลองวงจรหม้อแปลง จากนั้นเป็นสมการคำนวณองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าให้ได้ค่าที่เหมาะสม ซึ่งสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ใกล้เคียงกับอุดมคติและใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการลองผิดลองถูกแทนที่จะเป็นการทดสอบในทางปฏิบัติ

ในปีค.ศ. 2011 Shigemitsu Okabe และคณะ [4] ได้นำเสนอแบบจำลองวงจรความถี่สูง โดยสามารถใช้กับหม้อแปลงน้ำมัน 500 kV ได้ที่ความถี่สูงจนถึงหลัก MHz โดยรูปแบบของแบบจำลองคือการอนุกรม LC 3 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นจะมีตัวเหนี่ยวนำขนานกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ไฟกระชากที่สถานี GIS แบบ 3 เฟส 500 kV หากเชื่อมแบบจำลองความถี่สูงนี้ ค่ายอดจะมีค่าลดลงในขณะที่อัตราการสร้างแรงดันเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโมเดลจำลองแบบดั้งเดิม เนื่องจากปรากฏการณ์ของตัวเก็บประจุในหม้อแปลง การเลือกขนาดบัสบาร์และสายไฟในวงจรก็มีผลต่อค่ายอด

ในปีค.ศ. 2019 Hassan Reza Mirzaei [5] ได้นำเสนอแบบจำลองที่ง่าย รวดเร็ว และแม่นยำในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งช่วยระบุองค์ประกอบในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ Marx โดยมีหลักการคือนำผลตอบสนองในวัฏจักรความถี่มาแยกออกด้วยเครื่องวัด SFRA และใช้สมการที่นำเสนอไว้ในงานวิจัยเพื่อให้ได้การตอบสนองแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในวัฏจักรความถี่แบบไม่ต่อเนื่อง หลังจากนั้นใช้การแปลงฟูรีเยร์ผกผันรวดเร็วในการแปลงให้อยู่ในวัฏจักรเวลา

บทที่ 2

แรงดันอิมพัลส์มาตรฐานและการวิเคราะห์ในวัฏจักรความถี่

2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

อุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีโอกาสสูงที่จะได้รับแรงดันทรานเซียนต์ในขณะที่ใช้งานแรงดันทรานเซียนต์ก่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงมาก เมื่อฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงนี้ นำไปสู่การเกิดความผิดปกติ โดยสาเหตุของการเกิดทรานเซียนต์มี 2 ประการ ได้แก่ แรงดันที่เกิดจากฟ้าผ่าเรียกว่า รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse voltage) และแรงดันที่เกิดจากระบบไฟฟ้า เช่นการทำงานของสวิตช์หรือเบรกเกอร์เรียกว่า รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (Switching impulse voltage) ดังนั้นอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าจึงต้องมีการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าไม่เกิดฟอลต์ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายต่อระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยการสร้างแรงดันรูปคลื่นเลียนแบบเหล่านี้ขึ้นมาเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ [6]

เนื่องจากปัจจัยการทดสอบไม่ใช่เพียงแค่อุณหภูมิแรงดันสูงสุดเท่านั้น แต่ขึ้นกับการแปรตามเวลาด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดเพื่อให้เป็นมาตรฐานสากล ซึ่งใช้เกณฑ์ 4 ข้อในการพิจารณา รูปลักษณะของคลื่นอิมพัลส์ดังต่อไปนี้

- 1) ขนาดของแรงดัน
- 2) ขั้วของแรงดันเมื่อเทียบกับดิน อาจเป็นขั้วบวกหรือลบก็ได้
- 3) เวลาคู่หน้าคลื่น T_1
- 4) เวลาคู่หลังคลื่น T_2

ซึ่งในห้องปฏิบัติการแบ่งรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานจะมีข้อมูลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

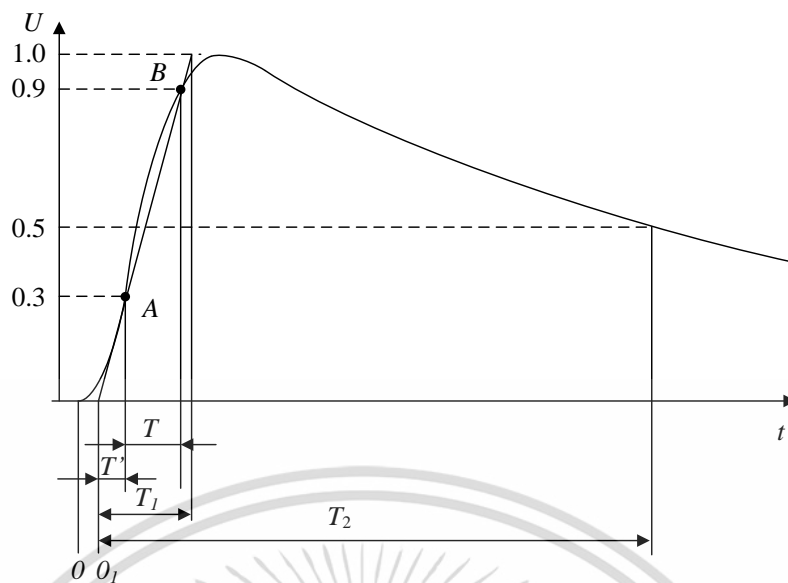
- 1) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

รูปคลื่นมาตรฐานแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าดังรูปที่ 2.1 ตามการกำหนดของมาตรฐาน IEC 60060-1 กำหนดไว้ว่าเป็นแรงดันที่มีช่วงเวลาคู่หน้าคลื่น T_1 ต่อเวลาคู่หลังคลื่น T_2 เป็น 1.2/50 μs โดยกำหนดความคลาดเคลื่อนไว้ดังต่อไปนี้

เวลาคู่หน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30$ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเท่ากับช่วง 0.84 - 1.56 μs

เวลาคู่หลังคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20$ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเท่ากับช่วง 40 - 60 μs

ค่ายอด U_p ที่มีค่าความผิดพลาดได้ ± 3 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน

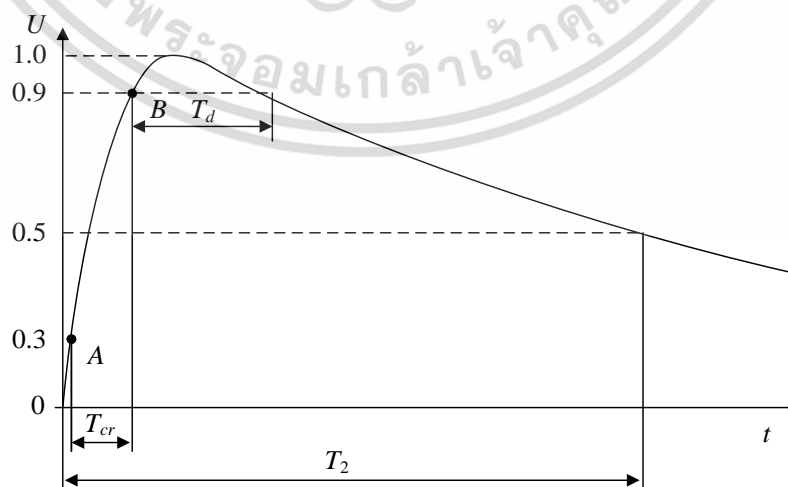
2) แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

ในส่วนของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงข้อกำหนดจะคล้ายกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในส่วนของเวลาหลังคลื่น T_2 แต่จะแตกต่างตรงเวลาหน้าคลื่นจะใช้ T_{cr} แทนเนื่องจากเป็นเวลาที่แรงดันเริ่มจากค่าศูนย์จนถึงเวลาที่มีค่าเป็นจุดยอด ดังรูปที่ 2.2 ตามการกำหนดของมาตรฐาน IEC 60060-1 กำหนดไว้ว่าเป็นแรงดันที่มีช่วงเวลาหน้าคลื่น T_{cr} ต่อเวลาหลังคลื่น T_2 เป็น 250/2500 μs โดยกำหนดความคลาดเคลื่อนไว้ดังต่อไปนี้

เวลาหน้าคลื่น $T_{cr} = 250 \mu s \pm 20$ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเท่ากับช่วง 200 - 300 μs (แตกต่างจาก

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยกรณีนี้จะเริ่มจาก 0 จริง)

เวลาหลังคลื่น $T_2 = 2500 \mu s \pm 60$ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเท่ากับช่วง 1000 - 4000 μs



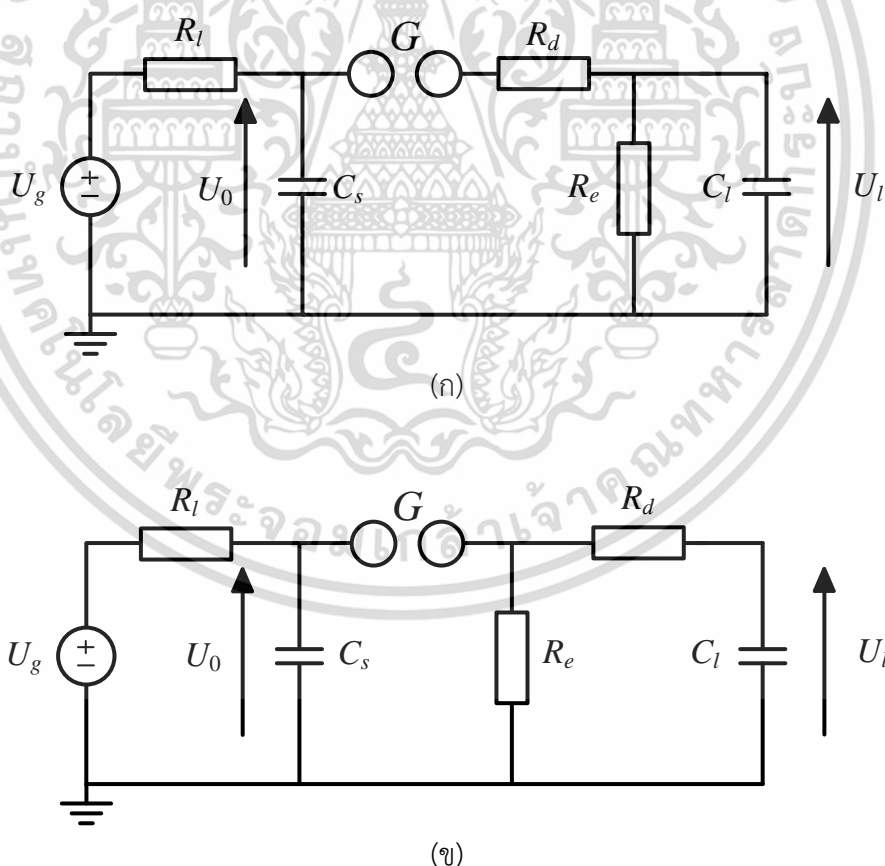
รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเพียงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็นหลัก

2.2 วงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์

วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าพื้นฐาน [2] จะประกอบด้วย ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.3 โดยวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะมี 2 วงจรได้แก่ วงจร A และวงจร B ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้วงจร B มากกว่า เพราะมีประสิทธิภาพมากกว่าและปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ง่ายกว่าวงจร A ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะวงจร B เท่านั้น ซึ่งมีหลักการคือ ป้อนแรงดันอัดประจุ U_g เข้าตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์ C_s ผ่านตัวต้านจำกัดกระแสอัดประจุ R_l จนกว่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจะเพียงพอที่จะข้ามสปาร์กแกป และแรงดันไฟฟ้าสูงจะถูกถ่ายโอนจากขั้วอิเล็กโทรดฝั่งแรกไปยังขั้วอิเล็กโทรดอีกฝั่งของสปาร์กแกปและทำให้เป็นวงจรที่เชื่อมต่อกัน แรงดันไฟฟ้าได้ผ่านตัวต้านทานที่ใช้ปรับหน้าคลื่น R_d และตัวเก็บประจุโหลด C_l ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d และตัวเก็บประจุโหลด C_l เป็นตัวกำหนดเวลาหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายประจุจนตัวเก็บประจุโหลด C_l ประจุเต็มแล้ว ประจุนี้จะปล่อยประจุออกไปที่ตัวต้านทานหลังคลื่น R_e ซึ่งเป็นตัวควบคุมเวลาหลังคลื่น T_2



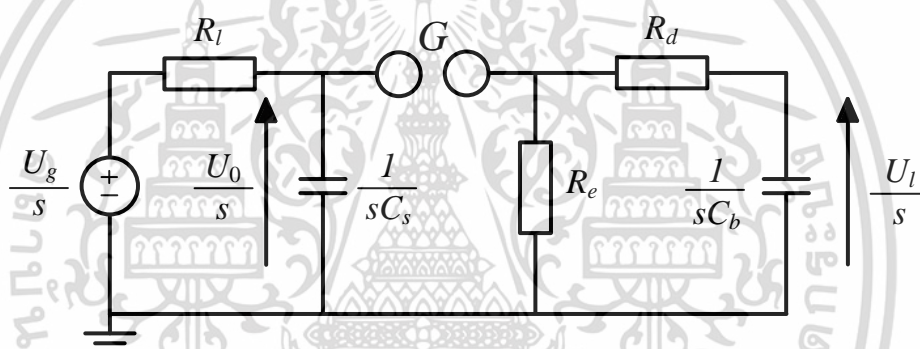
รูปที่ 2.3 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าองค์ประกอบในวงจรไฟฟ้า

C_s	คือ ตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์
C_l	คือ ตัวเก็บประจุของโหลด เครื่องมือวัด และอุปกรณ์อื่น ๆ
R_l	คือ ตัวต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
R_d	คือ ตัวต้านทานที่ใช้ปรับหน้าคลื่น
R_e	คือ ตัวต้านทานที่ใช้ปรับหลังคลื่น
U_0	คือ แรงดันไฟอัดประจุ
U_g	คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
G	คือ ช่องว่างแกป

จากรูปที่ 2.3 วงจรที่ได้กล่าวไปสามารถคำนวณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ตัวเก็บประจุ โหลด C_l โดยใช้การแปลง Laplace transform [7] เพื่อให้ได้วงจรสมมูลในวงจกร S ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานในวงจกร S

จากวงจรในรูปที่ 2.4 ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานหลังคลื่น R_e จะเขียนได้ว่า

$$U_e(s) = \frac{U_0}{S} \left(\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$Z_1 = \frac{1}{C_s S} \quad (2.2)$$

$$Z_2 = \frac{R_e \left(R_d + \frac{1}{C_b S} \right)}{R_e + R_d + \frac{1}{C_b S}} \quad (2.3)$$

ดังนั้น

$$U_e(s) = \frac{U_0 (R_d R_e C_s C_b S + R_e C_s)}{R_d C_b S + R_e C_b S + R_e C_s S + R_d R_e C_s C_b S^2} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแรงดันตกคร่อมโพลต์ จะคำนวณตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$U_l(s) = \frac{U_e(s) \frac{1}{C_b S}}{R_d + \frac{1}{C_b S}} = \frac{U_e(s)}{R_d C_b S + 1} \quad (2.5)$$

$$U_l(s) = \frac{U_0 R_e C_s}{R_d R_e C_s C_b S^2 + (R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b) S + 1} \quad (2.6)$$

$$U_l(s) = \frac{U_0}{R_d C_b} \frac{1}{S^2 + \frac{(R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b) S}{R_d R_e C_s C_b} + \frac{1}{R_d R_e C_s C_b}} \quad (2.7)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็น

$$U_l(s) = \frac{U_0}{K(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[\frac{1}{(s - \alpha_1)} - \frac{1}{(s - \alpha_2)} \right] \quad (2.8)$$

$$K = R_d C_b \quad (2.9)$$

$$a = \frac{R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_s C_b} \quad (2.10)$$

$$b = \frac{1}{R_d R_e C_s C_b} \quad (2.11)$$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4b}}{2} \quad (2.12)$$

จึงเขียนคำรูปคลี่นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในวัฏจักรเวลา ประกอบด้วยเอกซ์โพเนนเชียล 2 เทอมบวกกัน โดยมีค่าคงที่ที่อยู่ ค่าคงที่นี้จะขึ้นกับองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ โดยเมื่อนำสมการมาคิดในเชิงคณิตศาสตร์ จะได้ดังสมการที่ 2.13

$$U(t) = \frac{U_0}{K(\alpha_2 - \alpha_1)} [e^{(-\alpha_1 t)} - e^{(-\alpha_2 t)}] \quad (2.13)$$

2.3 การออกแบบวงจรแรงดันอิมพัลส์

ในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์ C_s ควรจะมีขนาดใหญ่กว่าตัวเก็บประจุโพลต์ C_l มาก ๆ (ควรมากกว่า 10 เท่า) ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานหน้าคลื่น R_d และหลังคลื่น R_e ดังสมการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_d = \frac{1}{2C_b} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{C_s \alpha_1 \alpha_2}} \right] \quad (2.14)$$

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{C_s \alpha_1 \alpha_2}} \right] \quad (2.15)$$

ซึ่งค่า α_1 และ α_2 จะมีหลายค่าขึ้นอยู่กับว่าต้องการสร้างแรงดันอิมพัลส์ชนิดใด โดยค่า k_1 และ k_2 สามารถดูค่าได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 ของแรงดันอิมพัลส์

T_1/T_2	$1/\alpha_1$ (μ s)	$1/\alpha_2$ (μ s)	k_1	k_2
1.2/5	3.47	0.85	1.44	1.49
1.2/50	68.5	0.405	0.73	2.96
1.2/200	286	0.381	0.70	3.15
250/2500	2875	104.0	0.87	2.41

สังเกตได้ว่า α_1 จะมีค่าน้อยกว่า α_2 มาก ดังนั้นสามารถประมาณได้ตามสมการที่ 2.16 และ 2.17

$$R_d = \frac{T_1 (C_s + C_b)}{k_2 (C_s C_b)} \quad (2.16)$$

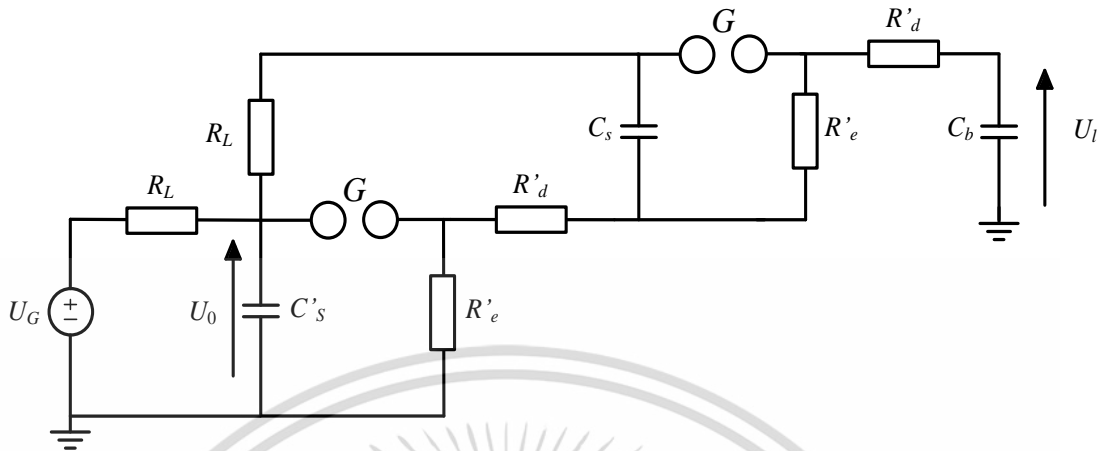
$$R_e = \frac{T_2}{k_1 (C_s + C_b)} \quad (2.17)$$

2.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น

โดยทั่วไปวงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสามารถสร้างแรงดันได้ถึง 200 kV ซึ่งไม่เพียงพอในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นจึงมีการนำวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์มาต่อกัน เพื่อให้สร้างแรงดันอิมพัลส์ที่สูงขึ้นได้ โดยเรียกว่าเครื่องสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น (Multi-stage impulse voltage generator) ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งมีหลักการจากวงจรมาร์กซ์ (Marx's circuit) โดยทั่วไปแล้วมักมีจำนวนชั้นเป็นเลขคู่เพื่อให้สะดวกต่อการขนานตัวเก็บประจุแต่ละชั้นเข้าด้วยกัน เมื่อตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์ C_s คายประจุออกมาผ่านสปาร์กแกปตัวเก็บประจุจะกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุกรมต่อ ๆ กัน แรงดันในวงจรจึงทวีคูณขึ้น โดยมีเงื่อนไขคือระยะสปาร์กแกปชุดแรกต้องมีระยะน้อยสุดเพื่อให้เกิดการสปาร์กก่อนแล้วแกปถัด ๆ ไปค่อยทำงานไล่ไปตามลำดับ



รูปที่ 2.5 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ 2 ชั้น

เพื่อให้เข้าใจการทำงานของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ขณะอัดประจุและคายประจุสามารถพิจารณาจากวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า 4 ชั้น [8] ดังรูปที่ 2.6

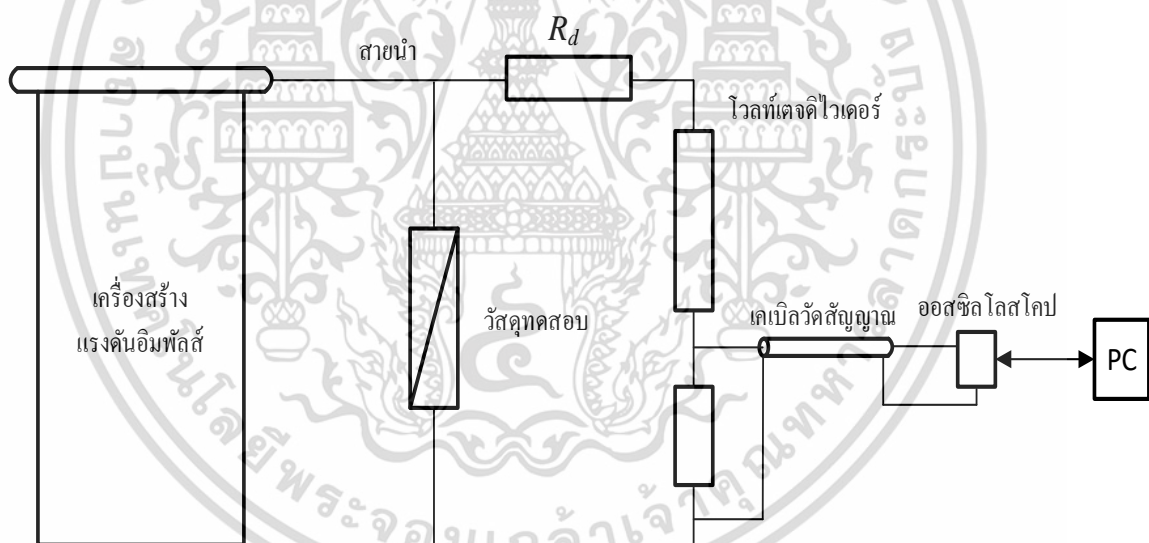
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

การวัดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้นต้องมีวิธีการเฉพาะในการวัดแตกต่างจากการวัดแรงดันประเภทอื่น โดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธีได้แก่

1. วัดด้วยช่องว่างทรงกลม (Sphere gap) ปกติมักใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับเครื่องวัดชนิดอื่น เพื่อเช็คความถูกต้อง โดยการใช้การเบรกดาวน์ของทรงกลมเป็นค่าแรงดันทรงสถิต (Static breakdown voltage) ซึ่งเป็นค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์เท่านั้น
2. วัดด้วยตัวแบ่งแรงดัน (Voltage divider) ตัวแบ่งแรงดันจะทำหน้าที่ในการลดทอนแรงดันอิมพัลส์ แรงดันที่เข้าเครื่องวัดชนิดต่าง ๆ จะมีระดับที่ต่ำลง ซึ่งมีทั้งหมด 3 ประเภทได้แก่ เครื่องแบ่งแรงดันแบบตัวต้านทาน เครื่องแบ่งแรงดันแบบตัวประกอบประจุ เครื่องแบ่งแรงดันแบบผสมทั้งตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การวัดด้วยเครื่องแบ่งแรงดัน ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงการวัดด้วยเครื่องแบ่งแรงดันเท่านั้น โดยการแบ่งแรงดันก่อนเข้าออสซิลโลสโคป จะมีทั้งหมด 4 ส่วน ประกอบด้วย สายตัวนำแรงสูง ตัวแบ่งแรงดัน เคเบิลวัดสัญญาณ และออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

- สายตัวนำแรงสูง สายตัวนำที่ใช้มีปัจจัยที่ควรคำนึงอยู่ 2 ประการ ปัจจัยแรกคือความยาวของสายตัวนำต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของตัวแบ่งแรงดันเนื่องจากลดสนามไฟฟ้าที่เป็นปัจจัยทำให้การวัดผิดพลาด แต่ต้องไม่ยาวเกินจนเกิดความต้านทานให้แรงดันตกคร่อม ส่วนอีกปัจจัยคือลักษณะของสายต้องไม่มีความเหนียวนามากเกินไปซึ่งก่อให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ และมีเส้นผ่าศูนย์กลางสายที่โตพอให้ไม่เกิดโคโรนา โดยทั่วไปนิยมใช้สายประเภททองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวแบ่งแรงดัน ทำหน้าที่ในการลดทอนแรงดันสูงให้ต่ำลงให้สามารถใช้งานได้กับเครื่องวัดแรงดันต่ำ โดยมีหลักการคือนำอิมพีแดนซ์แรงสูงต่อเข้ากับแรงดันสูงที่ต้องการวัด แล้วนำแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แรงต่ำมาเข้าเครื่องมือวัดแรงต่ำ นอกจากนี้เครื่องมือวัดต้องมีอิมพีแดนซ์ภายในสูงมาก ๆ เพื่อความเที่ยงตรงมากที่สุด โดยปกติแล้วตัวแบ่งแรงดันมีทั้งหมด 3 รูปแบบ คือแบบความต้านทาน แบบตัวเก็บประจุ และแบบผสม ซึ่งแต่ละแบบมีการใช้งานที่แตกต่างกัน อีกหนึ่งปัญหาของตัวแบ่งแรงดันคือการเกิดคลื่นสะท้อนขึ้นซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็ว การป้องกันสามารถทำได้โดยต่อความต้านทานสมมูลกันที่มีค่าเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล ตัวแบ่งแรงดันแต่ละแบบมีการต่อตัวต้านทานสมมูลที่ต่างกันออกไป

- เคเบิลวัดสัญญาณ สายเคเบิลต้องมีการสัญญาณรบกวนจากภายนอก ปกติแล้วจะใช้แบบแกนร่วม (Coaxial cable) ในการลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อีกทั้งยังมีการชิลด์ 2 ชั้น เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในชั้นชิลด์ นอกจากนี้ความยาวต้องยาวไม่เกิน 10 เมตรเพราะถ้าเกินจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมสายเคเบิลสัญญาณที่วัดได้จึงเพี้ยน

- ออสซิลโลสโคป มีหน้าที่ในการแสดงรูปคลื่นการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลา ปัจจุบันการทดสอบอิมพัลส์คือต้องเลือกใช้ออสซิลโลสโคปแบบรูปคลื่นไม่ซ้ำเดิม (Single non-repetitive wave) และต้องมีอิมพีแดนซ์ภายในที่สูงมาก ๆ เพื่อไม่ให้เป็นโหลดของตัวแบ่งแรงดัน นอกจากนี้ต้องมีย่านการวัดที่กว้างมากพอที่จะบันทึกรูปคลื่น โดยปกติของการวัดแรงดันอิมพัลส์จะใช้ย่านการวัดมากกว่า 100MHz เมื่อได้รูปคลื่นและข้อมูลสัญญาณมาถึงออสซิลโลสโคปแล้ว จึงเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ในคอมพิวเตอร์ในลำดับถัดไป

2.6 การหาค่าประกอบรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60060-1 (2010)

ข้อมูลที่ได้จากการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในหัวข้อ 2.5 นำมาพิจารณาดังต่อไปนี้ จากรูปที่ 2.1 ในทางทฤษฎี หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานสากล [1] คือองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้ดังต่อไปนี้

- 1) ค่ายอด คือค่าแอมพลิจูดสูงสุดของรูปคลื่นเต็ม
- 2) เวลาค้นคืน คือ $1.67T$ ซึ่ง T คือเวลาในช่วงที่แรงดันมีค่าเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ และ 90 เปอร์เซ็นต์ ของค่ายอด ซึ่งการคำนวณแบบนี้จุดเริ่มต้นที่มีค่าเป็น 0 จะเป็นจุดเริ่มต้นเสมือน (Virtual Origin) หาได้จากการลากเส้นตรงผ่านจุดที่มีค่าแรงดัน 30 เปอร์เซ็นต์ และ 90 เปอร์เซ็นต์ ของค่ายอด จนกระทั่งเส้นตรงไปตัดแกนเวลา
- 3) เวลาหลังคืน คือเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นเสมือนผ่านจุดยอดไปจนถึงจุดที่มีค่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของค่ายอด ที่อยู่หลังจากจุดยอด

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จะมีค่าความเหนี่ยวนำในวงจรซึ่งส่งผลให้เกิดการแกว่งหรืออัตราส่วนฟุ้งซ่านที่จุดยอดของรูปคลื่น ซึ่งมาตรฐาน IEC60060-1 ก็ได้กำหนดวิธีการเพื่อหาค่าประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สำหรับกรณีนี้ไว้ว่า

1). คำนวณหารูปคลื่นฐาน (Base curve) ในรูปของผลต่างของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล 2 พจน์โดยนำเอาข้อมูลจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Recorded voltage waveform) ตั้งแต่ 20 เปอร์เซ็นต์ของค่ายอดในส่วนหน้าคลื่น ไปจนถึง 40 เปอร์เซ็นต์ของค่ายอดในส่วนหลังคลื่นมาหาเส้นโค้งที่เหมาะสมกับสมการที่ 2.18 จากนั้นใช้ลาเวนเบิร์กมาควอดท์ (Levenberg-Marquardt method) เพื่อหาค่าประกอบแต่ละตัวในสมการ

$$g(t) = A(e^{-\alpha(t-t_d)} - e^{-\beta(t-t_d)}) \quad (2.18)$$

2). นำรูปคลื่นฐานมาลบออกจากรูปคลื่นที่ได้จากการทดลอง (Record curve) ผลต่างที่ได้ออกมาเรียกว่า รูปคลื่นคงเหลือ (Residual curve)

3). ใช้ฟิลเตอร์กรองรูปคลื่นคงเหลือเพื่อกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการ ได้รูปคลื่นคงเหลือที่กรองสัญญาณแล้ว (Filter residual curve)

4). นำรูปคลื่นคงเหลือที่กรองสัญญาณแล้วมาบวกเข้ากับรูปคลื่นฐาน เพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันทดสอบออกมา (Test voltage curve)

5). รูปคลื่นแรงดันทดสอบนี้สามารถใช้หาค่าประกอบรูปคลื่นได้จากข้อ 1) ถึง 3) ในทางทฤษฎี

2.7 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการหาค่าประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าให้เป็นไปตามมาตรฐานสากลโดยใช้เวลาที่สั้นและขั้นตอนที่น้อย จำเป็นต้องทราบรายละเอียดและค่าขององค์ประกอบวงจรไฟฟ้าอย่างแม่นยำและถูกต้อง นอกจากนี้ในทางปฏิบัติยังมีองค์ประกอบวงจรบางส่วนที่ไม่สามารถวัดค่าได้ ความเหนี่ยวนำแฝง ความจุไฟฟ้าไหลด และความต้านทานไหลด ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ส่งผลต่อการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ [9-16] ดังนั้นจำเป็นต้องมีการหาค่าประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยทฤษฎีต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ร่วมกัน เพื่อให้องค์ประกอบวงจรไฟฟ้าที่ได้ออกมามีประสิทธิภาพและผิดพลาดน้อยที่สุด ทฤษฎีหลักที่จำเป็นได้แก่ ทฤษฎีการหาส่วนโค้งที่เหมาะสม ทฤษฎีการแปลงฟูรีเยร์ และทฤษฎีวิเคราะห์การถดถอย เป็นต้น

2.7.1 ทฤษฎีการหาส่วนโค้งที่เหมาะสม

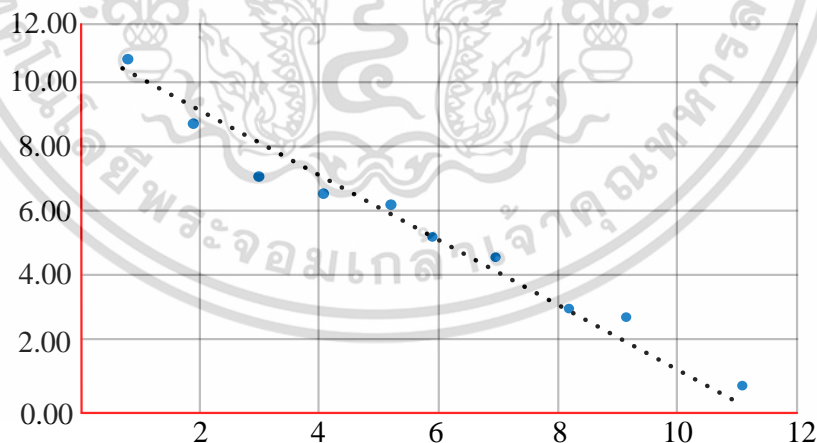
การหาส่วนโค้งที่เหมาะสมจะมีการนำเอา หลักการลาเวนเบิร์กมาควอดท์ (Levenberg-Marquardt algorithm) มาใช้ในการคำนวณ

หลักการลาเวนเบิร์กมาควอดท์ (Levenberg–Marquardt) ได้รับการพัฒนาในช่วงต้นทศวรรษ 1960 เพื่อแก้ปัญหา กำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง ปัญหา กำลังสองน้อยที่สุดจะเกิดขึ้นจากการหาส่วนโค้งที่เหมาะสม แบบจำลองกับชุดข้อมูลเพื่อหาค่าประกอบทางคณิตศาสตร์ โดยแสดงเป็นผลรวมของกำลังสองของผลต่างระหว่างแบบจำลองและชุดข้อมูล หลักการลาเวนเบิร์กมาควอดท์เป็นการผสมผสานกันระหว่างสองวิธีขั้นตอน ได้แก่วิธีการ Gradient descent และวิธีการ Gauss-Newton ในวิธีการ Gradient descent ผลรวมของข้อผิดพลาดกำลังสองจะมีค่าลดลง เมื่อองค์ประกอบเปลี่ยนไปในทิศทางที่ถูกต้อง และในวิธีการ Gauss-Newton ผลรวมของข้อผิดพลาดกำลังสองจะลดลง เมื่อให้ฟังก์ชันกำลังสองน้อยที่สุดเป็นจุดสูงสุดต่ำสุดสัมพัทธ์ และหาค่าต่ำสุดของกำลังสองนี้ วิธี Levenberg Marquardt ทำหน้าที่เหมือนวิธี Gradient-descent เมื่อองค์ประกอบอยู่ไกลจากค่าที่เหมาะสมที่สุด และทำหน้าที่เหมือนวิธี Gauss-Newton เมื่อองค์ประกอบใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่สุด

การหาส่วนโค้งที่เหมาะสมมีมากมายหลายประเภท [17] ซึ่งประเภทหลักที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ ส่วนโค้งที่เหมาะสมเชิงเส้น ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบลอการิทึม ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบโพลีโนเมียล ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบยกกำลัง ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบเอกซ์โพเนนเชียล และส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

- ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบเชิงเส้น

คือเส้นตรงที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้กับชุดข้อมูลเชิงเส้นอย่างง่าย ส่วนโค้งที่เหมาะสมเชิงเส้นมักจะแสดงให้เห็นว่าชุดข้อมูลกำลังเพิ่มขึ้นหรือลดลงในอัตราที่คงที่ ดังรูปที่ 2.8

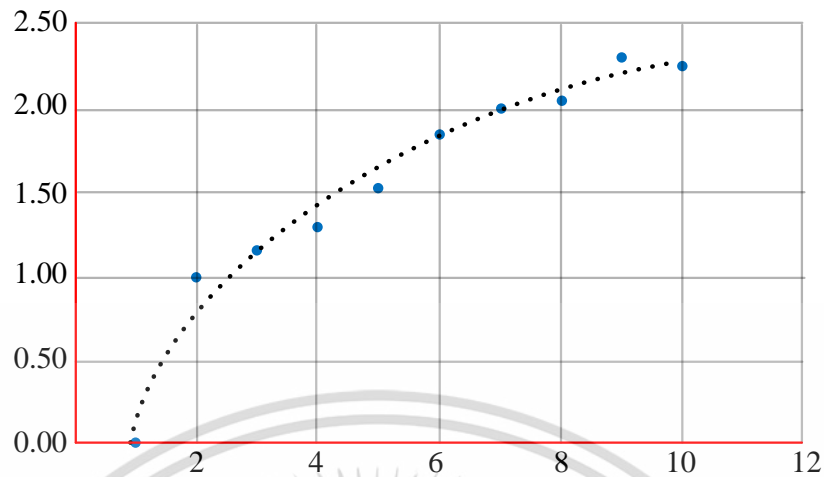


รูปที่ 2.8 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบเชิงเส้น

- ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบลอการิทึม

คือส่วนโค้งที่เหมาะสมที่สุดเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็ว สามารถใช้ได้ทั้งค่าที่เป็นบวกและเป็นลบ ดังรูปที่ 2.9

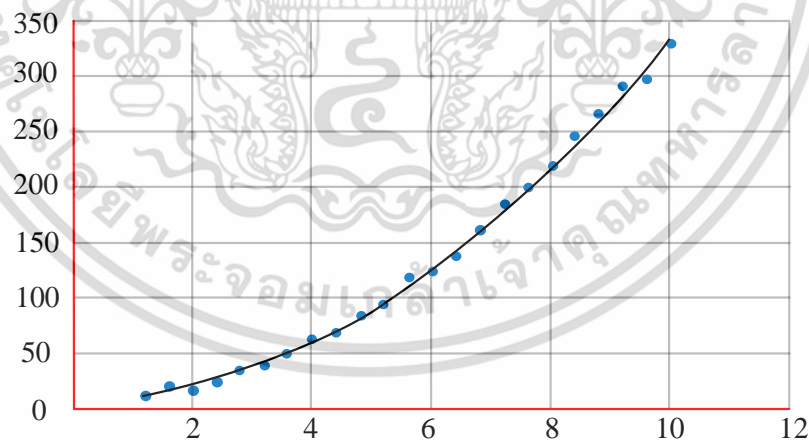
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบลอการิทึม

- ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบโพลีโนเมียล

คือส่วนโค้งที่ใช้เมื่อข้อมูลมีความผันผวน ลำดับของโพลีโนเมียลกำหนดได้จากจำนวนความผันผวนของข้อมูล หรือจากจำนวนโค้งที่ปรากฏในส่วนโค้ง โดยปกติถ้ามีการโค้งเพียงแค่ 1 ครั้ง มักจะเป็นส่วนโค้งโพลีโนเมียลลำดับ 2 ถ้ามีการโค้งเพิ่มเป็น 2 ครั้งในส่วนโค้ง มักจะเป็นส่วนโค้งโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 ดังรูปที่ 2.10

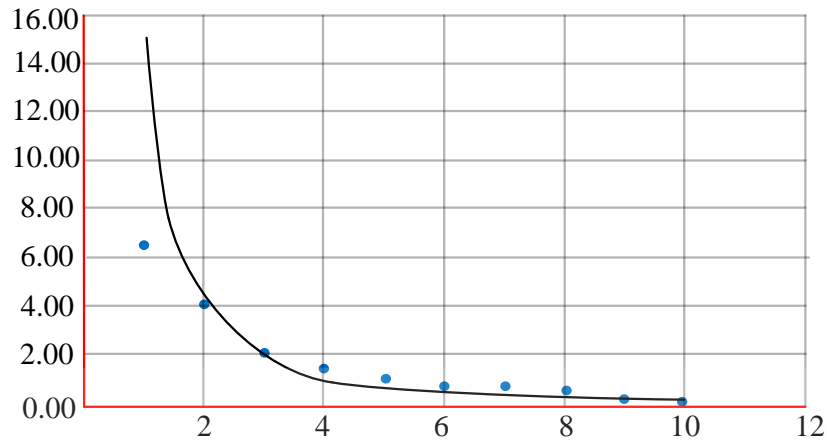


รูปที่ 2.10 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบโพลีโนเมียล

- ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบยกกำลัง

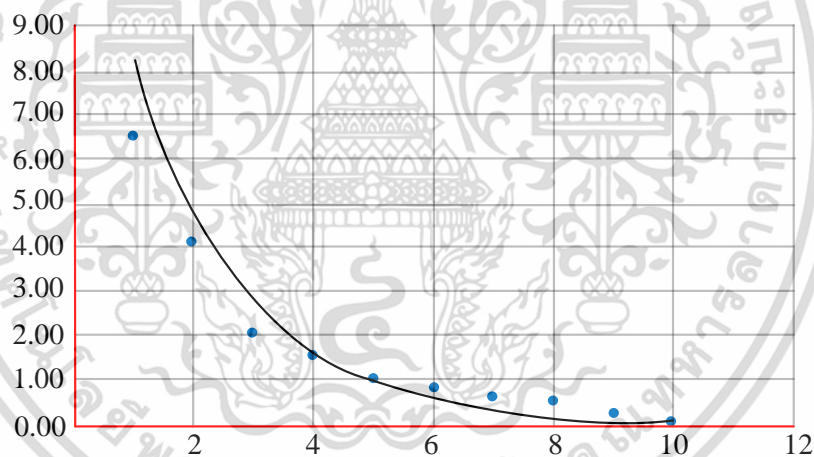
คือส่วนโค้งที่ใช้กับชุดข้อมูลที่มีอัตราการเพิ่มที่คงที่ มีข้อจำกัดคือใช้กับข้อมูลที่มีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นลบได้ ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบยกกำลัง

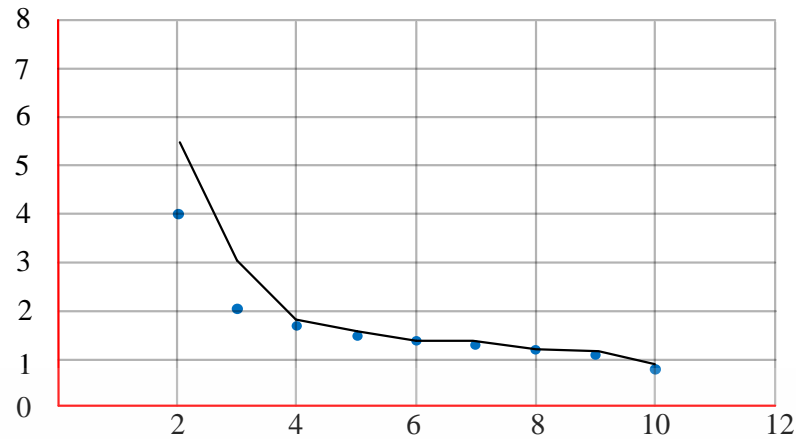
- ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบเอกซ์โพเนนเชียล
คือส่วนโค้งที่ใช้เมื่อค่าข้อมูลเพิ่มขึ้นหรือลดลงในอัตราที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ไม่สามารถสร้างเส้นแนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียลได้หากข้อมูลมีค่าเป็นศูนย์หรือค่าลบ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบเอกซ์โพเนนเชียล

- ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่
คือส่วนโค้งที่ทำให้ความผันผวนของข้อมูลราบขึ้นทำให้เห็นแนวโน้มชัดเจนขึ้น การเฉลี่ยคือเลือกตัวเลขที่จะให้นำจำนวนข้อมูลมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย แล้วใช้ค่าเฉลี่ยนั้นเป็นจุดใหม่ของส่วนโค้ง ดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

2.7.2 ทฤษฎีการแปลงฟูรีเยร์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การแปลงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าจำเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ข้อมูลและรายละเอียดต่าง ๆ ในวัฏจักรความถี่ โดยจะเริ่มจากรายละเอียดการแปลงฟูรีเยร์พื้นฐานก่อน [18,19] แล้วจึงอธิบายรายละเอียดการแปลงฟูรีเยร์ไม่ต่อเนื่องที่ใช้งานในงานวิจัยดังต่อไปนี้

- การแปลงฟูรีเยร์พื้นฐาน

การแปลงฟูรีเยร์ใช้ในการแปลงสัญญาณในวัฏจักรเวลาหรือสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของเวลาให้อยู่ในรูปสัญญาณในวัฏจักรความถี่หรือสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ ซึ่งจะเรียกว่า “สเปกตรัม (Spectrum)” ซึ่งการวิเคราะห์สัญญาณด้วยสเปกตรัมนี้มีประโยชน์ในการออกแบบอุปกรณ์สื่อสารต่าง ๆ เช่น วงจรกรอง (Filter) และอีควอไลเซอร์ (Equalizer) อีกทั้งส่วนสำคัญของการวิเคราะห์สัญญาณในวัฏจักรความถี่ก็คือมีความง่ายกว่าในวัฏจักรเวลา นอกจากนี้ยังมีข้อมูลส่วนอื่นที่ละเอียดกว่าในการแจกแจงคุณสมบัติของสัญญาณ โดยสมการที่ใช้ในการแปลงฟูรีเยร์แสดงดังสมการที่ 2.19

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.19)$$

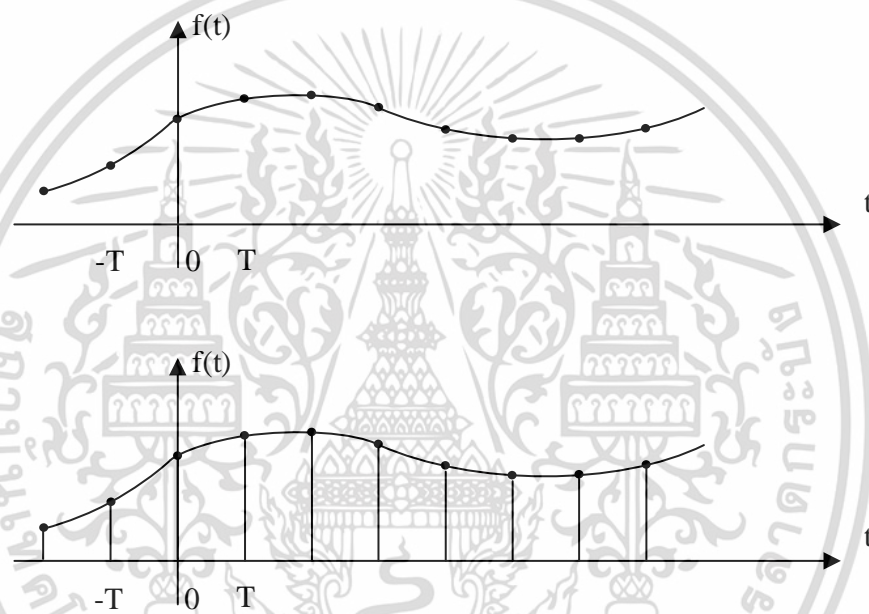
การแปลงฟูรีเยร์เป็นการแปลงจากฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กัตัวแปร t ซึ่งจะอินทิเกรตเทียบฟังก์ชัน t จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับตัวแปร $j\omega$ จึงเขียนใหม่เป็น $F(j\omega)$

อย่างไรก็ตามการแปลงข้อมูลกลับจากฟังก์ชัน $F(j\omega)$ กลับมาเป็น $F(t)$ จะใช้การแปลงฟูรีเยร์แบบผกผัน ดังสมการที่ 2.20

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.20)$$

- การแปลงฟูรีเยร์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform)

จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 เป็นสมการการแปลงฟูรีเยร์แบบต่อเนื่อง ในหัวข้อต่อไปนี้จะพูดถึงสมการการแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเกิดจากการสุ่มตัวอย่างของชุดข้อมูลออกมาเป็นอิมพัลส์ขนาดต่าง ๆ โดยระยะห่างระหว่างอิมพัลส์จะเท่า ๆ กัน เมื่อผ่านการแปลงสัญญาณผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจะอยู่ในรายคาบซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอิมพัลส์



รูปที่ 2.14 การสุ่มสัญญาณ $f(t)$ ด้วยคาบ T

จากรูปที่ 2.14 ระยะห่างระหว่างอิมพัลส์หรือคาบมีค่าเท่ากับ T ซึ่งสัญญาณ $f(n)$ เกิดจากนำชุดข้อมูล $f(t)$ มาสุ่มด้วยคาบ T จากนั้นลากเส้นจากยอดอิมพัลส์เชื่อมต่อกัน จะได้เส้นที่มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณ $f(t)$ แต่คล้ายกันน้อยเพียงใด ขึ้นกับระยะห่างในการสุ่ม ดังนั้นถ้าเกิดระยะห่างการสุ่มแคบมากจนถึงขีดจำกัดหนึ่ง $f(n)$ สามารถมองเป็น $f(t)$ ได้

จาก $f(n)$ ไม่สามารถใช้อินทิเกรตดังสมการที่ 2.19 ได้เหมือนเดิม จึงต้องมีการคิดค้นวิธีใหม่ในการแปลงสัญญาณ ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงตัวเลขมากกว่าการอินทิเกรต ดังสมการที่ 2.21 เรียกว่าการแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform) แต่เนื่องจากการคำนวณที่ใช้เวลานานจึงได้พัฒนาต่อเพื่อให้เร็วขึ้นเรียกว่า การแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier transform)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{2\pi}{N}kn} \quad (2.21)$$

ซึ่งกำหนดไว้ว่าข้อมูลที่นำมาสุ่มตัวอย่างจะต้องเป็นข้อมูลที่จำกัดและถ้าเป็นกรณีรายคาบจะนำมาพิจารณาเพียงแค่ว่าคาบเดียว และผลลัพธ์จะได้เป็นชุดข้อมูลจำนวนจำกัดเช่นกัน

การแปลงจากฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กัตัวแปร t ซึ่งจะมีอินทิเกรตเทียบฟังก์ชัน t จะได้ผลลัพธ์ออกมาดังสมการที่ 2.22

$$X(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(j\omega) e^{jn\omega} d\omega \quad (2.22)$$

- การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier transform)

เนื่องจากการแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่องมีประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน จึงได้มีการพัฒนาวิธีที่ทำให้การคำนวณการแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่องเร็วขึ้น และมีประสิทธิภาพกว่าเดิมซึ่งคือ การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว

จากสมการที่ 2.23 ถ้า N เป็นเลขคู่ สามารถกระจาย $X(k)$ ให้อยู่ในรูปผลบวกของเทอมที่ k เป็นคู่และเทอมที่ k เป็นคี่ได้ ดังนี้

$$X(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}} x(2n) e^{-j4\pi nk/N} + \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}} x(2n+1) e^{-j2\pi(2n+1)k/N} \quad (2.23)$$

สามารถพิจารณาได้เป็น

$$X(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}} x(2n) e^{-\frac{j2\pi nk}{N/2}} + \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}} x(2n+1) e^{-\frac{j2\pi nk}{N/2}} e^{-\frac{j2\pi k}{N}} \quad (2.24)$$

ซึ่ง $X(k)$ กลายเป็นผลบวกของสองเทอม มีการนำไปใช้คำนวณ DFT $N/2$ จุด ซึ่งเทอมแรก จะคำนวณกับสัญญาณ $x(0), x(2), \dots, x(N-2)$ และเทอมหลังจะคำนวณกับสัญญาณ $x(1), x(3), \dots, x(N-1)$ ดังนั้นในการคำนวณ DFT $N/2$ จุด ทั้งหมด 2 ชุด โดยแต่ละชุดจะใช้ CMAC $(N/2)^2$ เมื่อมี 2 ชุด แปลว่าต้องใช้ CMAC ทั้งหมด $N^2/2$

สรุปคือการคำนวณหา $W(k)$ สามารถลดจำนวน CMAC ได้ครึ่งหนึ่ง เมื่อ DFT N จุด กระจายให้กลายเป็น $N/2$ จุด และถ้ากระจายเป็น $N/2$ จุด CMAC ก็ลดลงอีกครั้งหนึ่ง เรียกวิธีการนี้

ว่า การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว จำนวน CMAC ที่ต้องการใช้ในการคำนวณ FFT N จุด = $N \log_2 N$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 ทฤษฎีวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอย [20,21] เป็นวิธีการด้านสถิติในการพิจารณาความสัมพันธ์ตัวแปรมากกว่า 2 ตัวแปรขึ้นไป ได้แก่ ตัวแปรต้นหรือตัวประมาณการ (Predictor, Independent variable, X) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทราบค่า และตัวแปรตามหรือตัวตอบสนอง (Response, Dependent variable, Y) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ต้องการจะหาค่า โดยความสัมพันธ์ที่ได้จากการใช้ Regression ในการวิเคราะห์จะแทนด้วยสมการในเชิงคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 2.25 และ 2.26

$$y = f(x) \quad (2.25)$$

หรือ

$$y = ax + b \quad (2.26)$$

โดย x คือข้อมูลขาเข้า (Input)

y คือผลลัพธ์ (Output)

a คือค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าจุดตัดแกน y (Intercept)

b คือสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวตอบสนอง x (Regression coefficient)

ประเภทของการถดถอยแบ่งออกเป็น 3 แบบ ประกอบด้วย การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) การวิเคราะห์การถดถอยพหุนาม (Polynomial regression) และการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกส์ (Logistic regression) ดังนี้

- การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

คือการศึกษาตัวแปรที่สัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง โดยถ้าศึกษาตัวแปรต้น (x) หนึ่งตัวกับตัวแปรตาม (y) หนึ่งตัว เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) นอกจากนี้ถ้าเป็นการศึกษาตัวแปรต้น (x) สองตัวขึ้นไป กับตัวแปรตาม (y) หนึ่งตัว เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression analysis)

1. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

เป็นวิธีการทางสถิติที่ช่วยให้ประเมินความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรเชิงปริมาณสองตัวอย่างแม่นยำขึ้น ความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงเส้นตรงในทางคณิตศาสตร์เป็นดังสมการที่ 2.27

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (2.27)$$

โดย y คือผลลัพธ์ (Output)

β_0 คือค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าจุดตัดแกน y (Intercept)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\beta_1 x$ คือสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวตอบสนอง x (Regression coefficient)

2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

เป็นการสรุปทั่วไปของการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ในแง่ที่ว่าวิธีการนี้ทำให้สามารถประเมินความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรตอบสนอง (เชิงปริมาณ) และตัวแปรอธิบายหลายตัว (เชิงปริมาณหรือเชิงคุณภาพ)

อย่างไรก็ตามการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการทำนายผลลัพธ์ของตัวแปรตามค่าของตัวแปรตั้งแต่สองตัวขึ้นไป และเป็นส่วนเสริมของการถดถอยเชิงเส้น ตัวแปรที่เราต้องการทำนายเรียกว่าตัวแปรตาม ในขณะที่ตัวแปรที่เราใช้ในการทำนายค่าของตัวแปรตามนั้นเรียกว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรอธิบาย ซึ่งสูตรของการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณมีดังสมการที่ 2.28

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon \quad (2.28)$$

โดย y_i คือผลลัพธ์ (Output)

β_0 คือค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าจุดตัดแกน y (Intercept)

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ คือสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวตอบสนอง x_1, x_2, \dots, x_p (Regression coefficient)

ε คือค่าข้อผิดพลาดแบบสุ่มของแบบจำลอง

การนำมาใช้กับงานวิจัยฉบับนี้คือ จะสามารถหาค่าของกลุ่มองค์ประกอบที่อยู่หน้าตัวแปรอิสระจากนั้นใช้การแก้สมการเพื่อเปรียบเทียบหาค่าองค์ประกอบแยกทีละตัว

- การวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลีโนเมียล

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ไม่เป็นเส้นตรง (ความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง) ซึ่งจะมีความยากและซับซ้อนกว่าแบบเส้นตรง ดังสมการที่ 2.29

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \dots + \beta_p x^n \quad (2.29)$$

- การวิเคราะห์การถดถอยแบบโลจิสติกส์

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยที่ตัวแปรตาม (y) มีค่าได้สองสถานะ เช่น ใช่/ไม่ใช่ และตัวแปรต้น (x) มีค่าต่อเนื่องแบบปกติ โดยปกติมักนำมาใช้ในการทำนายโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ โดยตัวแปรต้นอาจมีได้มากกว่า 1 ตัว และเป็นได้ทั้งค่าที่ต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง เช่น การอนุมัติสินเชื่อ ภายใต้เงื่อนไข อายุ เงินเดือน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

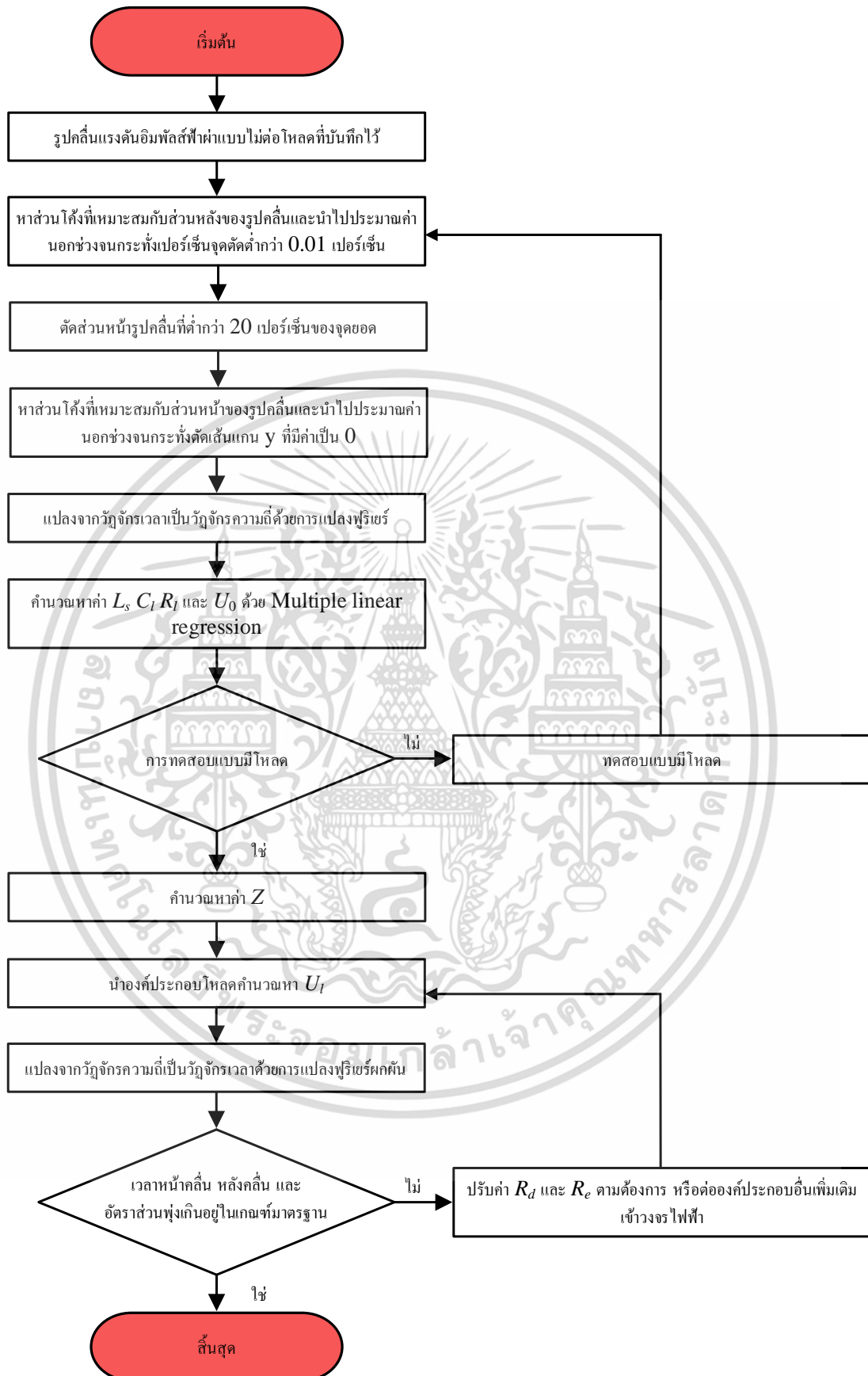
บทที่ 3

การหาค่าประกอบแฉงและโหลดของ วงจรสร้ารงแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

วิธีการหาค่าประกอบแฉงและโหลดของวงจรสร้ารงแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยใช้การคำนวณในวัฏจักรความถี่ เพื่อนำองค์ประกอบวงจรไปใช้ในการวิเคราะห์การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าให้มีองค์ประกอบรูปคลื่นได้แก่เวลาหน้าคลื่น เวลาหลังคลื่น และอัตราส่วนพุ่งเกินเป็นไปตามมาตรฐาน IEC60060-1 (2010) [1] ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยในบทที่ 3 จะกล่าวถึงวิธีการเพื่อให้ได้มาซึ่งความเหนี่ยวนำแฉง L_s ความจุไฟฟ้าโหลด C_l ความต้านทานโหลด R_l และแรงดันอัดประจุ U_0 ที่ได้มาจากการทดสอบแบบไม่มีอุปกรณ์ทดสอบก่อน ลำดับแรกหลังจากทดสอบและเก็บข้อมูล รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้มาในวัฏจักรเวลาในทางคณิตศาสตร์เป็นผลต่างของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลสองเทอมที่มีเวลาคงตัวต่างกัน จากนั้นวิเคราะห์ในวัฏจักรความถี่โดยใช้การแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) ซึ่งจะได้การตอบสนองในเชิงความถี่และหาค่าองค์ประกอบวงจรที่ต้องการ จากนั้นเมื่อใส่โหลดแล้วจะนำค่าองค์ประกอบแฉงมาคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่งโหลดอิมพีแดนซ์ Z ซึ่งเป็นการรวมกันของอิมพีแดนซ์แฉง เครื่องมือวัด ชดวัด และอุปกรณ์ทดสอบ นำโหลดอิมพีแดนซ์ Z ไปแทนในสมการและลองปรับความต้านทานหน้าคลื่น R_f และความต้านทานหลังคลื่น R_e เพื่อให้ได้องค์ประกอบรูปคลื่นเป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่คิดขึ้นมานี้จะกล่าวถึงในบทที่ 4 ในลำดับถัดไป นอกจากนี้หลักการที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะกล่าวไว้ในภาคผนวก ข

3.1 โปรแกรมสำหรับหาค่าประกอบแฉงและโหลด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 2021a ซึ่งเขียนบนภาษา C, C++, Java เนื่องจากโปรแกรมนี้อาศัยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ให้เลือกใช้เป็นจำนวนมาก และข้อมูลถูกจัดเก็บในลักษณะแถวลำดับทำให้ไม่ต้องจองมิติเหมือนโปรแกรมขั้นต่ำทั่วไป ซึ่งจะแก้ปัญหาในเชิงเมตริกซ์และเวกเตอร์ได้ง่าย ในส่วนของหลักการที่ใช้หาค่าประกอบแฉงและโหลดแสดงดังรูปที่ 3.1

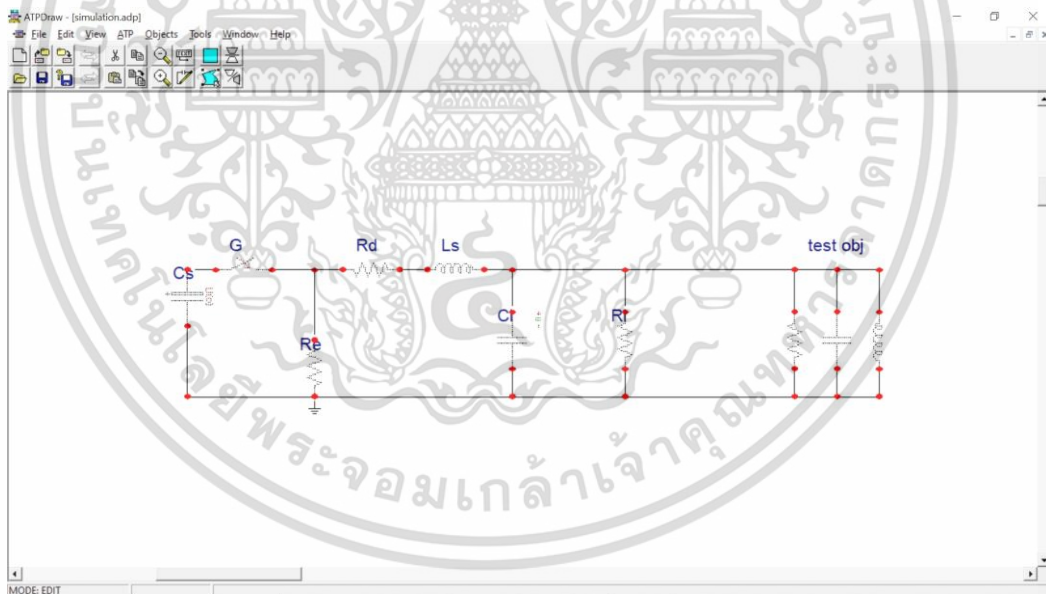


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนของโปรแกรมหาค่าประกอบวงจรแผงและโหลดในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การจำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้น สามารถจำลองโดยใช้โปรแกรม ATPDraw ดังรูปที่ 3.2 โดยที่การจำลองนั้นทำขึ้นเพื่อศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้อย่างละเอียด คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เนื่องจากสามารถปรับส่วนประกอบต่าง ๆ ในวงจรและเปรียบเทียบผลลัพธ์ได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งยังปลอดภัยเมื่อเกิดข้อผิดพลาดขึ้น โดยมีหลักการคือป้อนแรงดันต่ำกระแสสลับให้เป็นแรงดันสูง กระแสสลับโดยใช้หม้อแปลง ใช้วงจรเรียงกระแส (Rectifier) และกรองกระแส (Filter) เพื่อให้ได้แรงดันสูงกระแสตรง จากนั้นป้อนแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงให้กับชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวต้านทานเพื่อสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติอาจมีปัจจัยอื่นที่ทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่านั้นไม่เหมือนกับที่จำลองได้ด้วยโปรแกรม [16] ซึ่งต้องมีการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำที่เป็นผลรวมของความเหนี่ยวนำแฝงทั้งวงจรหรือการต่อองค์ประกอบเพิ่มเติมอื่น ๆ เข้าไปในวงจร องค์ประกอบเหล่านี้มีผลทำให้รูปคลื่นเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงต้องมีการจำลองและศึกษาพฤติกรรมในหลาย ๆ กรณีเพื่อให้ครอบคลุมปัญหาที่อาจเกิดขึ้นดังหัวข้อต่อไปนี้

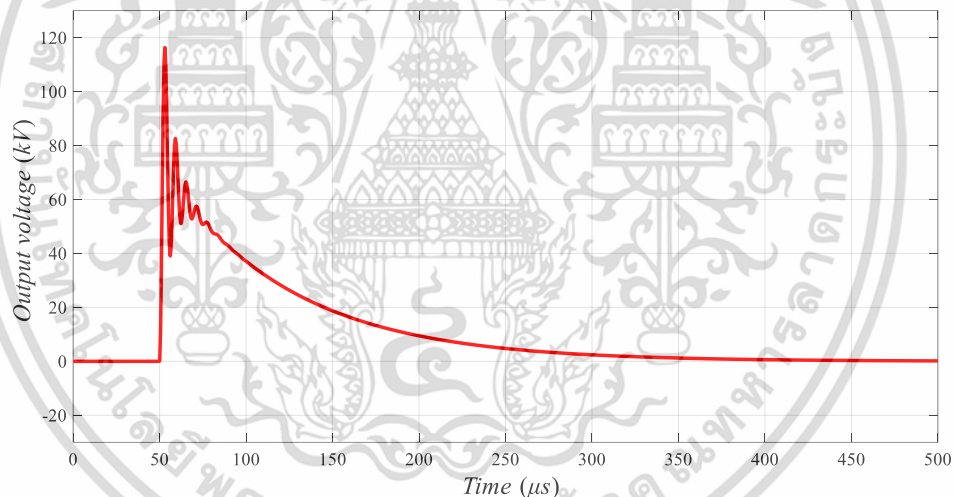


รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลในการจำลองแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.2.1 การจำลองปรับค่าองค์ประกอบแฝงในวงจรแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่ใช้การจำลองเพื่อศึกษารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเฉพาะส่วนเท่านั้น ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมกรณีของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในกรณีที่มีปัจจัยภายนอกต่าง ๆ ดังนั้นการจำลองสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการทำงานของส่วนต่าง ๆ ในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งในทางปฏิบัติอาจมีปัจจัยภายนอกที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่เหมือนที่คำนวณไว้จากการจำลอง นอกจากนี้การใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เป็นเวลานานก็ส่งผลให้ต่อค่าความเหนี่ยวนำในวงจรเช่นเดียวกับการเลือกขนาดหรือประเภทสายไฟในวงจรที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและรูปคลื่นต่าง ๆ ภายใต้สภาวะที่มีการรบกวนจากปัจจัยภายนอกซึ่งส่งผลให้การทดสอบมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ปัจจัยแรกที่ลองปรับคือการปรับค่าองค์ประกอบแผงในวงจร องค์ประกอบแผงในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในที่เกิดจากส่วนประกอบต่าง ๆ ในวงจรรวมกันในรูปขององค์ประกอบเพื่อให้เหมือนในทางปฏิบัติที่สุด ได้แก่ ความเหนี่ยวนำแผงที่มาจากความเหนี่ยวนำในวงจรและสายตัวนำ ซึ่งการจำลองจะปรับความเหนี่ยวนำแผงตั้งแต่ 15 μH ไปจนถึง 960 μH ส่งผลให้รูปคลื่นเกิดอัตราส่วนพุ่งเกินที่บริเวณยอดคลื่นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ไปจนถึงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ที่ความเหนี่ยวนำแผงเป็น 960 μH ดังรูปที่ 3.3 ในการกำหนดของมาตรฐาน IEC60060-1 กำหนดว่าอัตราส่วนพุ่งเกินของแรงดันอิมพัลส์ไม่เกินที่ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ทดสอบมีโอกาสเกิดอัตราส่วนพุ่งเกินได้มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงได้จำลองเพื่อให้ครอบคลุมสถานการณ์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้



รูปที่ 3.3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีอัตราส่วนพุ่งเกินมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์

3.2.2 การจำลองปรับค่าองค์ประกอบโพลต์ในวงจรแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

นอกจากการที่มีปัจจัยภายนอกไม่ว่าจะเป็นการทดสอบที่นานเกินหรือการเลือกใช้สายไฟในวงจรผิดประเภทยังมีปัจจัยที่สองอีกที่ส่งผลทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเปลี่ยนไปจากอุดมคติ เช่น ชุดวัด อุปกรณ์วัด หรือการต่ออุปกรณ์เพิ่มเข้ากับวงจร ส่งผลให้องค์ประกอบในวงจรเปลี่ยนไปเช่นกันไม่ว่าจะเป็นความจุไฟฟ้าโพลต์หรือความต้านทานโพลต์ ยิ่งไปกว่านี้การใช้เกลนิงเกอร์ก็ส่งผลให้องค์ประกอบโพลต์มีค่าที่เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและรูปคลื่นต่าง ๆ ภายใต้สภาวะที่มีการรบกวนจากปัจจัยภายนอกซึ่งส่งผลให้การทดสอบมีความผิดพลาดเกิดขึ้น องค์ประกอบโพลต์ในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เกิดจากส่วนประกอบต่าง ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

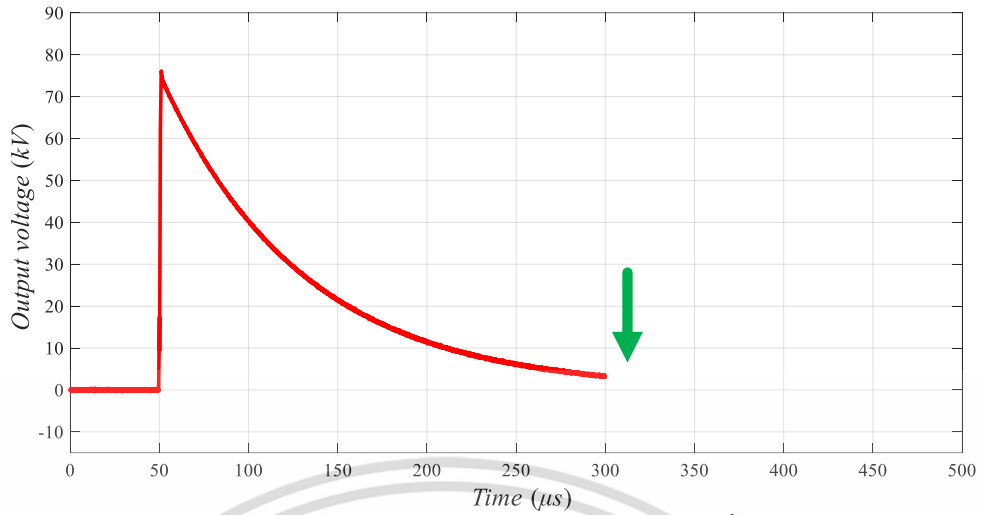
ในวงจรรวมกันในรูปแบบขององค์ประกอบเพื่อให้เหมือนในทางปฏิบัติที่สุด ได้แก่ ความจุไฟฟ้าไหลดที่มาจากไหลด ชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์และชุดเครื่องมือวัด ตัวต้านทานไหลดที่เกิดจากความสูญเสียจากการสร้างแรงดันอิมพัลส์และชุดเครื่องมือ ซึ่งการลองปรับค่าองค์ประกอบไหลดคือการต่อขนานหรืออนุกรมองค์ประกอบเพิ่มเติมเข้าไปกับส่วนไหลด ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นค่าใหม่

3.3 การปรับคุณภาพข้อมูลดิบหลังจากการทดลอง

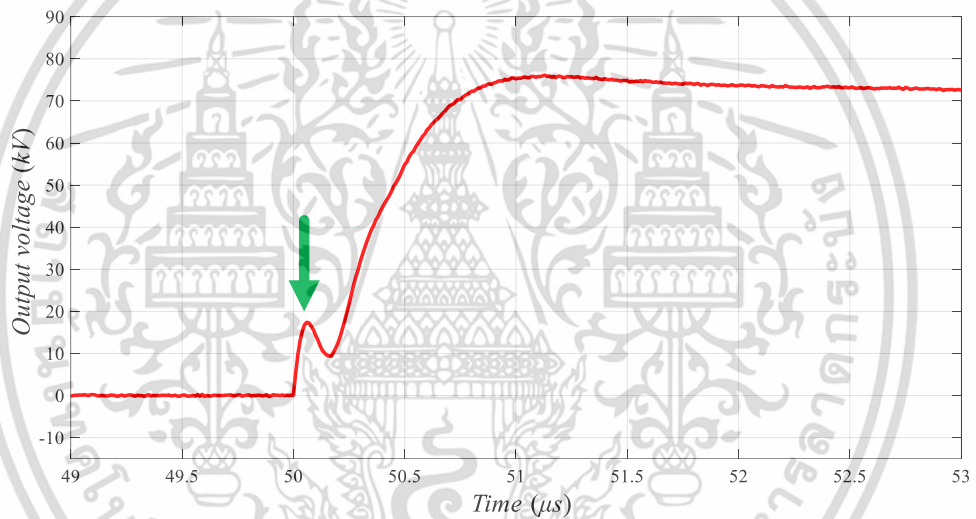
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการทดลองเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีโดยใช้ข้อมูล 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นทางทฤษฎี โดยการจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยการด้วยสร้างวงจรแรงดันอิมพัลส์ในโปรแกรม ATPDraw และส่วนที่สองในทางปฏิบัติโดยข้อมูลได้จากการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ ทำการวัดและเก็บข้อมูลรูปคลื่น ซึ่งการจำลองสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะจำลองด้วยโปรแกรม ATPDraw ได้ทำตามกระบวนการที่กล่าวไปในหัวข้อ 3.2 ในส่วนของข้อมูลจากการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการนั้น ได้ทำการทดลองทั้งกรณีไม่มีไหลดรวมถึงมีไหลดชนิดต่าง ๆ แล้วเก็บเป็นไฟล์ข้อมูลโดยตั้งค่าดังต่อไปนี้

- จำนวนบิต (Vertical resolution, bit) : จำนวนบิตออสซิลโลสโคปคือ 12 บิต
- จำนวนจุดข้อมูล (Record length) : 50,000 จุด
- จำนวนพรีทริก (Pretrigger) : 10 เพอร์เซ็นต์ ของจำนวนจุดข้อมูล
- ระดับสัญญาณรบกวนภายใน (Background noise) : สูงสุด 1 เพอร์เซ็นต์
- อัตราการสุ่ม (Sampling rate) : 100 MS/s

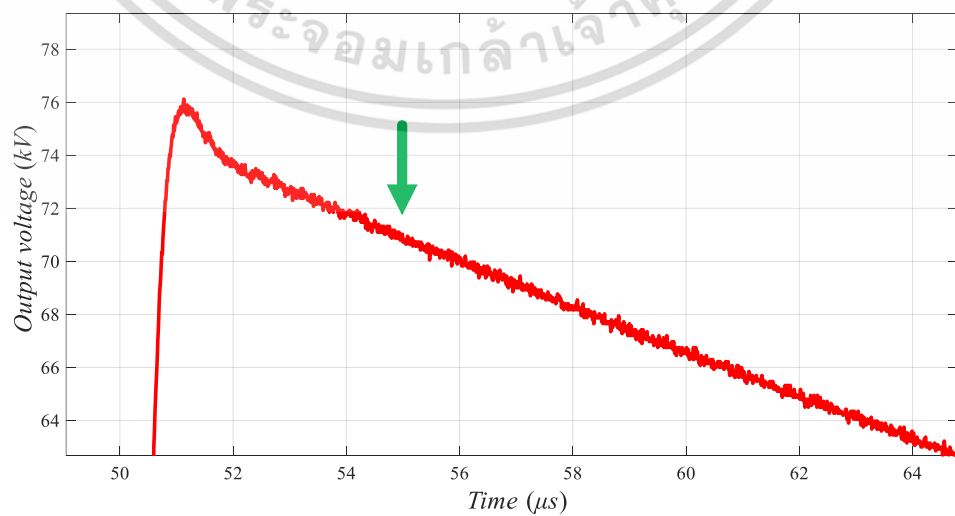
เมื่อเก็บข้อมูลดิบได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการและมีข้อมูลดิบจากการจำลองด้วยโปรแกรม ATPDraw อย่างไรก็ตามข้อมูลดิบที่มีอยู่นั้นยังไม่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้ทันที เนื่องจากการทดสอบและการเก็บข้อมูลต้องใช้ประสบการณ์และความเชี่ยวชาญซึ่งอาจมีปัจจัยภายนอกรบกวนอีก ดังนั้นจึงมีวิธีแก้ปัญหานี้โดยอิงจากการทดลองในปฏิบัติการที่มีปัจจัยภายนอกรบกวนเป็นหลัก ปัญหาที่พบได้จากหลายกรณี เช่น การเก็บข้อมูลที่ได้มานั้นมีช่วงเวลาไม่มากพอ หรือมีการเกิดแรงดันพุ่งเกินที่ส่วนหน้าคลื่นขนาดเล็ก หรือมีสัญญาณรบกวนมากเกินไปอันเนื่องมาจากสถานะแวดล้อมรอบ ๆ สถานที่ใช้ทดสอบ ดังรูปที่ 3.4 ถึง 3.6 ตามลำดับ จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องที่จะต้องมีการปรับคุณภาพของข้อมูลดิบที่ได้มาดังหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ให้อยู่ในสถานะพร้อมนำไปคำนวณต่อในลำดับถัดไป



รูปที่ 3.4 การเก็บข้อมูลจากการทดสอบที่มีช่วงเวลาด้านเกินไป



รูปที่ 3.5 การเกิดส่วนพุ่งเกินขนาดเล็กส่วนหน้าของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า



รูปที่ 3.6 การเกิดสัญญาณรบกวนมากเกินไปจากสภาพแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

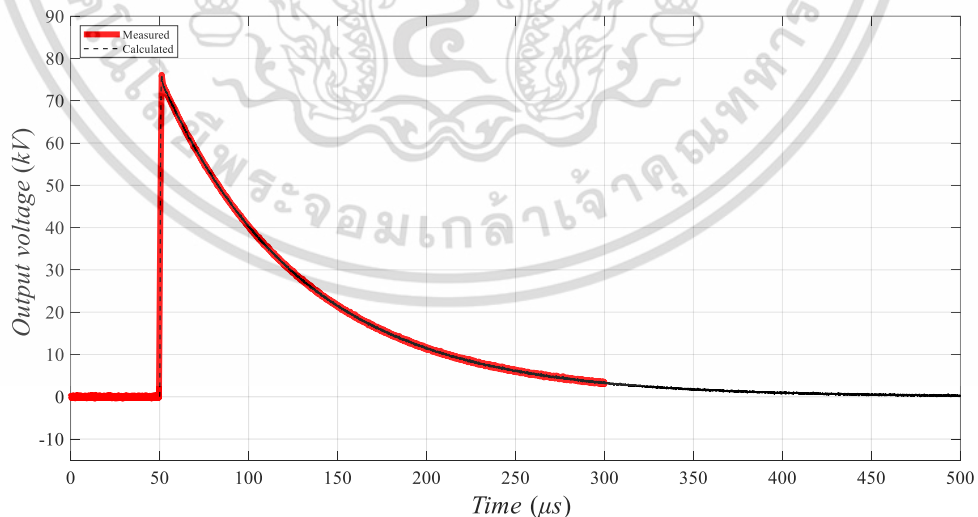
3.3.1 การแก้ปัญหาเรื่องจำนวนข้อมูลไม่เพียงพอ

การที่จำนวนข้อมูลไม่เพียงพออาจเกิดจากการตั้งค่าของผู้ทดสอบหรือขีดจำกัดของเครื่องมือวัดหรือออสซิลโลสโคป อย่างไรก็ตามการที่รูปคลื่นอิมพัลส์มีช่วงเวลาที่ยาวเกินไปทำให้เมื่อวิเคราะห์ในวัฏจักรความถี่จึงเกิดความผิดพลาดขึ้น ส่งผลให้การหาค่าประกอบแอมพลิจูดและความถี่ความถี่น้อยลงและผิดพลาดได้ ซึ่งในการแก้ปัญหาจะใช้การหาส่วนโค้งที่เหมาะสมจากข้อมูลในช่วง 60 เปอร์เซ็นต์ ของค่ายอดไปจนถึงข้อมูลตัวสุดท้ายด้วยการใช้สมการจากผลตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤตดังสมการที่ 3.1

$$y = ae^{-bx} \cos(\omega x + p) \quad (3.1)$$

จากนั้นใช้การประมาณค่าในช่วงให้ข้อมูลที่มีความยาวมากขึ้นไปเรื่อย ๆ ซึ่งในการกำหนดว่าจำนวนข้อมูลควรมีการประมาณค่าในช่วงไปจนถึงเท่าใดนั้น จะใช้การกำหนดเปอร์เซ็นต์จุดตัดขึ้นมา โดยจากการที่ได้ทำการทดลองมาแล้วนั้น เปอร์เซ็นต์จุดตัดต่ำกว่า 0.01 เปอร์เซ็นต์ นั้นมีความแม่นยำมากพอที่จะทำให้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการหาค่าประกอบแอมพลิจูดและความถี่ต่ำกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเปอร์เซ็นต์จุดตัดคือการนำค่าของจุดสุดท้ายหารด้วยค่ายอดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยการคำนวณเปอร์เซ็นต์จุดตัดเป็นดังสมการที่ 3.2

$$\%Truncationpoint = \frac{y_{lastpoint}}{y_{peak}} \quad (3.2)$$

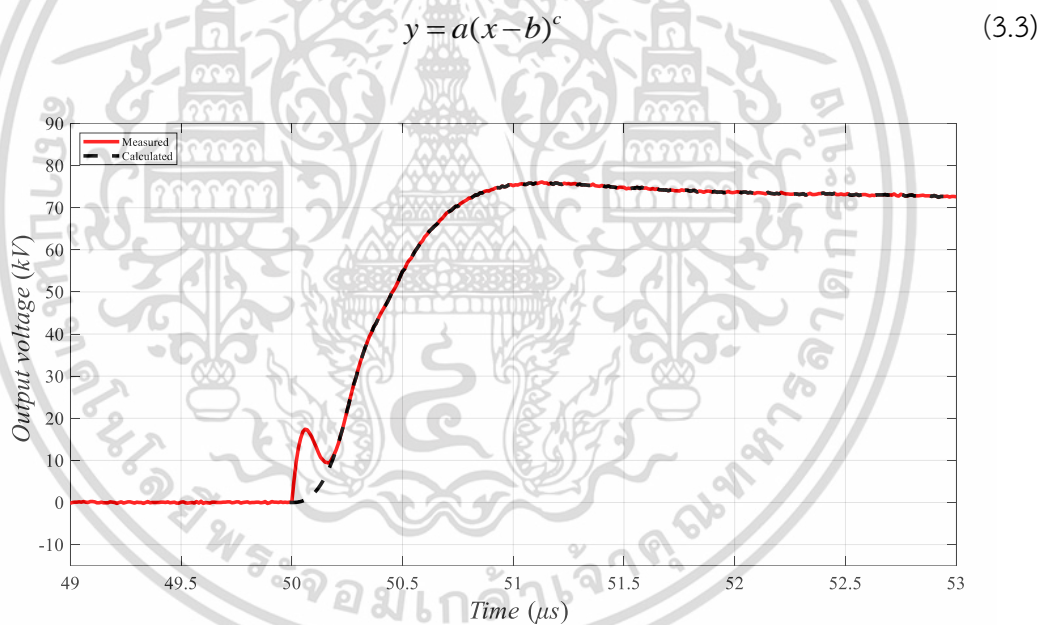


รูปที่ 3.7 การเพิ่มจำนวนข้อมูลจนกว่าเปอร์เซ็นต์จุดตัดต่ำกว่า 0.01 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การแก้ปัญหาเรื่องส่วนพุ่งเกินในช่วงเวลาเริ่มต้นแรงดันอิมพัลส์

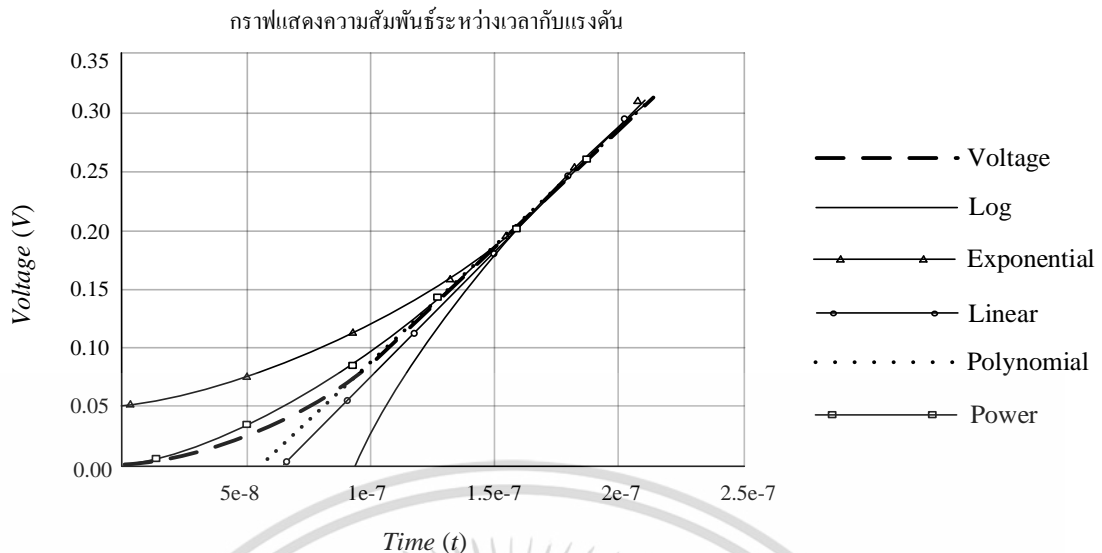
การที่เกิตรงส่วนพุ่งเกินในช่วงเวลาเริ่มต้นของรูปคลื่นอิมพัลส์เกิดจากการขั้นตอนการอัดประจุที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ซึ่งมีสปาร์กแก๊ปหลายชั้นและการที่สปาร์กทีละชั้นจนกว่าจะครบทุกชั้นทำให้เกิดรูปคลื่นขนาดเล็กขึ้นมา ส่งผลให้การวิเคราะห์ข้อมูลในวัฏจักรความถี่เกิดความผิดพลาด ส่งผลให้การคำนวณเพื่อให้ได้องค์ประกอบแฉงและโหนดในวงจรมีความแม่นยำน้อยลง โดยทั่วไปแล้วไฟกระชากมักเกิดที่บริเวณหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ดังนั้นการแก้ปัญหาแรงดันไฟกระชากจึงใช้การตัดข้อมูลดิบที่มีค่าต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ของค่ายอดในส่วนหน้าคลื่นที่ัง อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจะมีการต่อข้อมูลขึ้นมาแทนเพื่อให้เปรียบเสมือนว่ารูปคลื่นนั้นสมบูรณ์ ซึ่งการต่อความยาวส่วนหน้าของรูปคลื่นอิมพัลส์จะใช้การคำนวณส่วนโค้งที่เหมาะสมจากสมการที่ 3.3 กับข้อมูลในช่วง 20 เปอร์เซ็นต์ของค่ายอดไปจนถึง 30 เปอร์เซ็นต์ของค่ายอด ช่วงดังกล่าวนี้จะทำให้เส้นเสมือนมีความใกล้เคียงกับหน้าคลื่นมากที่สุด จากนั้นใช้การประมาณค่านอกช่วงให้ได้รูปคลื่นไปจนถึงเวลาที่มีค่าแอมพลิจูดเป็น 0 หรือเรียกว่าการตัดแกน y ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การแก้ปัญหาส่วนพุ่งเกินในส่วนหน้าคลื่นด้วยการหาส่วนโค้งที่เหมาะสม

การใช้ส่วนโค้งที่เหมาะสมเพื่อที่จะประมาณค่านอกช่วงนั้นมีสมการที่ใช้คำนวณได้หลากหลายวิธี ได้แก่ ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบเชิงเส้น ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบลอการิทึม ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบโพลีโนเมียล ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบยกกำลัง ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบเอกซ์โพเนนเชียล และส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ดังที่ได้กล่าวไปหัวข้อ 2.6 ดังนั้นต้องมีการทดสอบเพื่อให้สามารถเลือกใช้ประเภทส่วนโค้งได้อย่างเหมาะสมและให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องที่สุด โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ATPDraw ซึ่งทราบค่าองค์ประกอบทุกตัวในวงจร ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



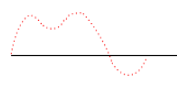
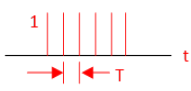
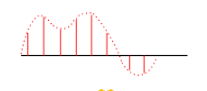
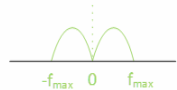
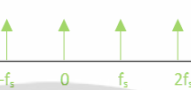
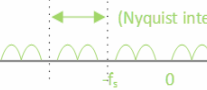
รูปที่ 3.9 กราฟเปรียบเทียบการหาส่วนโค้งที่เหมาะสมด้วยวิธีต่าง ๆ

จากรูปภาพจะเห็นได้ว่าส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบยกกำลังมีความใกล้เคียงกับรูปคลื่นจริงมากที่สุดจึงอนุมานได้ว่าให้ผลลัพธ์การหาค่าประกอบแฉงและโพลต์ได้อย่างแม่นยำที่สุด นอกจากนี้ยังมีการทดสอบใช้การหาส่วนโค้งประเภทอื่นเพื่อเป็นการยืนยันให้แน่ใจอีกรอบ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถยืนยันได้ว่าการใช้ส่วนโค้งที่เหมาะสมแบบยกกำลังมีความแม่นยำที่สุด จึงได้เลือกเพื่อนำมาใช้ในการหาส่วนโค้งที่เหมาะสมและประมาณค่านอกช่วง

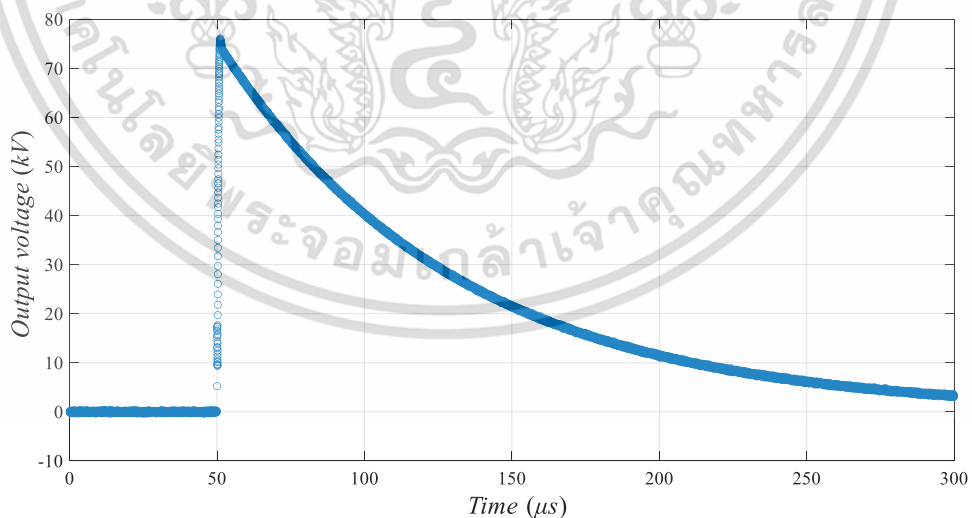
3.4 การแปลงข้อมูลจากวัฏจักรเวลาไปสู่วัฏจักรความถี่โดยใช้การแปลงฟูริเยร์

เมื่อปรับคุณภาพข้อมูลให้ดียิ่งขึ้นเพื่อกำจัดปัญหาที่มาจากขั้นตอนการเก็บข้อมูลดิบแล้ว จึงพร้อมใช้ในการคำนวณหาค่าประกอบแฉงและโพลต์สำหรับวงจรแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า การที่เลือกใช้วัฏจักรความถี่ในการวิเคราะห์เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อยกว่าและแจจงออกมาเป็นคุณสมบัติความถี่และยังรองรับสัญญาณรบกวนได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการคำนวณที่ง่ายกว่าในวัฏจักรเวลา โดยการแปลงจากวัฏจักรเวลาเป็นวัฏจักรความถี่นั้นใช้การแปลงฟูริเยร์เพื่อให้ได้มาซึ่งสัญญาณในวัฏจักรความถี่

ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของการวัดจักรเวลากับวัดจักรความถี่

<p>1. $X(t)$</p> 	<p>2. $s(t)$</p>  $s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$	<p>3. $\hat{X}(t)$ or $X(n)$</p>  $\hat{X}(t) = X(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$
<p>4. $X(f)$</p> 	<p>5. $S(f)$</p>  $S(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_s)$	<p>6. $\hat{X}(f)$</p>  $\hat{X}(f) = f_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_s)$

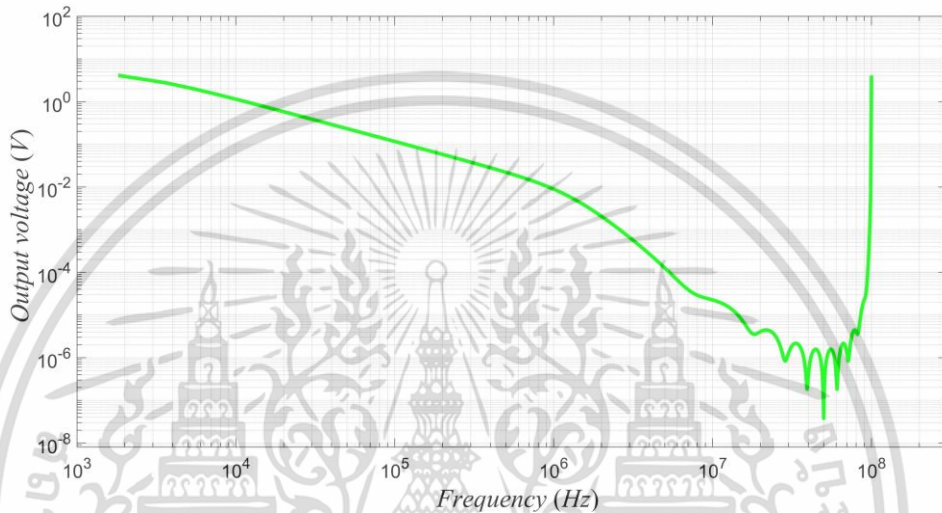
อย่างไรก็ตามข้อมูลที่มีอยู่ในวัดจักรเวลาได้มาจากออสซิลโลสโคปเป็นสัญญาณดิจิทัล ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งไม่ต่อเนื่องและไม่เป็นรายคาบดังช่องที่ 3 ตารางที่ 3.1 เมื่อต้องการแปลงให้อยู่ในวัดจักรความถี่เพื่อวิเคราะห์จึงต้องทำการแปลงฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform) ซึ่งตรงกับสัญญาณดิจิทัลที่มีอยู่ อีกทั้งการแปลงยังใช้สมการผลรวมที่มีขั้นตอนในการแปลงที่ง่ายกว่าการอินทิกรัลของแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) อย่างไรก็ตามสัญญาณที่อยู่ในวัดจักรความถี่แล้วต้องการด้วยพจน์ความถี่การสุ่มตัวอย่าง f_s เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เหมือนกับว่าแปลงฟูริเยร์มาดังช่องที่ 4 ตารางที่ 3.1



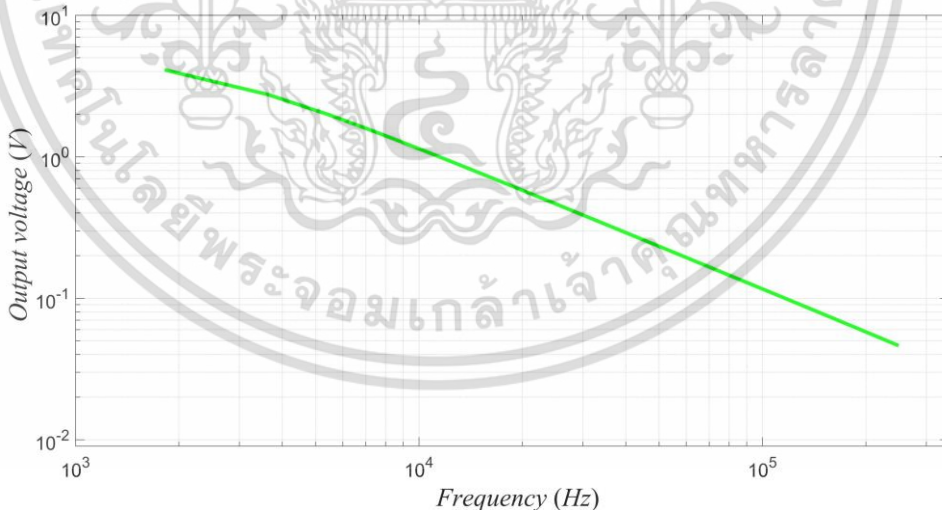
รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าแบบดิจิทัลที่ได้มาจากออสซิลโลสโคป

เนื่องจากการเกิดสัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อมหรือปัจจัยภายนอกในขั้นตอนการทดลองจะส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนแก้อมูลดิบ ทำให้รูปคลื่นดูไม่เรียบเนียนและโดนรบกวน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้เมื่อนำข้อมูลดิบไปวิเคราะห์ในวัฏจักรความถี่ การหาค่าองค์ประกอบแฉงและโหนดอาจเกิดความผิดพลาดได้และทำให้การปรับความต้านทานหน้าคลื่นหลังคลื่นไม่แม่นยำพอ ดังนั้นในขั้นตอนการวิเคราะห์ในวัฏจักรความถี่จึงได้มีการใช้การกรองความถี่ต่ำผ่าน เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากช่วงเวลาหน้าคลื่น รูปคลื่นอิมพัลส์จะมีความถี่ถึงประมาณ 250 kHz รูปคลื่นอิมพัลส์หลังจากกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วจะมีจำนวนข้อมูลน้อยลงดังรูปที่ 3.12 และถูกนำไปพิจารณาเพื่อใช้หาค่าองค์ประกอบแฉงและโหนดของวงจรในลำดับถัดไป



รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หลังแปลงฟูริเยร์



รูปที่ 3.12 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หลังแปลงฟูริเยร์และตัดความถี่มากกว่า 250 kHz

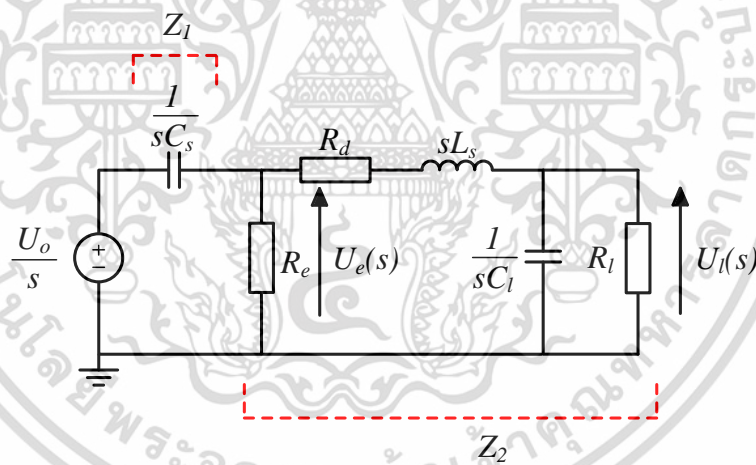
3.5 การหาค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้า

จากการทดสอบในกรณีที่ไม่ต่อโหนดเพื่อหาค่าองค์ประกอบแฉงและโหนดของวงจรแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า โดยเมื่อผ่านกระบวนการในหัวข้อ 3.3 และ 3.4 แล้ว ข้อมูลรูปคลื่นในวัฏจักรความถี่พร้อมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการตีความหมายเพื่อหาค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้า ซึ่งมีหลักการคือจะหาค่าองค์ประกอบแฉงก่อนด้วยการใช้การถดถอยเพื่อให้ได้มาซึ่ง ความเหนียวนำแฉง L_s ความจุไฟฟ้าไหลต C_l ความต้านทานไหลต R_l นอกจากนี้ยังรู้แรงดันที่ใช้อัดประจุด้วย U_0 หลังจากนั้นนำค่าองค์ประกอบแฉงที่ทำได้ไปใช้ในการคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ไหลต Z หลังจากที่ทราบค่าของอิมพีแดนซ์ไหลต Z ผู้ทดสอบจะทราบค่าวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสมบูรณ์ทุกองค์ประกอบ ซึ่งขั้นตอนของการหาค่าองค์ประกอบแฉงและไหลตอย่างละเอียดจะอธิบายในหัวข้อที่ 3.5.1 และ 3.5.2 ดังต่อไปนี้

3.5.1 หาค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฉง

การหาค่าองค์ประกอบแฉงได้แก่ ความเหนียวนำแฉง L_s ความจุไฟฟ้าไหลต C_l ความต้านทานไหลต R_l และแรงดันที่ใช้อัดประจุด้วย U_0 ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่วัดค่าได้ยากในทางปฏิบัติและอาจจะใช้เวลานาน โดยความเหนียวนำแฉง L_s เป็นผลรวมของสายตัวนำและส่วนต่าง ๆ ในวงจรที่มีค่าความเหนียวนำ C_l แทนผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าในส่วนไหลตได้แก่เครื่องมือวัด ตัวแบ่งแรงดัน R_l แทนผลรวมของความต้านทานที่มาต่อกับไหลตหรือเป็นการสูญเสียจากในวงจรสร้างอิมพัลส์และความสูญเสียในวงจรวัด การรวมปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในรูปองค์ประกอบในวงจรเป็นตัวแทนเลยทำได้โดยอนุกรม L_s กับตัวต้านทานหน้าคลื่น และขนาน R_l และ C_l กับส่วนไหลต ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในวัฏจักร S

จากรูปที่ 3.13 วงจรสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาสมการแรงดันขาออกในวัฏจักรความถี่ดังต่อไปนี้

$$Z_1 = \frac{1}{sC_s} \quad (3.4)$$

$$Z_2 = \frac{R_e R_l + R_e R_d R_l s C_l + R_d R_e + R_e R_l s^2 C_l L_s + R_e s L_s}{R_e R_l s C_l + R_e + R_l + R_d R_l s C_l + R_d + R_l s^2 C_l L_s + s L_s} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_e = \frac{U_0}{s} \left(\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) \quad (3.6)$$

$$U_e = \frac{U_0}{s} \left(\frac{\frac{R_e R_l + R_d R_e R_l s C_l + R_d R_e + R_e R_l s^2 C_l L_s + R_e s L_s}{R_e R_l s C_l + R_e + R_l + R_d R_l s C_l + R_d + R_l s^2 C_l L_s + s L_s}}{\frac{R_e R_l + R_d R_e R_l s C_l + R_d R_e + R_e R_l s^2 C_l L_s + R_e s L_s}{R_e R_l s C_l + R_e + R_l + R_d R_l s C_l + R_d + R_l s^2 C_l L_s + s L_s}} \right) \quad (3.7)$$

$$U_e = \left[U_0 C_s (R_e R_l + R_d R_e R_l s C_l + R_d R_e + R_e R_l s^2 C_l L_s + R_e s L_s) \right] / \left[R_e R_l s C_l + R_e + R_l + R_d R_l s C_l + R_d + R_l s^2 C_l L_s + s L_s + R_e R_l s C_s + R_d R_e R_l s^2 C_l C_s + R_d R_e s C_s + R_e R_l s^3 C_l C_s L_s + R_e s^2 C_s L_s \right] \quad (3.8)$$

$$U_l = \left[U_0 C_s (R_e R_l + R_d R_e R_l s C_l + R_d R_e + R_e R_l s^2 C_l L_s + R_e s L_s) R_l \right] / \left[(R_e R_l s C_l + R_e + R_l + R_d R_l s C_l + R_d + R_l s^2 C_l L_s + s L_s + R_e R_l s C_s + R_d R_e R_l s^2 C_l C_s + R_d R_e s C_s + R_e R_l s^3 C_l C_s L_s + R_e s^2 C_s L_s) \left(\frac{R_l}{R_l s C_l + 1} + R_d + s L_s \right) (R_l s C_l + 1) \right] \quad (3.9)$$

$$U_l = \left[U_0 C_s R_l R_e \right] / \left[R_e R_l s C_l + R_e + R_l + R_d R_l s C_l + R_d + R_l s^2 C_l L_s + s L_s + R_e R_l s C_s + R_d R_e R_l s^2 C_l C_s + R_d R_e s C_s + R_e R_l s^3 C_l C_s L_s + R_e s^2 C_s L_s \right] \quad (3.10)$$

$$U_0 = \frac{R_e R_l s C_l U_l + \frac{R_e U_l}{C_s R_l R_e} + \frac{R_l U_l}{C_s R_l R_e} + \frac{R_d R_l s C_l U_l}{C_s R_l R_e} + \frac{R_d U_l}{C_s R_l R_e} + \frac{R_l s^2 C_l L_s U_l}{C_s R_l R_e} + \frac{s L_s U_l}{C_s R_l R_e} + \frac{R_e R_l s C_s U_l}{C_s R_l R_e} + \frac{R_d R_e R_l s^2 C_l C_s U_l}{C_s R_l R_e} + \frac{R_d R_e s C_s U_l}{C_s R_l R_e} + \frac{R_e R_l s^3 C_l C_s L_s U_l}{C_s R_l R_e} + \frac{R_e s^2 C_s L_s U_l}{C_s R_l R_e} \quad (3.11)$$

$$\frac{U_0}{L_s C_l} = U_l s^3 + \left(\frac{1}{C_l R_l} + \frac{R_d}{L_s} + \frac{1}{C_s R_e} \right) U_l s^2 + \left(\frac{R_d}{C_s R_e L_s} + \frac{1}{C_s L_s} + \frac{1}{C_s R_l R_e C_l} + \frac{1}{L_s C_l} + \frac{R_d}{R_l L_s C_l} \right) U_l s + \left(\frac{1}{C_s R_l L_s C_l} + \frac{1}{C_s R_e L_s C_l} + \frac{R_d}{C_s R_l R_e L_s C_l} \right) U_l \quad (3.12)$$

$$\operatorname{Re} \left(\frac{1}{U_l(s)} \right) = \frac{L_s C_l}{U_0} \left(\frac{R_d}{L_s C_l C_s R_e R_l} + \frac{1}{L_s C_l C_s R_e} + \frac{1}{L_s C_l C_s R_l} \right) - \frac{L_s C_l}{U_0} \left(\frac{R_d}{L_s} + \frac{1}{R_l C_l} + \frac{1}{R_e C_s} \right) \omega^2 \quad (3.13)$$

$$\operatorname{Im} \left(\frac{1}{U_l(s)} \right) = \frac{L_s C_l}{U_0} \left(\frac{R_d}{L_s C_l R_l} + \frac{1}{L_s C_l} + \frac{R_d}{L_s C_s R_e} + \frac{1}{R_e R_l C_l C_s} + \frac{1}{L_s C_s} \right) \omega - \frac{L_s C_l}{U_0} \omega^3 \quad (3.14)$$

เนื่องจากข้อมูลสัญญาณที่อยู่ในวัฏจักรความถี่ได้รับการกรองสัญญาณรบกวนออกแล้วจะถูกนำมาแยกเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพออกจากกัน จากนั้นนำมาหาการถดถอยกับสมการแรงดันขาออกที่ 3.13 และ 3.14 เพื่อหาสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ที่อยู่หน้าตัวแปรอิสระซึ่งในที่นี้คือพจน์โอเมก้า จะได้ค่าคงที่ออกมา 4 ค่า นำมาเทียบกับองค์ประกอบหน้าพจน์โอเมก้าได้ตั้งสมการที่ 3.15-3.18

$$A_1 = \frac{L_s C_l}{U_0} \left(\frac{R_d}{L_s C_l C_s R_e R_l} + \frac{1}{L_s C_l C_s R_e} + \frac{1}{L_s C_l C_s R_l} \right) \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_2 = -\frac{L_s C_l}{U_0} \left(\frac{R_d}{L_s} + \frac{1}{R_l C_l} + \frac{1}{R_e C_s} \right) \quad (3.16)$$

$$A_3 = \frac{L_s C_l}{U_0} \left(\frac{R_d}{L_s C_l R_l} + \frac{1}{L_s C_l} + \frac{R_d}{L_s C_s R_e} + \frac{1}{R_e R_l C_l C_s} + \frac{1}{L_s C_s} \right) \quad (3.17)$$

$$A_4 = -\frac{L_s C_l}{U_0} \quad (3.18)$$

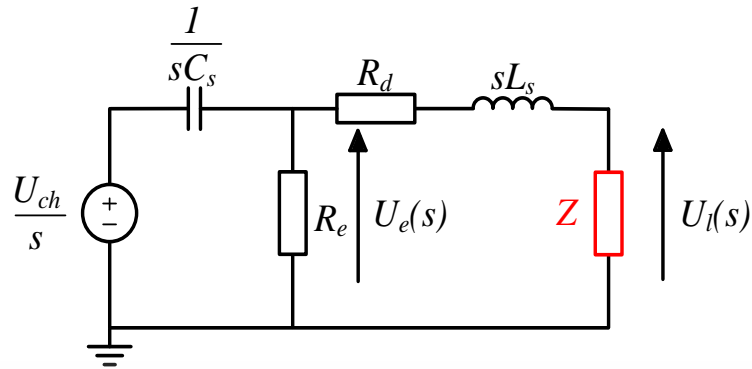
แก้สมการ A_1 - A_4 เพื่อให้ได้ค่าขององค์ประกอบวงจรแต่ละตัวได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำแฝง L_s ความจุไฟฟ้าไหลต C_l ความต้านทานไหลต R_l และแรงดันอัดประจุ U_0 ดังรูปที่ 3.14

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2.9727e-05													
2	2.1615e-09													
3	9.4418e+03													
4	7.6705e+04													
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														

รูปที่ 3.14 ค่าองค์ประกอบแฝงในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

3.5.2 หาค่าองค์ประกอบไหลต

เมื่อทราบค่าองค์ประกอบแฝงในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ถัดมาคือการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ไหลต Z เนื่องจากเมื่อมีการต่อไหลตมาเพิ่ม ค่าความจุไฟฟ้าไหลต C_l และความต้านทานไหลต R_l ไม่สามารถนำมารวมกับค่าไหลตได้ เพราะองค์ประกอบภายในของไหลตไม่สามารถทราบค่าได้ในกรณีที่มีความซับซ้อน จะทราบค่าองค์ประกอบไหลตได้เพียงแค่อิมพีแดนซ์อย่างง่าย จึงได้ตัดปัญหานี้ทิ้งด้วยการคำนวณส่วนไหลตและวงจรวัดทั้งหมดเป็นค่าอิมพีแดนซ์ไหลต Z ตัวเดียวเลย ซึ่งไม่ว่าจะเป็นไหลตชนิดใด หรือมีความซับซ้อนมากน้อย ก็สามารถคำนวณเป็นค่าอิมพีแดนซ์ไหลต Z ได้อย่างง่าย



รูปที่ 3.15 วงจรสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบรวมโหลดและชดวัดเป็นอิมพีแดนซ์โหลด

จากรูปที่ 3.15 วงจรสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์โหลดในวัฏจักรความถี่ดังต่อไปนี้

$$-\frac{U_{ch}}{s} + \frac{I_1}{sC_s} + I_1R_e - I_2R_e = 0 \quad (3.19)$$

$$I_2R_e - I_1R_e + I_2R_d + I_2sL_s + I_2Z = 0 \quad (3.20)$$

$$I_1 \left(\frac{1}{sC_s} + R_e \right) = I_2R_e + \frac{U_{ch}}{s} \quad (3.21)$$

$$I_1 = \frac{I_2R_e sC_s}{(1 + R_e sC_s)} + \frac{U_{ch} C_s}{(1 + R_e sC_s)} \quad (3.22)$$

$$I_1 = \frac{I_2R_e sC_s + U_{ch} C_s}{1 + R_e sC_s} \quad (3.23)$$

$$0 = I_2R_e - \frac{I_2R_e^2 sC_s + U_{ch} C_s R_e}{1 + R_e sC_s} + I_2R_d + I_2sL_s + I_2Z \quad (3.24)$$

$$\frac{U_{ch} C_s R_e}{1 + R_e sC_s} = I_2 \left(R_e - \frac{R_e^2 sC_s}{1 + R_e sC_s} + R_d + sL_s + Z \right) \quad (3.25)$$

$$\frac{U_{ch} C_s R_e}{1 + R_e sC_s} = I_2 \left(\frac{R_e + R_e^2 sC_s - R_e^2 sC_s + R_d + R_d R_e sC_s + sL_s + sL_s R_e sC_s + Z + Z R_e sC_s}{1 + R_e sC_s} \right) \quad (3.26)$$

$$U_z = I_2 Z \quad (3.27)$$

$$U_z = \frac{Z U_{ch} C_s R_e}{R_e + R_e^2 sC_s - R_e^2 sC_s + R_d + R_d R_e sC_s + sL_s + sL_s R_e sC_s + Z + Z R_e sC_s} \quad (3.28)$$

$$U_z(s) = \frac{\left(\frac{R_e}{R_e C_s s + 1} \right) Z(s) C_s U_{ch}}{\left(\frac{R_e}{R_e C_s s + 1} \right) + (R_d + sL) + Z(s)} \quad (3.29)$$

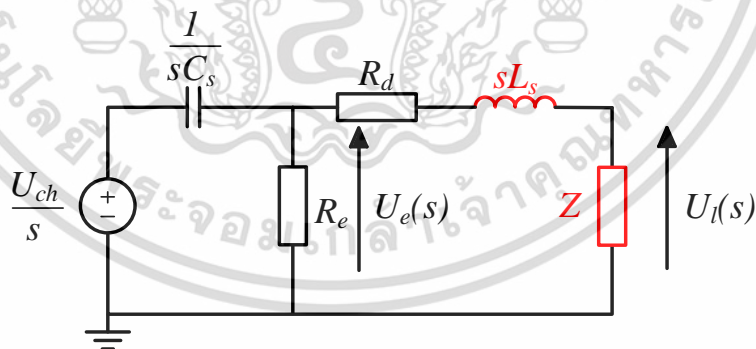
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z(s) = \frac{\left(\frac{R_e}{R_e C_s s + 1} + R_d + sL_s \right) U_l(s)}{\left(\frac{R_e}{R_e C_s s + 1} \right) C_s U_0 - U_l(s)} \quad (3.30)$$

ในการหาค่าองค์ประกอบโพลด์ Z จะสามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่าความเหนี่ยวนำแฝง L_s จากหัวข้อที่ 3.5.1 ก่อนและนำค่าองค์ประกอบต่าง ๆ แทนเข้าในสมการ 3.30 เพื่อหาค่าโพลด์ซึ่งองค์ประกอบโพลด์ Z นี้เป็นผลรวมของโพลด์ที่ต่อเข้ากับวงจรและระบบวัดไว้ด้วยกัน เนื่องจากโพลด์แต่ละรอบของการทดสอบไม่สามารถแทนได้ด้วยองค์ประกอบตายตัวจึงใช้องค์ประกอบโพลด์ Z เป็นตัวแทนเพื่อง่ายต่อการคำนวณเมื่อเปลี่ยนองค์ประกอบในวงจรแต่ยังคงเป็นโพลด์เดิม นอกจากนี้ยังมีสมการที่ 3.29 ซึ่งสามารถใช้เป็นสมการแรงดันอิมพัลส์ขาออกได้

3.6 การปรับค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าเพื่อให้ได้รูปคลื่นตามมาตรฐาน

เมื่อทราบค่าองค์ประกอบแฝงและโพลด์ได้จากหัวข้อ 3.5.1 และ 3.5.2 ดังรูปที่ 3.16 การปรับค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า เช่น เวลาหน้าคลื่น T_1 เวลาหลังคลื่น T_2 และเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูต สามารถทำได้ โดยแทนค่าองค์ประกอบแฝงและโพลด์ไปในสมการที่ 3.29 เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ขาออก U_l ซึ่งในขั้นตอนนี้สามารถปรับความต้านทานหน้าคลื่น R_d และความต้านทานหลังคลื่น R_e เพื่อให้ได้รูปคลื่นตามต้องการ นอกจากนี้ถ้าเกิดการต่ออุปกรณ์เพิ่มก็สามารถขนานหรืออนุกรมกับค่า Z ได้เลย เพื่อปรับลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าได้ตามต้องการ



รูปที่ 3.16 วงจรสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าพร้อมปรับค่าองค์ประกอบรูปคลื่น

วิธีในการปรับเวลาหน้าคลื่น T_1 เวลาหลังคลื่น T_2 และอัตราส่วนฟุงเกินนอกจากการปรับค่าความต้านทานหน้าคลื่น R_d และความต้านทานหลังคลื่น R_e ยังมีการต่อองค์ประกอบอื่นเพิ่มไม่ว่าจะเป็นขนานตัวต้านทาน R เพิ่มเพื่อให้แรงดันที่อัดประจุกับแรงดันขาออกมีความใกล้เคียงกัน ค่ายอดไม่ตกลงมามาก หรือการต่อ L_d เพิ่มขนานตัวต้านทานคลื่น R_d และยังมีวิธีอีกหลายวิธีที่ช่วยปรับให้รูปคลื่นอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

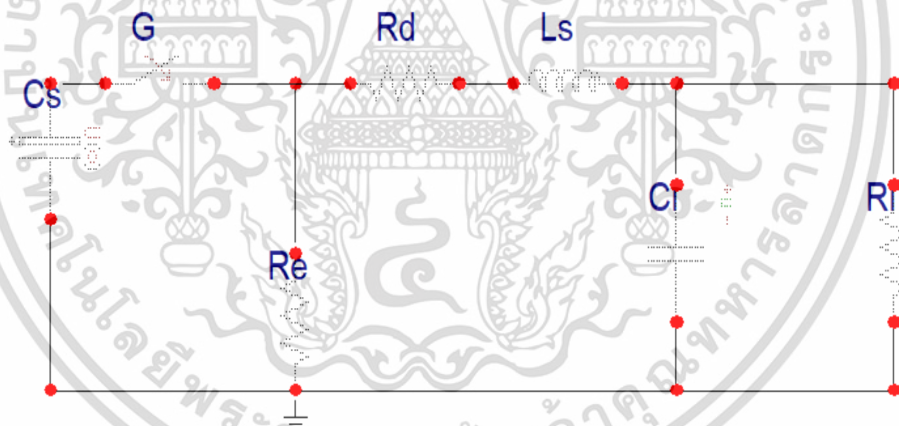
การทดสอบและการประเมินผล

การพิสูจน์ว่าทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้สามารถใช้งานได้จริงหรือไม่ ต้องมีการทดสอบจากวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ทราบค่าองค์ประกอบวงจรและเปรียบเทียบผลลัพธ์กับทฤษฎี ซึ่งการทดสอบแบ่งออกเป็น การจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ

4.1 ทดสอบด้วยการจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.1.1 กรณีทดสอบ

การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะใช้โปรแกรม ATPDraw ในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งรูปวงจรเป็นไปตามรูปที่ 4.1 โดยจำลองทั้งหมด 7 กรณี มีการกำหนดค่าองค์ประกอบวงจรให้เป็นดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าองค์ประกอบของกรณีทดสอบ

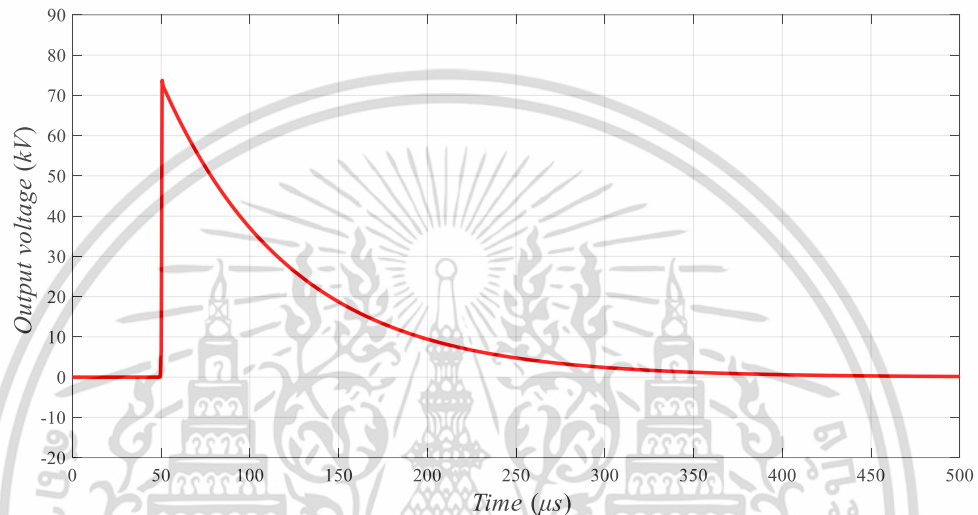
กรณี	องค์ประกอบ					
	L_s (μH)	R_d (Ω)	R_e (Ω)	C_s (μF)	C_1 (nF)	R_1 (Ω)
L_{15}	15	200	300	0.25	1	10,000
L_{30}	30	200	300	0.25	1	10,000
L_{60}	60	200	300	0.25	1	10,000
L_{120}	120	200	300	0.25	1	10,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

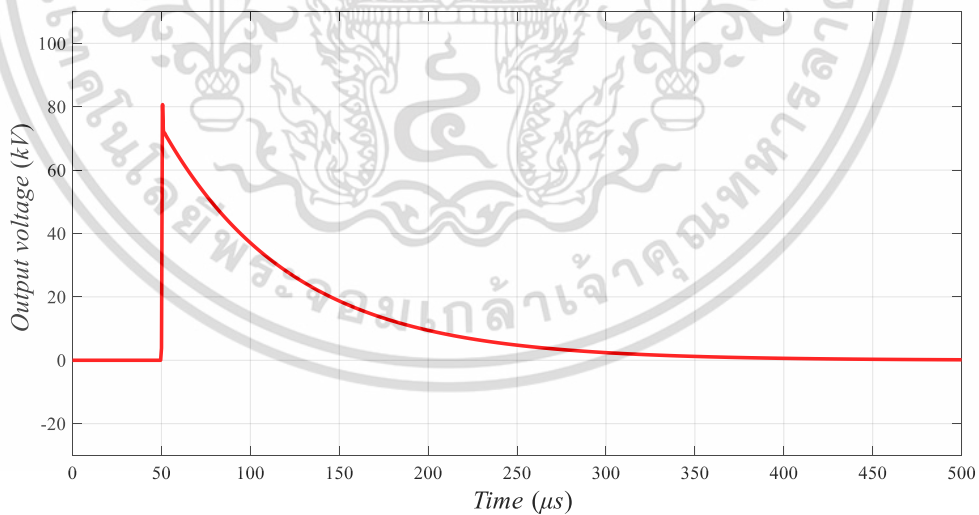
L_{240}	240	200	300	0.25	1	10,000
L_{480}	480	200	300	0.25	1	10,000
L_{960}	960	200	300	0.25	1	10,000

หลังจากการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะได้รูปคลื่นออกมาดังรูปที่ 4.2

ถึง 4.8

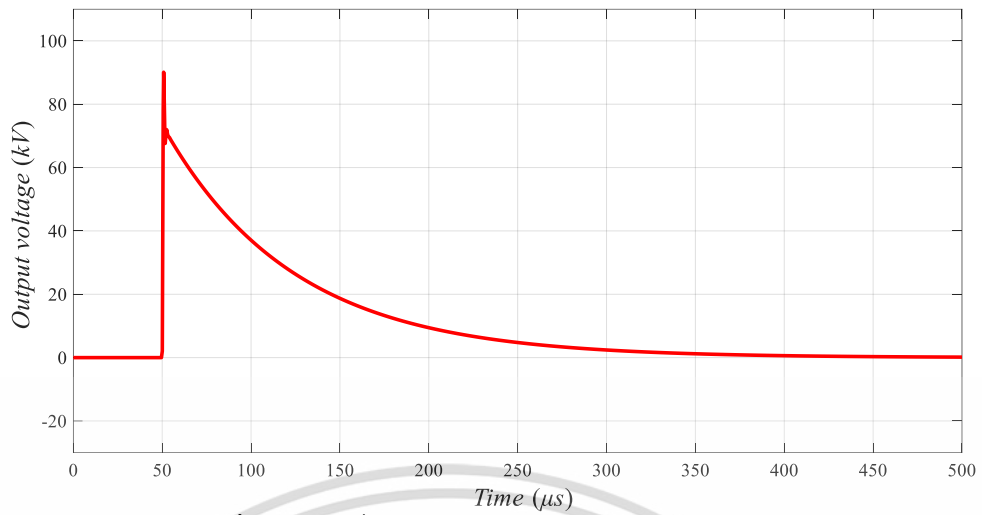


รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L_{15}

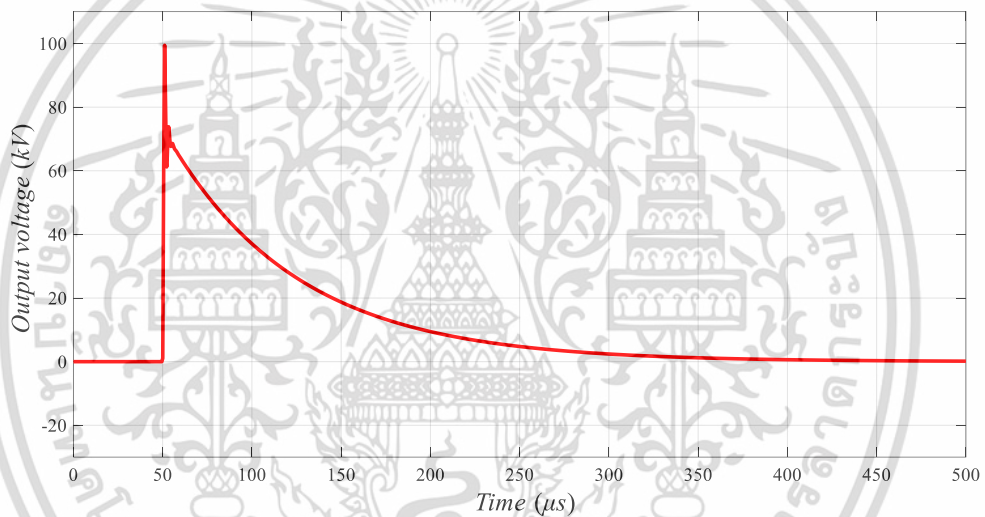


รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L_{30}

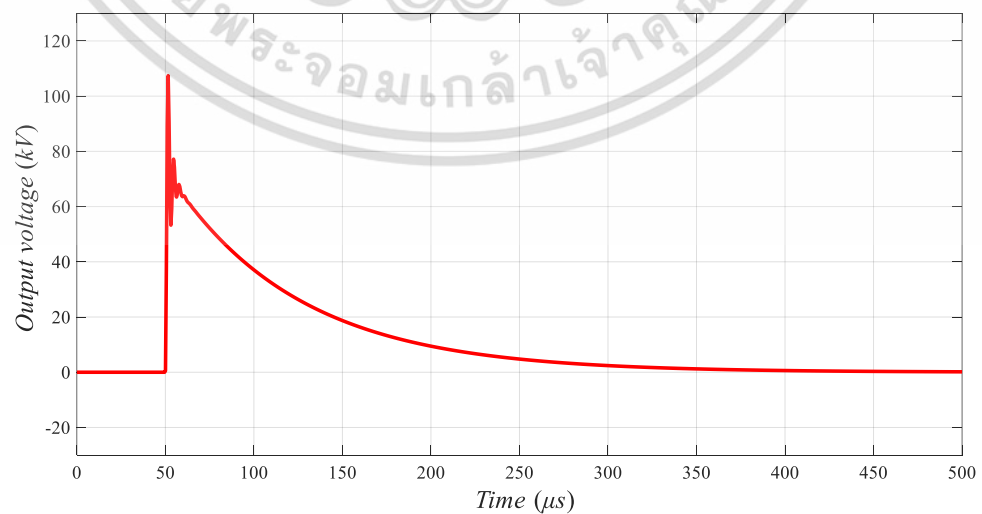
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L_{60}

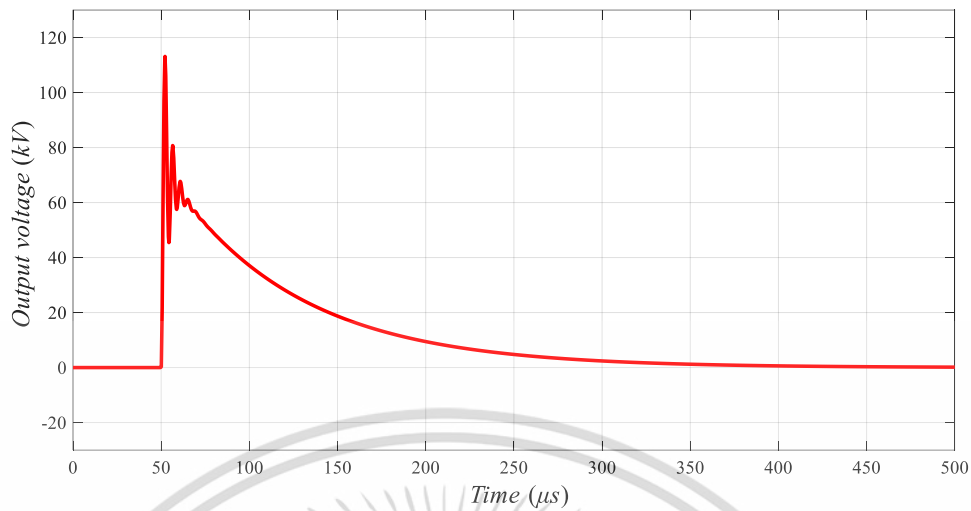


รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L_{120}

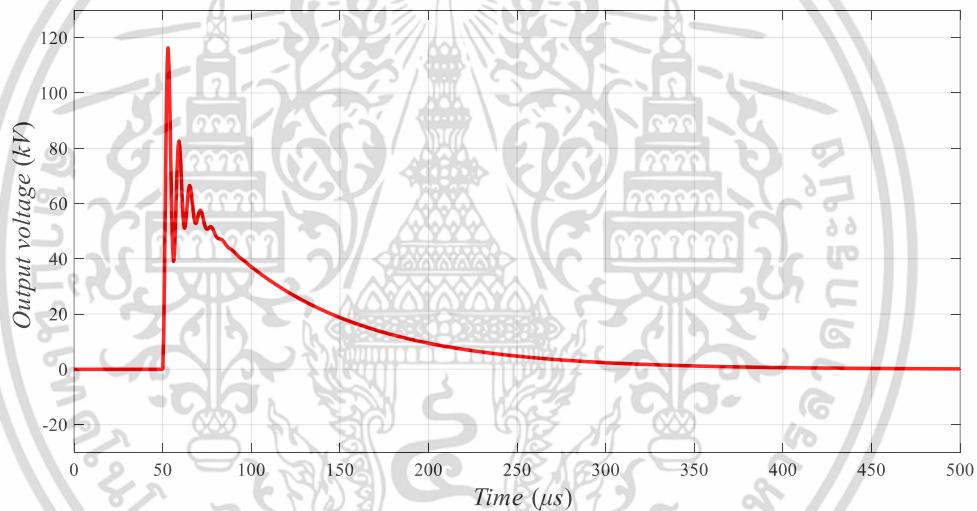


รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L_{240}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L_{480}



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีทดสอบ L_{960}

จะสังเกตได้ว่าแต่ละกรณีจะมีเปอร์เซ็นต์ส่วนพุ่งเกินไม่เท่ากันอันเนื่องมาจากค่าของความเหนี่ยวนำแฝง L_s ที่เปลี่ยนไป จากกรณีของ L_{15} จะมีส่วนพุ่งเกินอยู่ที่ 0.4685 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งกรณีของ L_{960} ที่มีส่วนพุ่งเกินอยู่ที่ 32.6059 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมาตรฐาน IEC 60060-1 [1] ได้กำหนดเปอร์เซ็นต์ส่วนพุ่งเกินที่ยอมรับได้ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม การเกิดเปอร์เซ็นต์พุ่งเกินเหมือนกรณี L_{960} มีโอกาสเกิดขึ้นได้จริงในการใช้งานในทางปฏิบัติ จึงได้ทดสอบเพื่อให้ครอบคลุมทุกสถานการณ์

4.1.2 การเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณกับค่าจริง

เมื่อมีการทดสอบการทางองค์ประกอบแฝงและโหลดด้วยการจำลองด้วยโปรแกรม จึงต้องมีการเปรียบเทียบองค์ประกอบวงจรที่คำนวณได้และองค์ประกอบที่ใช้จำลองเพื่อดูความผิดพลาด

ดังตารางที่ 4.2 ถึง 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำแฝง L_s ที่คำนวณได้กับค่าที่ใช้จำลอง

กรณี	L_s (μH) ที่คำนวณได้	L_s (μH) ที่ใช้จำลอง	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
L_{15}	14.9977	15.0000	-0.0153
L_{30}	29.9767	30.0000	-0.0777
L_{60}	60.0248	60.0000	0.0413
L_{120}	120.3698	120.0000	0.3082
L_{240}	240.5293	240.0000	0.2205
L_{480}	478.8322	480.0000	-0.2433
L_{960}	957.5970	960.0000	-0.2503

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าไหลต C_l ที่คำนวณได้กับค่าที่ใช้จำลอง

กรณี	C_l (nF) ที่คำนวณได้	C_l (nF) ที่ใช้จำลอง	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
L_{15}	1.0020	1.0000	0.2000
L_{30}	1.0011	1.0000	0.1100
L_{60}	0.9998	1.0000	-0.0200
L_{120}	0.9974	1.0000	-0.2600
L_{240}	0.9956	1.0000	-0.4400
L_{480}	1.0012	1.0000	0.1200
L_{960}	1.0013	1.0000	0.1300

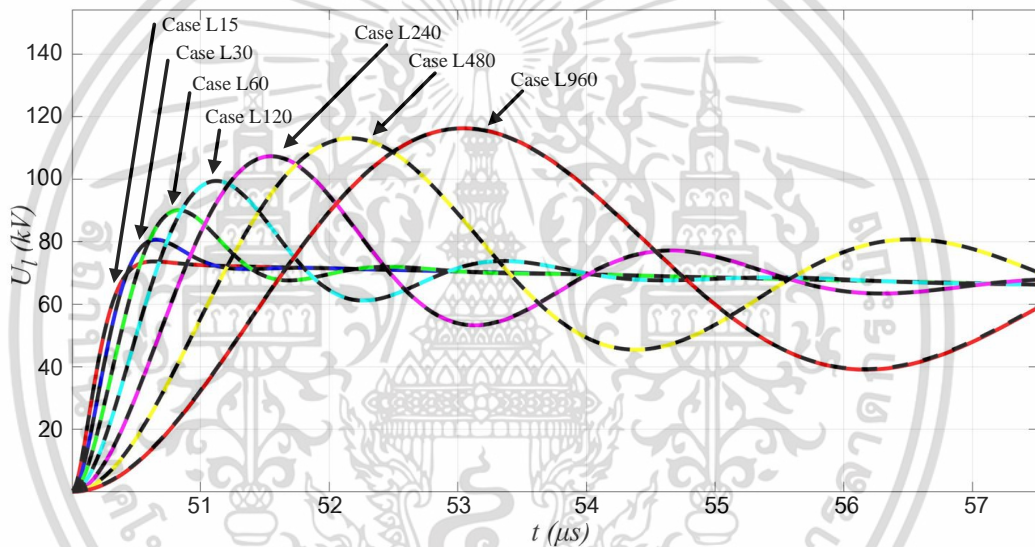
ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานไหลต R_l ที่คำนวณได้กับค่าที่ใช้จำลอง

กรณี	R_l (Ω) ที่คำนวณได้	R_l (Ω) ที่ใช้จำลอง	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
L_{15}	9,986.6819	10,000	-0.1332
L_{30}	9,985.9232	10,000	-0.1408
L_{60}	9,978.9309	10,000	-0.2107
L_{120}	9,941.1705	10,000	-0.5883
L_{240}	10,105.6617	10,000	1.0566
L_{480}	10,680.2918	10,000	6.8029
L_{960}	9,995.7490	10,000	-0.0425

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันอัดประจุ U_0 ที่คำนวณได้กับค่าที่ใช้จำลอง

กรณี	U_0 (V) ที่คำนวณได้	U_0 (V) ที่ใช้จำลอง	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
L_{15}	74,844.7483	75,000.0000	-0.2070
L_{30}	74,844.7819	75,000.0000	-0.2070
L_{60}	74,845.7060	75,000.0000	-0.2057
L_{120}	74,851.0879	75,000.0000	-0.1985
L_{240}	74,835.3654	75,000.0000	-0.2195
L_{480}	74,774.8971	75,000.0000	-0.3001
L_{960}	74,918.8269	75,000.0000	-0.1082



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบรูปคลื่นที่ใช้จำลองกับรูปคลื่นที่จำลองจากองค์ประกอบที่คำนวณได้

รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมเทียบกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ได้จากการคำนวณแล้วนำมาคำนวณแรงดันขาออก ทุกกรณีให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ มีความผิดพลาดไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ แต่มีอยู่ 1 กรณีของการคำนวณความต้านทานโหลด R_L ซึ่งเป็นกรณี L_{480} ที่คำนวณความผิดพลาดเกือบ 7 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุเกิดจากขั้นตอนการหาเส้นโค้งที่เหมาะสมซึ่งกรณีนี้มีส่วนพุ่งเกินสูงทำให้อาจเกิดเส้นโค้งที่เหมาะสมคลาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตามองค์ประกอบตัวต้านทานโหลด R_L นั้นมีความสำคัญต่อวงจรเกิดสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ้าน้อยและอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ซึ่งค่าที่ผิดเพี้ยนไปแทบไม่ส่งผลกับการจำลองแรงดันอิมพัลส์ขึ้นมา นอกจากนี้เมื่อนำองค์ประกอบวงจรที่คำนวณได้มาสร้างอิมพัลส์ด้วยสมการที่ 3.20 และเปรียบเทียบองค์ประกอบรูปคลื่นกับองค์ประกอบรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผลลัพธ์เป็นดังตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบของค์ประกอบรูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณด้วยองค์ประกอบวงจรมและองค์ประกอบรูปคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

กรณี	จากการคำนวณ				จากการจำลอง				เปอร์เซ็นต์ผิดพลาด			
	ค่ายอด (V)	เวลาหน้าคลื่น (µs)	เวลาหลังคลื่น (µs)	ส่วนพุงเกิน(%)	ค่ายอด (V)	เวลาหน้าคลื่น (µs)	เวลาหลังคลื่น (µs)	ส่วนพุงเกิน(%)	ค่ายอด (V)	เวลาหน้าคลื่น (µs)	เวลาหลังคลื่น (µs)	ส่วนพุงเกิน(%)
L15	73.21	0.42	50.93	1.68	73.22	0.42	50.92	1.71	0.00	0.12	0.01	-0.03
L30	76.85	0.42	47.35	9.85	76.86	0.42	47.33	9.89	-0.02	-0.07	0.02	-0.05
L60	83.49	0.53	41.25	18.90	83.50	0.53	41.24	18.92	-0.01	-0.28	0.02	-0.03
L120	92.13	0.76	34.02	25.94	92.13	0.75	34.02	25.91	0.01	1.46	0.00	0.03
L240	101.19	1.11	27.15	30.40	101.24	1.11	27.10	30.43	-0.05	-0.24	0.19	-0.03
L480	108.92	1.60	3.68	32.54	108.93	1.60	3.68	32.56	-0.01	0.03	0.07	-0.02
L960	113.92	2.27	4.82	32.61	113.82	2.27	4.82	32.61	0.09	0.12	-0.03	0.00

ผลลัพธ์ของวิธีการที่เสนอเกือบทั้งหมดได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำเมื่อเทียบกับรูปคลื่นที่จำลองจากองค์ประกอบของวงจรที่กำหนดขึ้น

4.2 ทดสอบด้วยการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการโดยวงจรการสร้างความดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็นไปตามรูปที่ 2.3 ในบทที่ 2 ในส่วนของค่าองค์ประกอบแต่ละตัวในวงจรจะเป็นไปตามตารางที่ 4.7 และขึ้นแรงดันให้ได้ตามพิกัดแรงดันทดสอบ V_p

การทดลองมีทั้งหมด 4 กรณี ในแต่ละกรณีจะมีการต่อโหลดไม่เหมือนกันเพื่อให้เกิดความหลากหลายในการทดลองและเป็นการยืนยันว่าสามารถใช้ได้กับทุกโหลด ในแต่ละกรณีจะปรับความต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่นหรือมีการต่อองค์ประกอบเพิ่มเติมเพื่อให้รูปคลื่นเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

ตารางที่ 4.7 กรณีทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

กรณี	C_s (μF)	R_d (Ω)	R_e (Ω)	L_d (mH)	R_p (Ω)	V_p (kV)	โหลด
1(1)	1.33	180	60	-	-	75	-
1(2)	1.33	180	60	-	-	75	*
1(3)	1.33	220	60	-	-	125	*
2(1)	1.33	180	60	-	-	75	**
2(2)	1.33	80	90	-	-	125	**
3(1)	1.33	180	60	-	-	75	***
3(2)	1.33	500	90	0.2	600	125	***
4(1)	0.333	180	240	-	-	300	***
4(2)	0.333	60	480	0.2	300	450	***

* หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 24 kV 250 kVA DY11

** หม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง 24 kV 5 MVA DY11

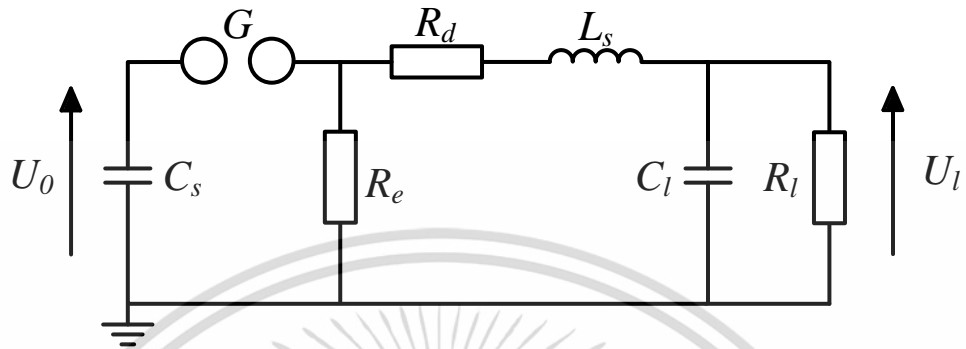
*** หม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง 115/24 kV (24kV) 50 MVA

L_d คือตัวเหนี่ยวนำที่ขนานองค์ประกอบ R_d และ L_s

R_p คือตัวต้านทานเพิ่มเติมที่ต่อขนานเข้ากับโหลด

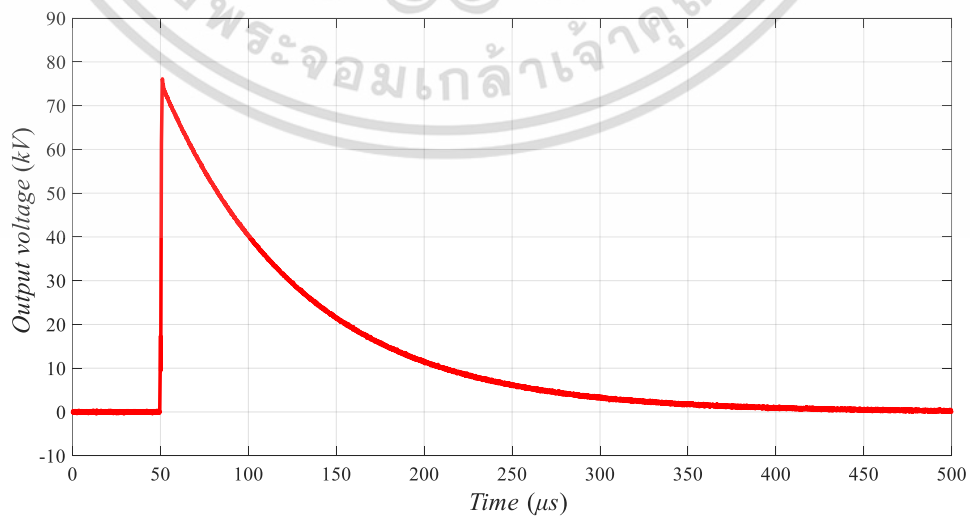
4.2.1 กรณีที่ 1 การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่ขดลวดแรงดันปานกลาง
 การทดสอบในกรณีที่ 1 แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ 1(1) 1(2) และ 1(3)

1(1) : การทดสอบโดยไม่ต่อโหลด



รูปที่ 4.10 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ากรณีไม่ต่อโหลด

ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการที่ต่อวงจรดังรูปที่ 4.10 โดยที่องค์ประกอบตัวเก็บประจุสร้างแรงดันอิมพัลส์ C_s ตัวต้านทานหน้าคลื่น R_d และตัวต้านทานหลังคลื่น R_e มีค่าดังตารางที่ 4.7 ทำการทดสอบโดยยังไม่ต่อหม้อแปลง จะมีเพียงชุดเครื่องมือวัดเท่านั้น เพื่อต้องการทราบค่าองค์ประกอบแฝงและโหลดของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าก่อน ซึ่งในการทดสอบกรณีที่ 1 มีเป้าหมายคือการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 24 kV 250 kVA DY11 ที่ขดลวดด้านแรงดันปานกลาง ซึ่งมีพิกัดแรงดันทดสอบการคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์อยู่ที่ 125 kV จากมาตรฐาน IEC 60694 อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการปรับองค์ประกอบรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าให้เป็นไปตามมาตรฐานนั้น จะกระทำที่แรงดัน 60 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดแรงดันทดสอบก่อน ซึ่งจะได้พิกัดแรงดันทดสอบ V_p เท่ากับ 75 kV ดังรูปที่ 4.11



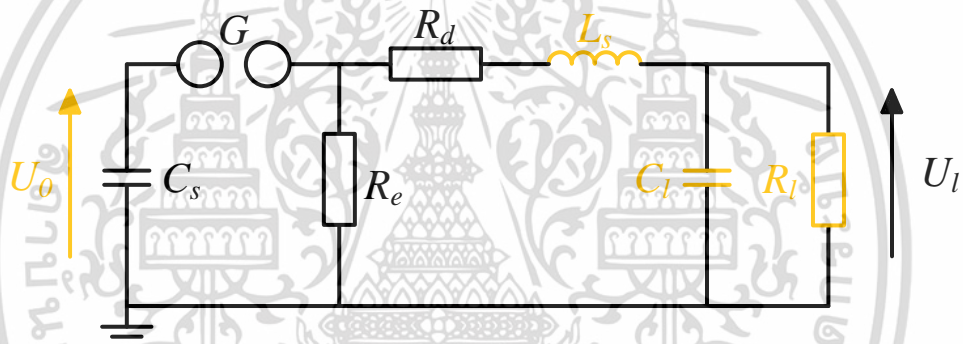
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 1(1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อบันทึกผลการทดลองและนำเอารูปคลื่นมาปรับคุณภาพตามหัวข้อ 3.3 ซึ่งจะตัดส่วนพุ่งเกินในช่วงเวลาเริ่มต้นของแรงดันอิมพัลส์ที่ต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของค่ายอด ทำการหาส่วนโค้งที่เหมาะสมแล้วใช้การประมาณค่านอกช่วงเพื่อต่อรูปคลื่นจนไปตัดเส้นที่มีค่าเป็น 0 ในส่วนของหางคลื่นก็ทำการหาส่วนโค้งที่เหมาะสมและประมาณค่านอกช่วงเช่นไปจนกว่าจุดสุดท้ายจะมีค่าต่ำกว่า 0.01 เปอร์เซ็นต์ของค่ายอด

เมื่อรูปคลื่นพร้อมแก่การคำนวณแล้ว จึงใช้การแปลงฟูริเยร์เพื่อให้อยู่ในวัฏจักรความถี่ตามหัวข้อ 3.4 อย่างไรก็ตามแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าใช้ความถี่ถึง 250kHz ซึ่งความถี่ที่มากกว่านั้นถูกกรองทิ้ง

แยกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่กรองแล้วออกเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพ จากนั้นใช้การถดถอยเชิงเส้นกับสมการที่ 3.13 และ 3.14 ในหัวข้อ 3.5 เพื่อให้ได้ค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าออกมาดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.12 องค์ประกอบแฝงที่หาได้ในวงจรไฟฟ้า

ตารางที่ 4.8 ค่าองค์ประกอบแฝงที่คำนวณได้

องค์ประกอบวงจรไฟฟ้า	ค่าที่คำนวณได้
L_s (μH)	29.9480
C_l (nF)	2.1069
R_l (Ω)	9961.7924
U_0 (V)	76619.8701

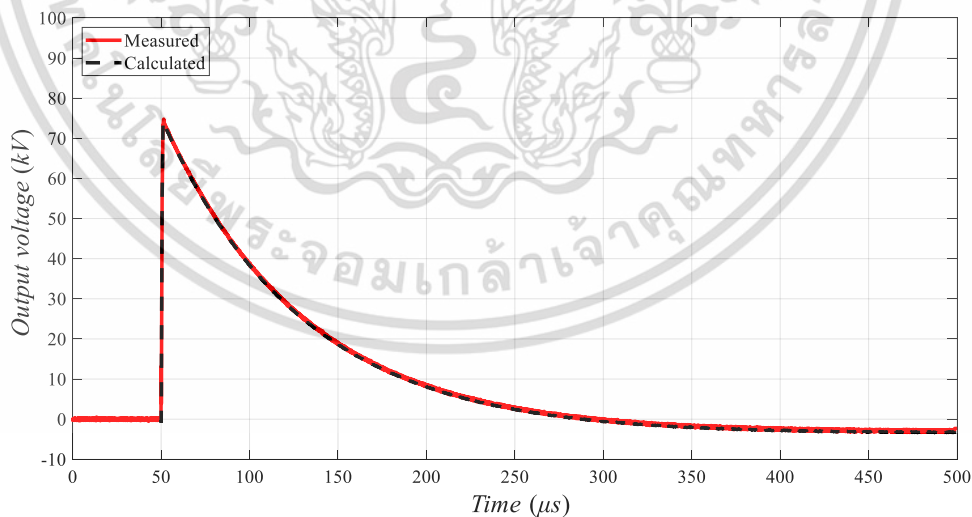
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1(2) : การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 24 kV 250 kVA DY11 ที่ 60 เฮอร์เซ็นต์ของ พิกัดแรงดันทดสอบ

เมื่อได้อุปกรณ์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฉงและองค์ประกอบโพลด ทำการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบจำหน่าย 24 kV 250 kVA DY11 ซึ่งทราบค่าองค์ประกอบหม้อแปลงจากการวัดดังนี้ ความต้านทาน 10,000 Ω ความเหนี่ยวนำ 310 mH และความจุไฟฟ้า 0.3 nF แล้วทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ 75 kV เช่นเดิม

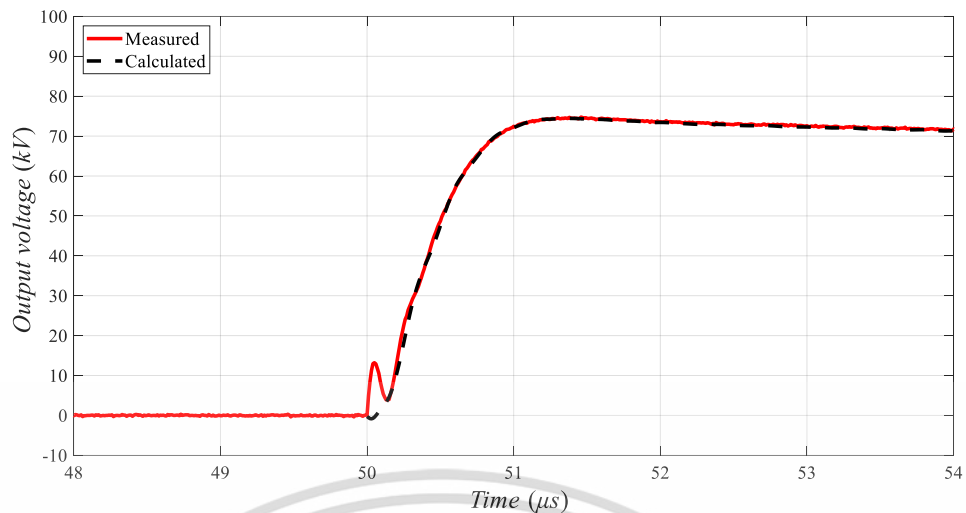
ในส่วนของการคำนวณ นำค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฉงและองค์ประกอบโพลดที่คำนวณได้จากกรณี 1(1) และรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากกรณีที่ 1(1) ที่ปรับคุณภาพและกรองความถี่ตามหัวข้อที่ 3.5 แทนเข้าในสมการที่ 3.30 เพื่อให้ได้ค่าขององค์ประกอบโพลด Z ซึ่ง Z ในตอนนี้เป็นเพียงผลรวมขององค์ประกอบวงจรแฉงและชุดเครื่องมือวัด ดังนั้นจึงทำการขานองค์ประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 24 kV 250 kVA DY11 ที่ได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้อุปกรณ์โพลด Z ค่าใหม่ที่มีการต่อหม้อแปลงเข้ากับวงจร

แทนค่าองค์ประกอบโพลด Z ในสมการที่ 3.29 เพื่อให้ได้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขาออก U_1 ที่ตกคร่อมโพลด ในขั้นตอนนี้สามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานหน้าคลื่น R_d และความต้านทานหลังคลื่น R_e ได้เพื่อปรับค่าเวลาหน้าคลื่น T_1 และเวลาหลังคลื่น T_2 ให้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด หลังจากคำนวณค่าแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขาออก U_1 ใช้การแปลงฟูริเยร์ผกผันเพื่อให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอยู่ในวัฏจักรเวลาและเปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่ได้จากทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 4.13



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 1(2) (ก) ช่วงเวลายาว

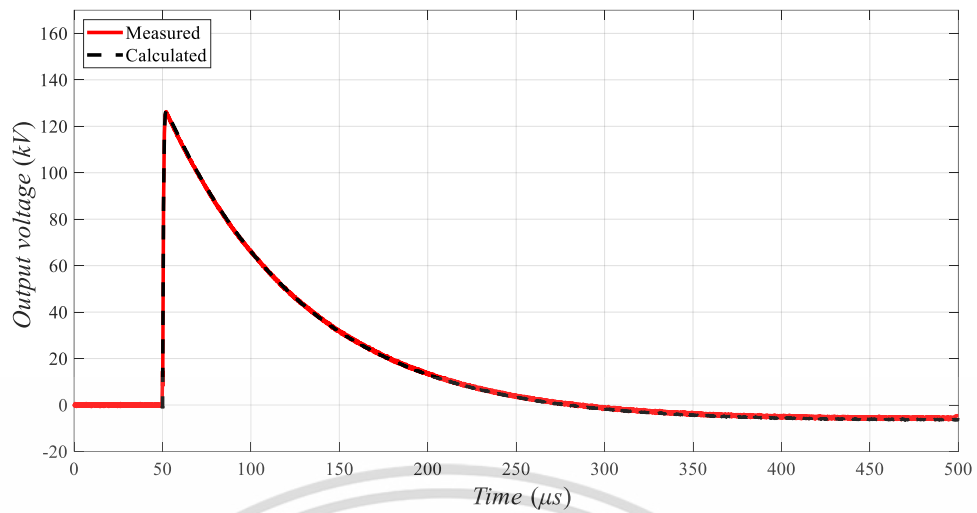
(ข) ช่วงเวลาสั้น

พบว่ารูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณแทบจะทับซ้อนรูปคลื่นจากการทดสอบและมีค่า R-square 0.9996 อย่างไรก็ตามเวลาหน้าคลื่น T_1 เวลาหลังคลื่น T_2 และเปอร์เซ็นต์ส่วนพุ่งเกินมีค่า 0.8615 μs 52.3040 μs และ 1.1967 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานยอมรับแต่เวลาหน้าคลื่น T_1 ใกล้เคียงกับขอบล่างมากเกินไป ดังนั้นจึงมีการทดสอบโดยปรับเวลาหน้าคลื่น T_1 ให้เพิ่มขึ้นในกรณีที่ 1(3)

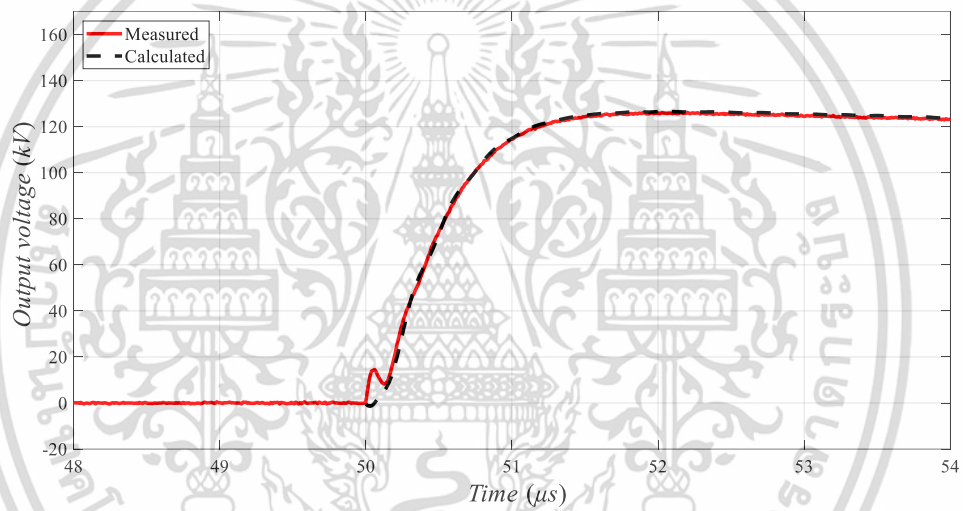
1(3) : การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 24 kV 250 kVA DY11 ที่พิกัดแรงดันทดสอบ

เนื่องจากกรณีที่ 1(2) มีองค์ประกอบเวลาหน้าคลื่น T_1 ของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าใกล้ขอบล่างของมาตรฐานมากเกินไปการทดสอบในกรณี 1(3) จึงมีการเพิ่มความต้านทานหน้าคลื่น R_d เป็น 220 Ω เพื่อเป็นการปรับเวลาหน้าคลื่น T_1 ให้เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้เพิ่มแรงดันทดสอบให้เท่าพิกัด 125 kV ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

ในส่วนของการคำนวณ คำนวณค่าองค์ประกอบโหลด Z ใหม่โดยใช้องค์ประกอบวงจรไฟฟ้าในกรณีที่ 1(1) เหมือนเดิมแต่เปลี่ยนค่าแรงดันอัดประจุ U_0 เป็นเหมือนในกรณีที่ 1(3) จากนั้นแทนค่าองค์ประกอบโหลด Z ในสมการที่ 3.29 เพื่อให้ได้แรงดันอิมพัลส์ขาออก U_i ที่ตกรวมโหลด ซึ่งใช้ค่าความต้านทานหน้าคลื่น R_d เป็น 220 Ω ตามการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ใช้การแปลงฟูริเยร์ผกผันเพื่อให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอยู่ในวัฏจักรเวลาและเปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 4.14



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าจากการทดสอบกรณีที่ 1(3) (ก) ช่วงเวลายาว
(ข) ช่วงเวลาสั้น

พบว่ารูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณแทบจะทับซ้อนรูปคลื่นจากการทดสอบและมีค่า R-square 0.9997 มีองค์ประกอบรูปคลื่นดังต่อไปนี้

เวลาหน้าคลื่น T_1 1.1513 μs

เวลาหลังคลื่น T_2 53.1958 μs

เปอร์เซ็นต์ส่วนพุงเกิน 0.0923 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

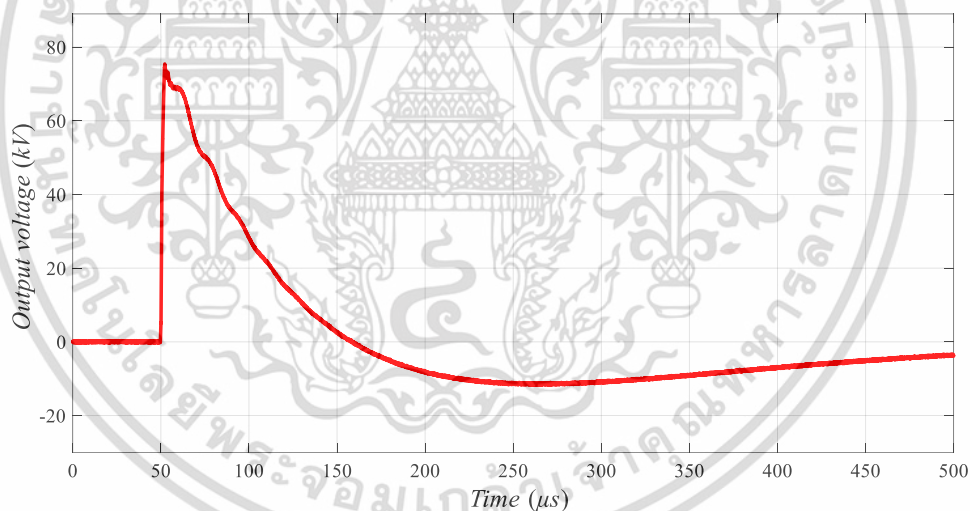
4.2.2 กรณีที่ 2 การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลังที่ขดลวดแรงดันไฟฟ้าปาน

กลาง

การทดสอบในกรณีที่ 2 แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ 2(1) และ 2(2)

2(1) : การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง 24 kV 5 MVA DY11 ที่ 60 เอร์เซ็นต์ของพิกัดแรงดันทดสอบ

การทดสอบในกรณีที่ 2 มีความซับซ้อนมากขึ้นเนื่องจากใช้หม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง แทนซึ่งวัดค่าองค์ประกอบหม้อแปลงได้ยาก อีกทั้งยังมีองค์ประกอบภายในหม้อแปลงที่ทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เป็นไปตามมาตรฐานได้ยากขึ้น โดยเป็นโหนดที่มีความเหนี่ยวนำต่ำทำให้เกิดการแกว่งของแรงดัน เวลาหลังคลื่น T_1 จะสั้นกว่าปกติ นอกจากนี้หลังคลื่นยังเกิดยอดกลับหัว (Under-shoot) ดังรูปที่ 4.15 ทำการทดสอบที่ 60 เอร์เซ็นต์ของ 125 kV ตามที่มาตรฐานกำหนด เพื่อเป็นการปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า แต่เนื่องจากเวลาหน้าคลื่น T_1 เวลาหลังคลื่น T_2 และ เอร์เซ็นต์ส่วนพุ่งเกินของการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลังนี้ยังไม่ดีพอ ซึ่งมีค่าเป็น 2.1637 μ s 38.2472 μ s และ 0.3207 เอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทำให้ต้องมีการปรับเวลาหน้าคลื่น T_1 ให้น้อยลงและเวลาหลังคลื่น T_2 ให้มากขึ้นในลำดับถัดไป



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 2(1)

ในส่วนของการคำนวณยังคงใช้องค์ประกอบวงจรไฟฟ้าสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเหมือนกรณีที่ 1 ดังนั้นสามารถใช้ค่าองค์ประกอบวงจรแฉงและองค์ประกอบโหนดจากกรณีที่ 1(1) โดยมีค่าดังตารางที่ 4.8

นำค่าองค์ประกอบวงจรแฉง องค์ประกอบโหนด จากตารางที่ 4.8 และ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ทดสอบในกรณีที่ 2(1) ที่ปรับคุณภาพและกรองความถี่ตามหัวข้อที่ 3.5 แทนค่าในสมการ 3.30 เพื่อให้ได้ค่าองค์ประกอบโหนด Z

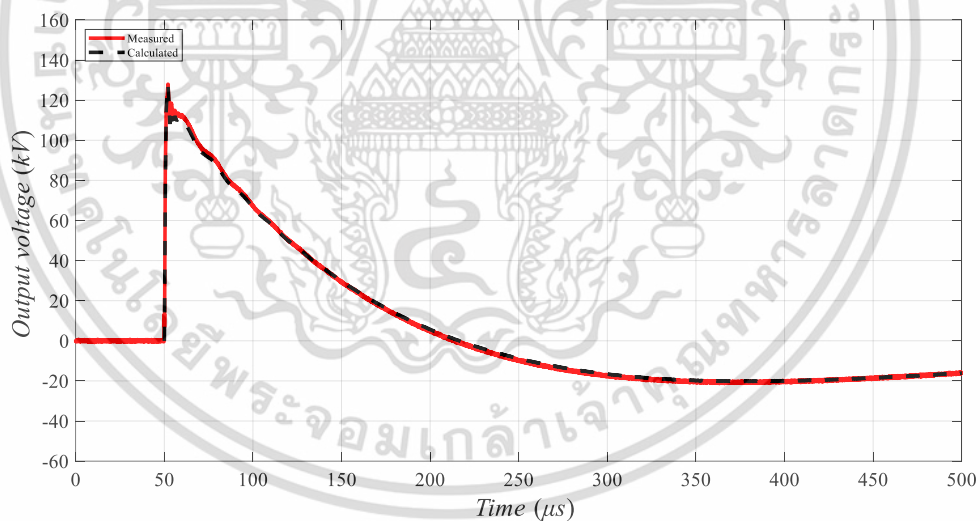
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการปรับองค์ประกอบรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าทำได้โดยการขนานตัวเก็บประจุ 1 nF เข้ากับองค์ประกอบโหลด Z เพื่อต้องการลดส่วนพุ่งเกิน อีกทั้งยังลดความต้านทานหน้าคลื่น R_d ให้เหลือ 80 Ω และเพิ่มความต้านทานหลังคลื่น R_e ให้มากขึ้นเป็น 90 Ω เพื่อต้องการให้เวลาหน้าคลื่น T_1 ลดลงและเวลาหลังคลื่น T_2 เพิ่มขึ้น ตามลำดับ

2(2) : การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง 24 kV 5 MVA DY11 ที่พิกัดแรงดันทดสอบ

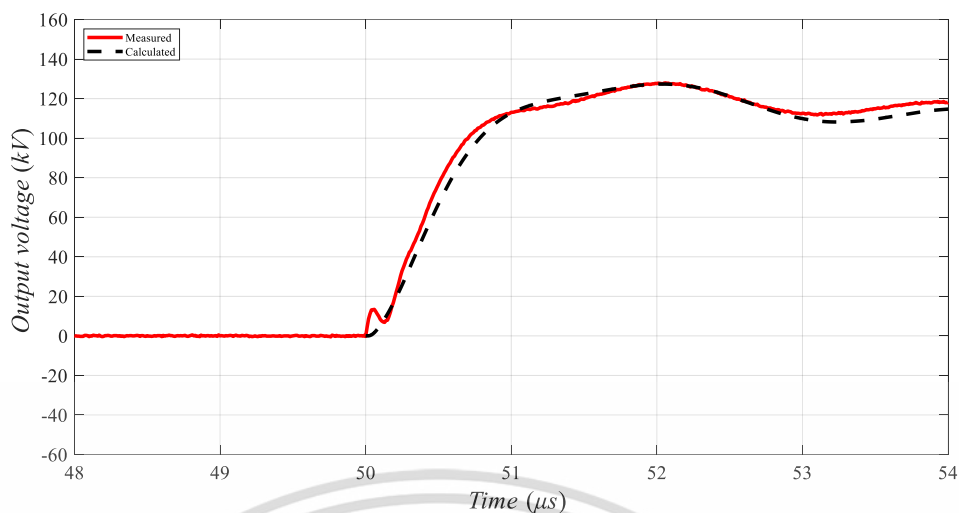
เมื่อสามารถคำนวณรูปคลื่นว่าเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดในกรณี 2(1) จึงทำการต่อตัวเก็บประจุเข้า 1 nF ขนานกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง และเปลี่ยนความต้านทานหน้าคลื่น R_d กับความต้านทานหลังคลื่น R_e ตามที่ได้คำนวณไว้ในกรณี 2(1) ทำการทดสอบที่พิกัดแรงดันทดสอบ V_p 125 kV ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

ในส่วนของการคำนวณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ นำค่าองค์ประกอบโหลด Z ใหม่หลังจากขนานตัวเก็บประจุในกรณี 2(1) และความต้านทานหน้าคลื่น R_d 80 Ω กับความต้านทานหลังคลื่น R_e 90 Ω อีกทั้งแรงดันอัดประจุ U_0 เปลี่ยนค่าเป็น 125 kV แทนค่าในสมการที่ 3.29 เพื่อให้ได้แรงดันอิมพัลส์ขาออก U_t ที่ตกรวมโหลด ใช้การแปลงฟูริเยร์ผกผันเพื่อให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอยู่ในวัฏจักรเวลาและเปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่ได้จากทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 4.16



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 2(2) (ก) ช่วงเวลายาว

(ข) ช่วงเวลาสั้น

พบว่ารูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณแบบจะทับซ้อนรูปคลื่นจากการทดสอบและมีค่า R-square 0.9994 มีองค์ประกอบรูปคลื่นดังต่อไปนี้
 เวลาหน้าคลื่น T_1 1.1513 μ s
 เวลาหลังคลื่น T_2 53.1958 μ s
 เปอร์เซนต์ส่วนพุ่งเกิน -0.0923 เปอร์เซนต์

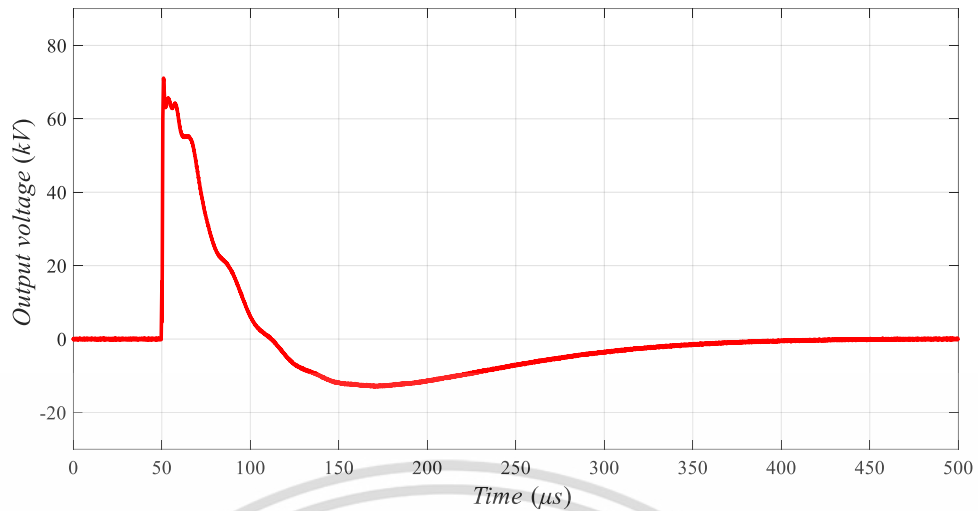
4.2.3 กรณีที่ 3 การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลังโดยใช้วงจรเกลนิงเจอร์

การทดสอบในกรณีที่ 3 แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ 3(1) และ 3(2)

3(1) : การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง 115/24 kV 50 MVA YNyn0 ที่ 60 เปอร์เซนต์ของพิกัดแรงดันทดสอบ

การทดสอบในกรณีที่ 3 ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลังที่มีขนาดใหญ่กว่ากรณีที่ 2 ซึ่งมีความเหนี่ยวนำต่ำ ทำให้เกิดการแกว่งของแรงดัน เวลาหลังคลื่น T_2 จะสั้นกว่าปกติ และหลังคลื่นยังเกิดยอดกลับหัว (Under-shoot) มากกว่าในกรณีที่ 2 ดังรูปที่ 4.17 โดยทำการทดสอบที่ 60 เปอร์เซนต์ของ 125 kV เพื่อเป็นการปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนด แต่เนื่องจากเวลาหน้าคลื่น T_1 เวลาหลังคลื่น T_2 และ เปอร์เซนต์ส่วนพุ่งเกินของการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลังนี้มีค่าเป็น 0.6841 μ s 24.1602 μ s และ -0.1608 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ ซึ่งห่างจากเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ทำให้ต้องมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่น T_1 และเวลาหลังคลื่น T_2 ให้มากขึ้นในลำดับถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 3(1)

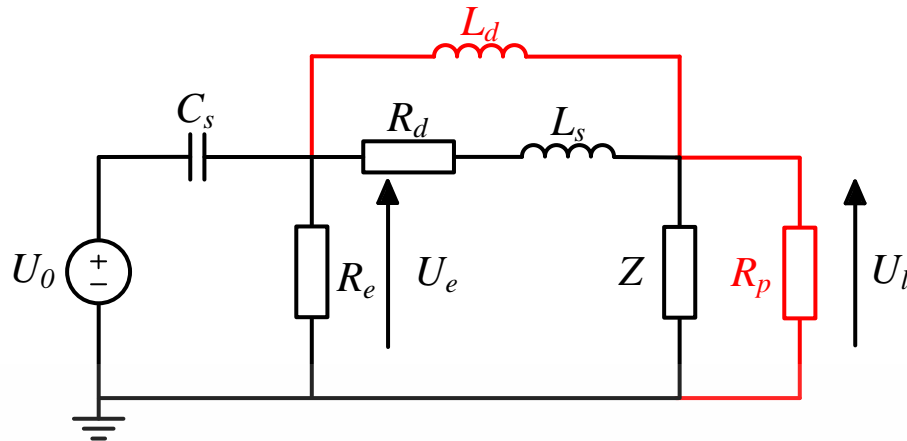
ในส่วนของการคำนวณวงจรที่ใช้ทดสอบยังเป็นวงจรเดิมกับกรณีที่ 1 ซึ่งมีค่าองค์ประกอบวงจรแฝงและองค์ประกอบโหลดดังตารางที่ 4.8 แต่เนื่องจากเวลาหลังคลื่น T_2 ที่สั้นกว่าปกติเนื่องจากโหลดมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ จึงได้ใช้วงจรแกลนิงเกอร์มา [22] เพื่อแก้ปัญหาในกรณีนี้

วงจรแกลนิงเกอร์มีหลักการโดยเพิ่มองค์ประกอบวงจรได้แก่ตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น L_d มาขนานกับองค์ประกอบตัวต้านทานหน้าคลื่น R_d และความเหนี่ยวนำแฝง L_s และเพิ่มตัวต้านทานขนานโหลด R_p ดังรูปที่ 4.18 L_d มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำต่อเวลาหลังคลื่นเนื่องจากเป็นช่วงความถี่ต่ำ ประจุที่ไหลกลับจากโหลดมาตัวต้านทานหลังคลื่น R_e จะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานหน้าคลื่น L_d ได้ดีขึ้น ทำให้เวลาหลังคลื่น T_2 เพิ่มมากขึ้น ส่วนตัวต้านทานขนานโหลด R_p ต่อเพื่อลดอัตราส่วนพุ่งเกินให้ลดลง โดยเลือกใช้ค่าเป็น 200 μH และ 800 Ω ตามลำดับ

นำองค์ประกอบวงจรแฝงและองค์ประกอบโหลดจากตารางที่ 4.8 และรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ กรณีที่ 3(1) ที่ปรับคุณภาพและกรองความถี่ตามหัวข้อที่ 3.5 มาแทนในสมการที่ 3.30 เพื่อคำนวณค่าองค์ประกอบโหลด Z จากนั้นขนานตัวต้านทานขนานโหลด R_p เข้ากับองค์ประกอบโหลด Z เพื่อให้ได้องค์ประกอบโหลด Z ค่าใหม่และต้องการลดอัตราส่วนพุ่งเกินที่จะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานหน้าคลื่น L_d เข้าสู่วงจรไฟฟ้า ในส่วนของการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานหน้าคลื่น L_d จะทำให้เกิดแรงดันขาออกเปลี่ยนไปจากเดิมสมการที่ 3.29 เป็นดังสมการที่ 4.1

$$U_i = \left[C_s R_e Z(s) U_0 (R_d + sL_d + sL_s) \right] / \left[R_d R_e + R_d Z(s) + L_d R_d s + L_d R_e s + L_s R_e s + L_d Z(s) s + L_s Z(s) s + L_d L_s s^2 + C_s R_d R_e Z(s) s + C_s L_d L_s R_e s^3 + C_s L_d R_d R_e s^2 + C_s L_d R_e Z(s) s^2 + C_s L_s R_e Z(s) s^2 \right] \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



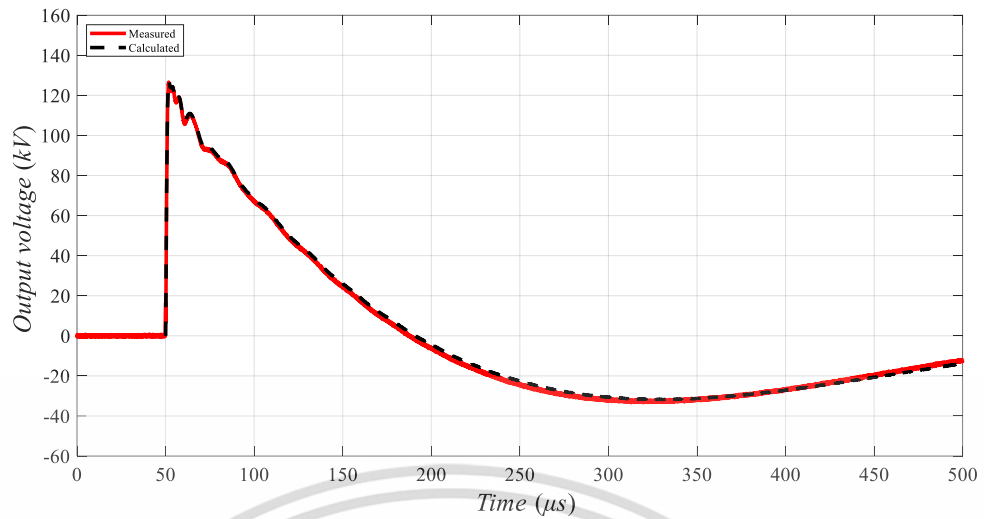
รูปที่ 4.18 วงจรแกแลนิงเกอร์

นอกจากนี้ยังเพิ่มความต้านทานหน้าคลื่น R_d ให้เป็น 500 Ω และเพิ่มความต้านทานหลังคลื่น R_e ให้มากขึ้นเป็น 90 Ω เพื่อต้องการให้เวลาหน้าคลื่น T_1 และเวลาหลังคลื่น T_2 เพิ่มขึ้นตามลำดับ

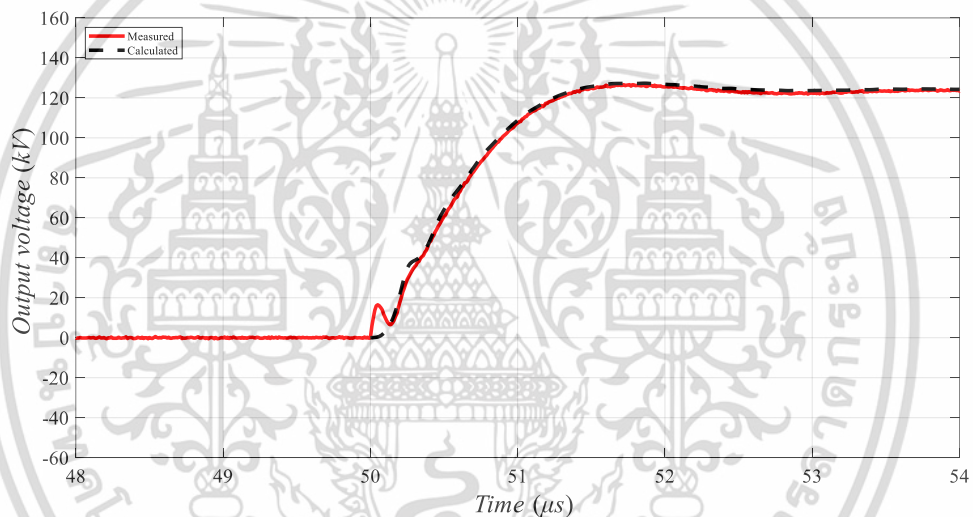
3(2) : การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง 115/24 kV 50 MVA YNyn0 ที่พิกัดแรงดันทดสอบ

เมื่อสามารถคำนวณรูปคลื่นว่าเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดในกรณีที่ 3(1) จึงทำการต่อตัวเหนี่ยวนำขนานกับตัวต้านทานหน้าคลื่น และขนานตัวต้านทานกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง อีกทั้งยังเปลี่ยนความต้านทานหน้าคลื่น R_d กับความต้านทานหลังคลื่น R_e ตามที่ได้คำนวณไว้ในกรณี 3(1) ทำการทดสอบที่พิกัดแรงดันทดสอบ V_p 125 kV ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

ในส่วนของการคำนวณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ นำค่าองค์ประกอบโหลด Z ใหม่หลังจากขนานตัวเก็บประจุในกรณีที่ 3(1) และความต้านทานหน้าคลื่น R_d 500 Ω กับความต้านทานหลังคลื่น R_e 90 Ω อีกทั้งแรงดันอัดประจุ U_0 เปลี่ยนค่าเป็น 125 kV แทนค่าในสมการที่ 4.1 เพื่อให้ได้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขาออก U_i ที่ตกคร่อมโหลด ใช้การแปลงฟูริเยร์ผกผันเพื่อให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอยู่ในวัฏจักรเวลาและเปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 4.19



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าจากการทดสอบกรณีที่ 3(2) (ก) ช่วงเวลายาว
(ข) ช่วงเวลาสั้น

พบว่ารูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณแบบจะทับซ้อนรูปคลื่นจากการทดสอบและมีค่า R-square 0.999 มีองค์ประกอบรูปคลื่นดังต่อไปนี้

เวลาหน้าคลื่น T_1 1.3202 μs

เวลาหลังคลื่น T_2 56.3391 μs

เปอร์เซ็นต์ส่วนพุ่งเกิน 2.2901 เปอร์เซ็นต์

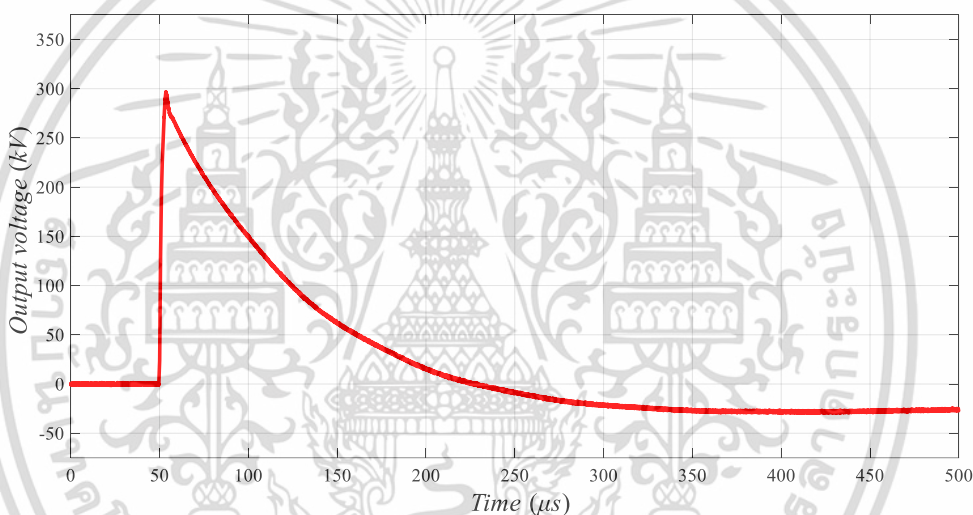
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 กรณีที่ 4 การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลังที่ขดลวดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

การทดสอบในกรณีที่ 4 แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ 4(1) และ 4(2)

4(1) : การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง 115/24 kV 50 MVA YNyn0 ที่ 66.67 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดแรงดันทดสอบด้านขดลวดแรงสูง

การทดสอบในกรณีที่ 4 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลังตัวเดิมกับกรณีที่ 2 แต่ทดสอบที่ขดลวดแรงสูงแทน ดังรูปที่ 4.20 โดยทำการทดสอบที่ 66.67 เปอร์เซ็นต์ของ 125 kV เพื่อเป็นการปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามที่มาตราฐานกำหนด แต่เนื่องจากเวลาหน้าคลื่น T_1 เวลาหลังคลื่น T_2 และ เปอร์เซ็นต์ส่วนพุ่งเกินของการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลังนี้มีค่าเป็น 3.5105 μ s 51.7718 μ s และ 5.6612 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตราฐานกำหนด ทำให้ต้องมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่น T_1 และเวลาหลังคลื่น T_2 ให้มากขึ้นในลำดับถัดไป



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 4(1)

ในส่วนของการคำนวณวงจรที่ใช้ทดสอบได้เปลี่ยนองค์ประกอบ ดังนั้นต้องทำการหาองค์ประกอบวงจรแฉงใหม่โดยการนำรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการในกรณีที่ 4(1) มาปรับคุณภาพรูปคลื่น ใช้การแปลงฟูริเยร์และกรองความถี่สูงทิ้ง เมื่อใช้การถดถอยจะได้ค่าองค์ประกอบแฉง ได้แก่ความเหนี่ยวนำแฉง L_s เท่ากับ 34.537 μ H ซึ่งจำเป็นในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบโหลด Z จากสมการที่ 3.20

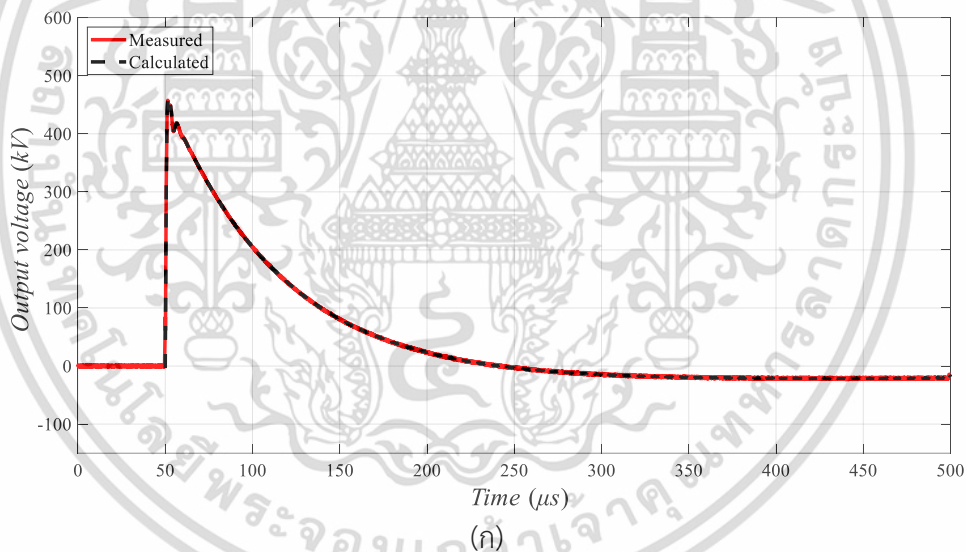
การแก้ปัญหาในกรณีนี้ใช้วงจรเกลนิงเกอร์เหมือนกรณีที่ 3(2) โดยนำค่าองค์ประกอบโหลด Z ขนานเข้ากับตัวเหนี่ยวนำขานตัวต้านทานหน้าคลื่น L_d ที่มีค่าเป็น 200 μ H เพื่อให้ได้ค่าองค์ประกอบโหลด Z ใหม่ นอกจากนี้ปรับค่าความต้านทานหน้าคลื่น R_d ลดลงเหลือ 80 Ω และปรับความต้านทานหลังคลื่น R_e เพิ่มเป็น 480 Ω เพื่อต้องการให้เวลาหน้าคลื่น T_1 ลดลงและเวลาหลังคลื่น T_2 เพิ่มขึ้น ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

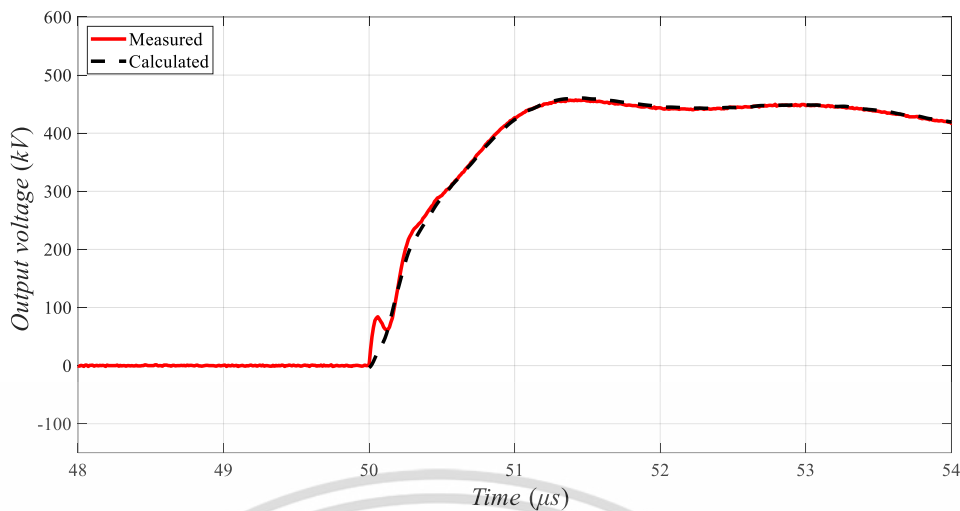
4(2) : การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง 115/24 kV 50 MVA YNyn0 ที่พิกัดแรงดันทดสอบด้านขดลวดแรงสูง

เมื่อสามารถคำนวณรูปคลื่นว่าเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดในกรณี 4(1) จึงทำการต่อตัวเหนี่ยวนำขนานกับตัวต้านทานหน้าคลื่น L_d และขนานตัวต้านทาน R_p กับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง อีกทั้งยังเปลี่ยนความต้านทานหน้าคลื่น R_d กับความต้านทานหลังคลื่น R_e ตามที่ได้คำนวณไว้ในกรณี 4(1) ทำการทดสอบที่พิกัดแรงดันทดสอบ 400 kV สำหรับโพลต์ 115 kV ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

ในส่วนของการคำนวณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ นำค่าองค์ประกอบโพลต์ Z ใหม่หลังจากขนานตัวเก็บประจุในกรณี 3(1) และความต้านทานหน้าคลื่น R_d 80 Ω กับความต้านทานหลังคลื่น R_e 480 Ω อีกทั้งแรงดันอัดประจุ U_0 เปลี่ยนค่าเป็น 400 kV แทนค่าในสมการที่ 4.1 เพื่อให้ได้แรงดันอิมพัลส์ขาออก U_l ที่ตกร่อมโพลต์ ใช้การแปลงฟูริเยร์ผกผันเพื่อให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอยู่ในวัฏจักรเวลาและเปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่ได้จากทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 4.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากการทดสอบกรณีที่ 4(2) (ก) ช่วงเวลายาว
(ข) ช่วงเวลาสั้น

พบว่ารูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณแบบจะทับซ้อนรูปคลื่นจากการทดสอบและมีค่า R-square 0.9999 มีองค์ประกอบรูปคลื่นดังต่อไปนี้
เวลาหน้าคลื่น T_1 1.2034 μ s
เวลาหลังคลื่น T_2 44.0436 μ s
เปอร์เซ็นต์ส่วนพุ่งเกิน 3.1665 เปอร์เซ็นต์

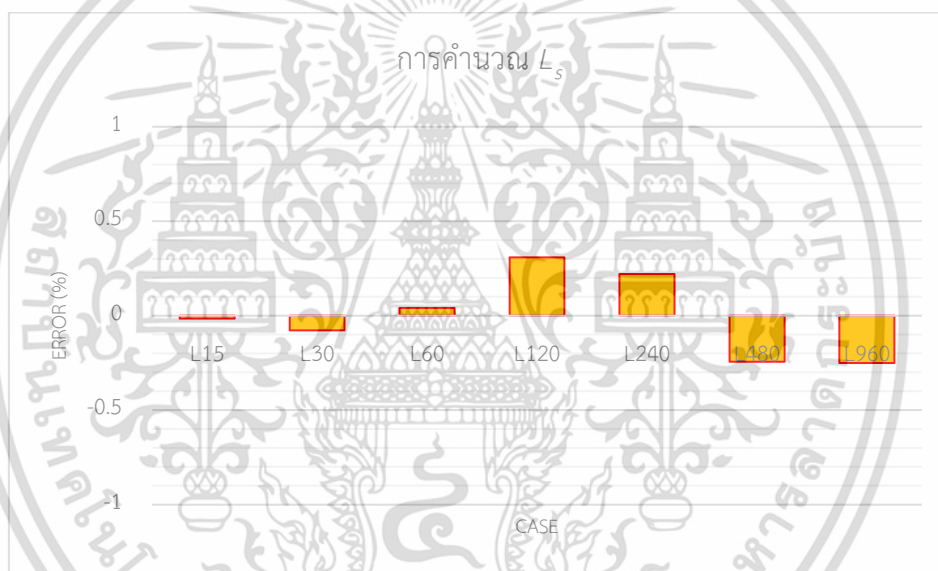
4.3 การประเมินผลการหาค่าองค์ประกอบแฉงและโหนดในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

จากผลลัพธ์องค์ประกอบวงจรไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อจำลองรูปคลื่นในหัวข้อ 4.1 ทดสอบด้วยการจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่ามีความผิดพลาดส่วนใหญ่มากกว่า 3 % และสามารถระบุค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.22 - 4.25

นอกจากนี้เปรียบเทียบผลลัพธ์รูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณกับรูปคลื่นจริงในทดสอบในห้องปฏิบัติการในหัวข้อ 4.2 ทดสอบด้วยการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีค่า R-square ไม่ต่ำกว่า 0.999 ซึ่งเป็นการเทียบได้ว่าการคำนวณด้วยโปรแกรมมีความคล้ายการทดสอบจริง ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.26

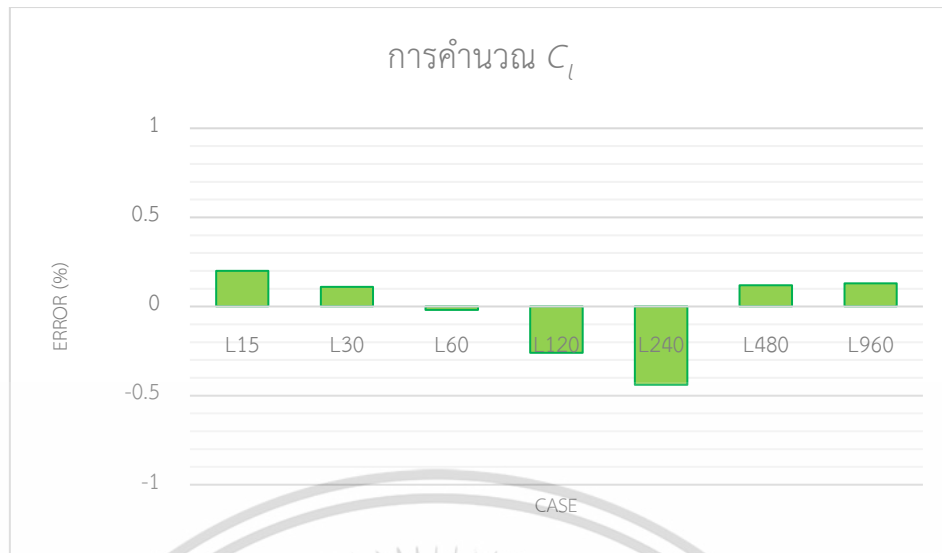
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณเทียบกับค่าที่ใช้จำลอง

กรณี	ความผิดพลาดจากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริง			
	L_s (%)	C_l (%)	R_l (%)	U_0 (%)
L_{15}	-0.0153	0.2000	-0.1332	-0.2070
L_{30}	-0.0777	0.1100	-0.1408	-0.2070
L_{60}	0.0413	-0.0200	-0.2107	-0.2057
L_{120}	0.3082	-0.2600	-0.5883	-0.1985
L_{240}	0.2205	-0.4400	1.0566	-0.2195
L_{480}	-0.2433	0.1200	6.8029	-0.3001
L_{960}	-0.2503	0.1300	-0.0425	-0.1082

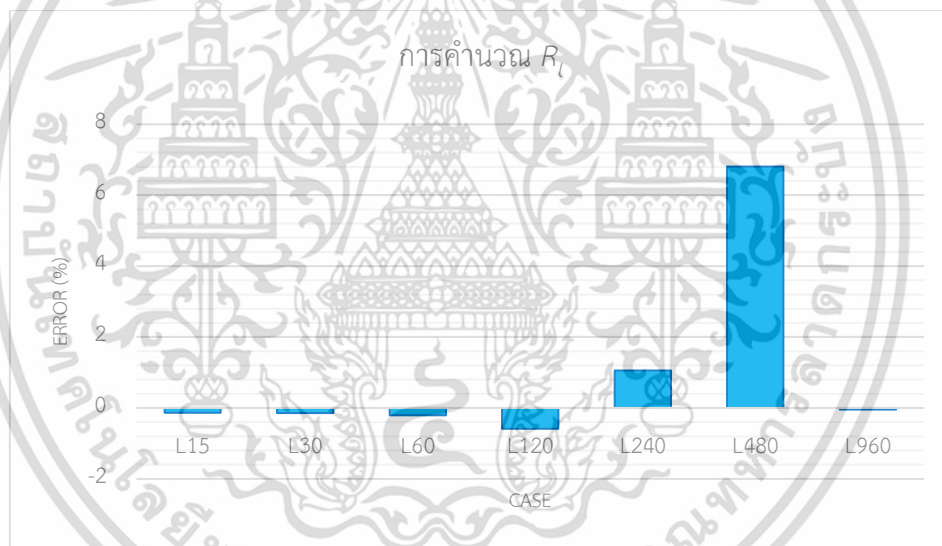


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความผิดพลาดความเหนี่ยวนำแฝง L_s จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้จำลองแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

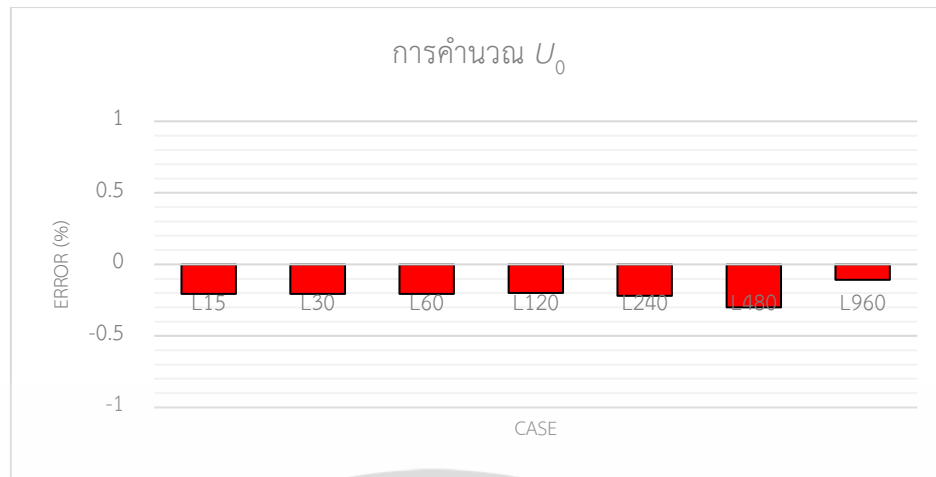


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความผิดพลาดความจุไฟฟ้าโหลด C_i จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้จำลองแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความผิดพลาดความต้านทานโหลด R_i จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้จำลองแรงดันอิมพัลส์

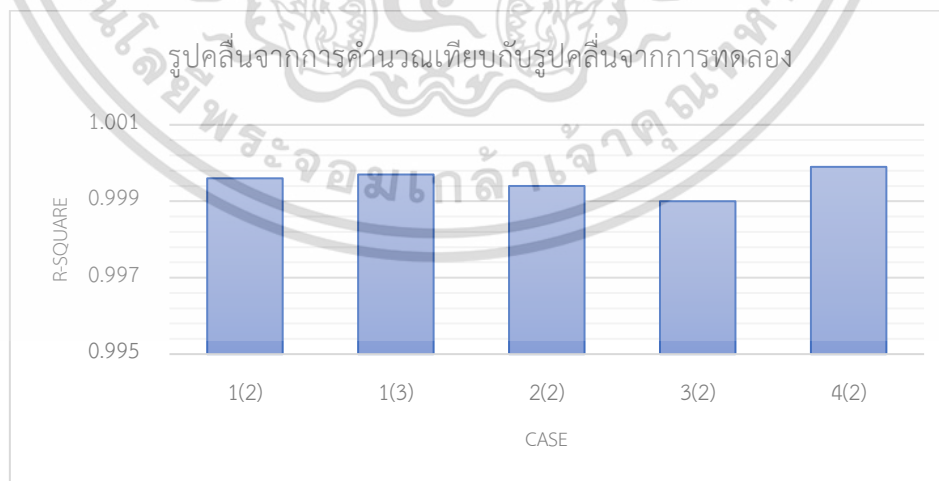
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความผิดพลาดแรงดันอัดประจุ U_0 จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้จำลองแรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า R-square เมื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นจากการคำนวณกับรูปคลื่นจากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

กรณี	R-square
1(2)	0.9996
1(3)	0.9997
2(2)	0.9994
3(2)	0.9990
4(2)	0.9999



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่า R-square เมื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นจากการคำนวณกับรูปคลื่นจากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการหาองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฉงและองค์ประกอบโพลต์ในวัฏจักรความถี่ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการกำหนดองค์ประกอบรูปคลื่นได้แก่เวลาหน้าคลื่น T_1 เวลาหลังคลื่น T_2 และอัตราส่วนพุ่งเกินในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าให้เป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC 60060-1 (2010) ด้วยการทดสอบที่ใช้จำนวนครั้งน้อยที่สุดและลดขั้นตอนการลองผิดลองถูกที่อาจส่งผลให้ฉนวนในอุปกรณ์ทดสอบเสียหายได้

วิธีการหลักที่ใช้ในวิทยานิพนธ์สำหรับการหาองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าได้แก่ การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเบื้องต้นแบบไม่ต่อโพลต์ เพื่อนำรูปคลื่นที่ได้มาหาองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฉง โดยมีการปรับคุณภาพรูปคลื่น จากนั้นแปลงรูปคลื่นให้อยู่ในวัฏจักรความถี่โดยใช้การแปลงฟูริเยร์ แล้วใช้การถดถอยเพื่อหาองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฉงดังบทที่ 3 จากนั้นทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบต่อโพลต์ทำขั้นตอนเดิมและนำองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฉงเพื่อหาองค์ประกอบโพลต์ เมื่อได้ทั้งองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฉงและองค์ประกอบโพลต์จะสามารถประเมินค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสมได้ โดยใช้การปรับค่าความต้านทานหน้าคลื่น R_d และค่าความต้านทานหลังคลื่น R_c ในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าพื้นฐาน นอกจากนี้อาจมีการต่อองค์ประกอบวงจรเพิ่มเติมในรูปแบบวงจรแกรนิงเจอร์ เพื่อให้องค์ประกอบรูปคลื่นเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน

โดยเมื่อทดสอบด้วยการจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทดสอบด้วยการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาวิเคราะห์ตามหลักการอย่างละเอียดในบทที่ 3 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามสมมุติฐานคือมีความผิดพลาดไม่เกิน 3 % และสามารถนำองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าที่หาได้ไปใช้ในการประเมินเวลาหน้าคลื่นและเวลาหลังคลื่นได้ตามทฤษฎีที่กำหนดไว้

สามารถสรุปได้ว่าวิธีการหาองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฉงและองค์ประกอบโพลต์ในวัฏจักรความถี่มีความแม่นยำมากพอ สามารถนำไปใช้งานในการทดสอบได้จริง และอาจนำไปเป็นตัวช่วยในการเรียนรู้ในวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (High voltage engineering) ในเรื่องการทดสอบและวิเคราะห์แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ขั้นตอนการหาส่วนโค้งของส่วนหน้ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอาจเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ เมื่อเจออัตราส่วนพุ่งเกินที่เยอะมากๆ ทำให้ช่วงข้อมูลที่นำมาหาส่วนโค้งกว้างขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการกราฟที่เหมาะสมที่มีความแม่นยำยิ่งขึ้นในอนาคต เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้

2) เมื่อทำการทดสอบแบบต่อโหลดที่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดแรงดันทดสอบเพื่อหาองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฝงและองค์ประกอบโหลด ในขั้นตอนนี้จะทราบค่าเวลาหน้าคลื่น เวลาหลังคลื่น และอัตราส่วนพุ่งเกิน ซึ่งเมื่อต้องการแก้ไขให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอาจต้องมีการต่อองค์ประกอบวงจรเพิ่มเติม นอกจากปรับความต้านทานหน้าคลื่น R_d และความต้านทานหลังคลื่น R_e ซึ่งยังคงต้องใช้ประสบการณ์ของผู้ทดสอบและอาจทำให้เกิดปัญหาต่อผู้ขาดประสบการณ์ในการทดสอบ งานวิจัยในอนาคตควรจะพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเลือกวงจรและค่าองค์ประกอบทางวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสมแบบอัตโนมัติ จะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็นอย่างมาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Standard Publ. No. 60060-1, **High-Voltage Test Techniques – Part 1: General Definitions and Test Requirements**, 2010.
- [2] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel. “Generation of high voltages” in **High Voltage Engineering: Fundamentals**, 2nd ed. Oxford, UK: Newnes, 2000, pp. 8–74.
- [3] R. M. Del Vecchio, R. Ahuja and R. D. Frenette. “Determining ideal impulse generator settings from a generator-transformer circuit model” in **IEEE Trans. Power Deliv.**, vol. 17, no. 1, Jan 2002. pp. 142-148.
- [4] S. Okabe, M. Koto, G. Ueta, T. Saida and S. Yamada. “Development of high frequency circuit model for oil-immersed power transformers and its application for lightning surge analysis” in **IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.**, vol. 18, no. 2, Apr 2011. pp. 541-552.
- [5] H. R. Mirzaei. “A Simple Fast and Accurate Simulation Method for Power Transformer Lightning Impulse Test” in **IEEE Trans. Power Deliv.**, vol. 34, no. 3, June 2019. pp. 1151-1160.
- [6] สำรวย สังข์สะอาด. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [7] J. G. Proakis, D. G. Manolakis. “Frequency analysis of signals and systems” in **Digital Signal Processing Principles, Algorithms, and Applications**, 3rd ed. New Jersey, NJ, USA: Prentice-Hall, 1996. pp. 230–294.
- [8] พีรวิทย์ ยุทธโกวิท. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2561.
- [9] H. R. Mirzaei, F. Bayat and K. Miralikhani. “A semi-analytic approach for determining Marx generator optimum setup during power transformers factory test” in **IEEE Trans. Power Deliv.**, vol. 36, no. 1, Feb. 2021. pp. 10–18.
- [10] S. Okabe, T. Tsuboi and J. Takami. “Basic study of possible waveforms generated in lightning impulse withstand voltage test on UHV equipment” in **IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.**, vol. 16, no. 4, Aug. 2009. pp. 1127–1133.
- [11] M. Hinow, W. Hauschild and E. Gockenbach. “Lightning impulse voltage and overshoot evaluation proposed in drafts of IEC 60060–1 and future UHV testing” in **IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.**, vol. 17, no. 5, Oct. 2010. pp. 1628–1634.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] B. Filipović-Grčić, D. Filipović-Grčić and P. Gabrić. “Estimation of load capacitance and stray inductance in lightning impulse voltage test circuits” **Electr. Power Syst. Res.**, Volume 119, 2015.
- [13] P. Tuethong, P. Yutthagowith, and A. Kunakorn. “Effective simulation approach for lightning impulse voltage tests of reactor and transformer windings” **Energies**, vol. 13, no. 20, Oct. 2020.
- [14] P. Tuethong, K. Kitwattana, P. Yutthagowith, and A. Kunakorn. “An algorithm for circuit parameter identification in lightning impulse voltage generation for low-inductance loads” **Energies**, vol. 13, no. 15, Jul. 2020.
- [15] P. Yutthagowith, P. Kitcharoen, and A. Kunakorn. “Systematic design and circuit analysis of lightning impulse voltage generation on low-inductance loads” **Energies**, vol. 14, no. 23, Nov. 2021.
- [16] B. Vahidi and J. Beiza. “Using PSpice in teaching impulse voltage testing of power transformers to senior undergraduate students” in **IEEE Trans. Educ.**, vol. 48, no. 2, May 2005. pp. 307–312.
- [17] A. Zielesny. “Machine learning” in **From Curve Fitting to Machine Learning**, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011, pp. 234–235.
- [18] ภรชัย ภววงษ์ศักดิ์. **การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล**. 1999.
- [19] John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis. **DIGITAL SIGNAL PROCESSING Principles, Algorithms, and Applications**. 3rd ED. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1994.
- [20] M. ŞEKER. “Parameter estimation of positive lightning impulse using curve fitting-based optimization techniques and least squares algorithm” **Electr. Power Syst. Res.**, vol. 205, 2022.
- [21] ไกรศักดิ์ เกษร. **วิทยาศาสตร์ข้อมูล (Data Science)**. ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2564
- [22] C. Dechthummarong, S. Thepa, D. Chenvidhya, C. Jivacate, K. Kirtikara and J. Thongpron. “Lightning impulse test of field-aged PV modules and simulation partial discharge within MATLAB” **2012 9th International Conference on Electrical Engineering /Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology**, 2012.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

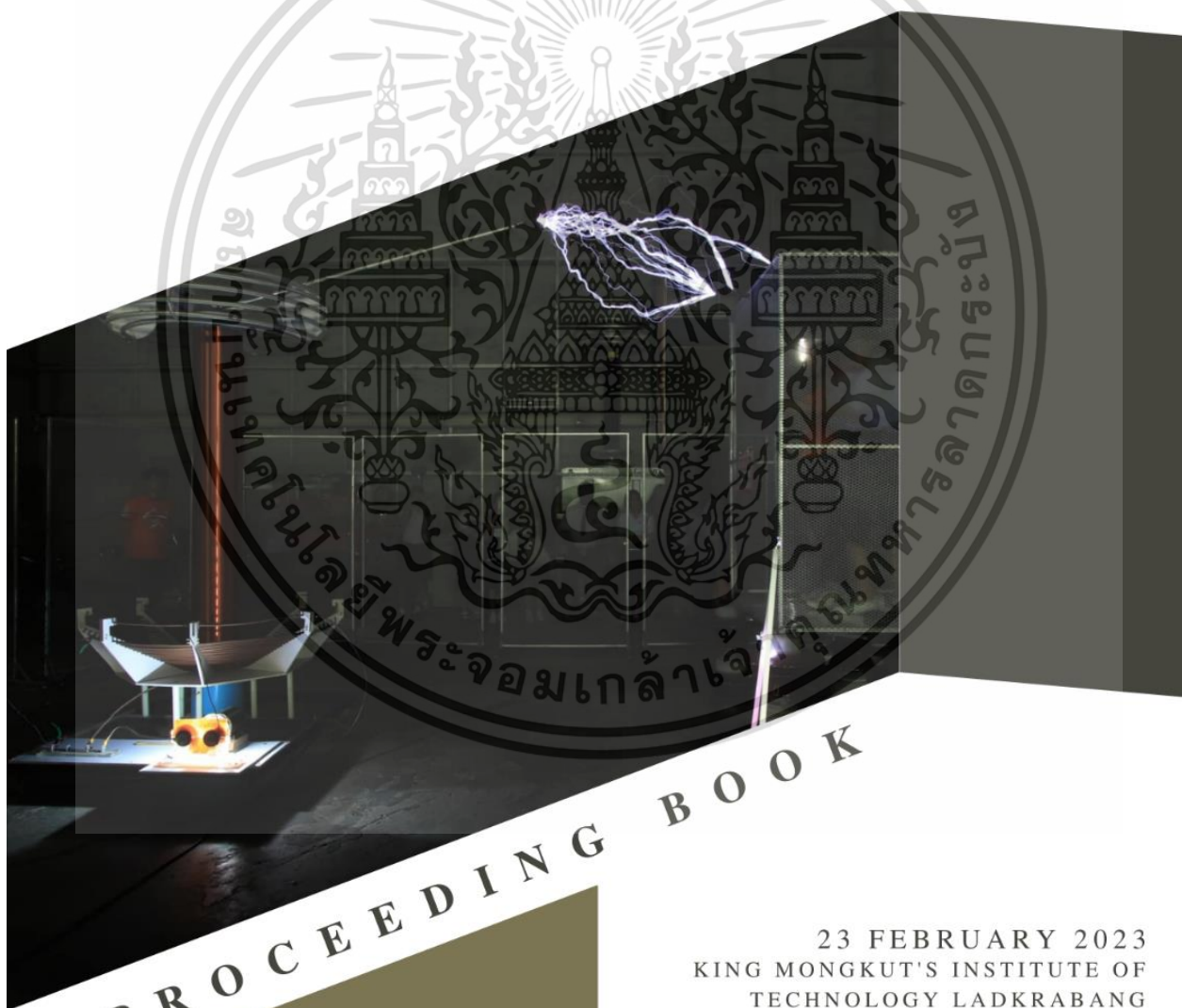
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ISLH 2023

THE 7TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON
LIGHTNING PROTECTION AND HIGH VOLTAGE ENGINEERING



23 FEBRUARY 2023
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF
TECHNOLOGY LADKRABANG
BANGKOK, THAILAND



GLOBAL
ENGINEER

HV E L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effective Method for Determination of Stray and Load Circuit Parameters in Lightning Impulse Voltage Generation

P. Termtachatipongsa and P. Yutthagowith

School of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalongsung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand

Abstract: To generate a lightning impulse voltage with waveform parameters (front time and time to half) within the specified range of IEC60060-1, the circuit components of a lightning impulse voltage generator necessary to be precisely determined. In practice, some parameters including stray and load circuit parameters are frequently unknown. These parameters sometimes greatly influence the generated waveform. Using these inaccurate parameters, the generation of the test waveform according to the standard requirement is difficult in practice. Also, the measurement of these parameters is quite complicated and time-consuming.

This paper presents a frequency domain method for determining the stray and load circuit parameters based on curve fitting approaches. To determine the circuit parameters of the lightning impulse voltage generator, the generated lightning impulse voltage waveforms are measured and recorded by a digital oscilloscope. Using the Fourier transform, signals are converted from the time domain to the frequency domain. In the first step, multiple linear regression is utilized to determine the stray inductance, load resistance, load capacitance, and charging voltage from the recorded waveform collected from a case without a test object. Then, the stray inductance from the no-load case is used in the test case with a test object for the determination of the load impedance, which is the all-inclusive value of stray impedance, the measuring system, and load from the test object. Using the determined stray and load circuit parameters, the generation circuit components can be adjusted to obtain the waveforms according to the standard requirement. For the verification of the proposed method, some simulations and experiments were performed and compared. From the simulation results of the determination of the stray and load circuit parameters, the proposed method is fairly accurate, and the deviations are within 3%. Also, the simulation results agree well with the experimental ones.

Keywords: Fourier transform, Lightning impulse voltage waveforms, Load circuit parameters, Load impedance, Multiple linear regression, Stray impedances

1. Introduction

Lightning is a common phenomenon in nature that can have several detrimental effects, such as damage to property, the demise of living beings, and the disruption of electrical networks. Therefore, high-voltage (HV) testing is necessary to demonstrate that HV equipment can withstand overvoltage caused by lightning and switching surges. For simulations of the overvoltage occurring on the HV equipment, HV tests are typically performed in the laboratory according to the standard guidelines [1].

For lightning impulse voltage withstands tests, the test circuit [2] utilized to generate test voltage consists of resistors and capacitors generating a lightning impulse voltage waveform, as shown in Fig. 1. The waveform parameters must be within the range of the standard requirements [1]. For instance, the front time (T_1) is 1.2 μ s with a tolerance within 30%, the time to half (T_2) is 50 μ s with a tolerance within 20%, and the overshoot rate is up to 10%.

However, in practice, stray impedance, i.e. parasitic inductance and stray capacitance affects the test waveform [3-10]. This stray impedance causes oscillation and overshooting around the peak voltage waveform. Also, the load is so complicated that it cannot be represented by a simple circuit load capacitor (C_l) connected in parallel with a load resistor (R_l). For these reasons, the test waveform parameters are difficult to be controlled without trial and error approaches in real experiments, and experienced test engineers are required in the lightning impulse voltage tests.

For better understanding, it should be considered the equivalent circuit of the impulse voltage generator as shown in Fig. 2. The following principle is the process of impulse voltage generation [11]. The charging capacitor (C_s) is charged until reaching the required voltage. The front and tail resistors (R_d and R_e) are utilized to control T_1 and T_2 , respectively. L_s is an equivalent parasitic inductor in the circuit and its connecting leads. C_l represents the total equivalent capacitor including the test object and the generation and measuring systems. R_l denoting the equivalent parallel resistors represents the loss in the generation and measuring systems.

In practice, however, adjustments of T_1 and T_2 within the standard range are performed by changing the R_d and R_e using a trial and error approach. It may take several

times, and it causes damage to the test object. Many researchers have attempted to deal with this problem by determining all the parameters in the impulse voltage circuit. For example, L. Pelikan [12] using the simulation of a real impulse generator modeled in LTspice, and R. M. Del Vecchio [13] developed a model of an impulse voltage generation circuit including transformers represented as test objects.

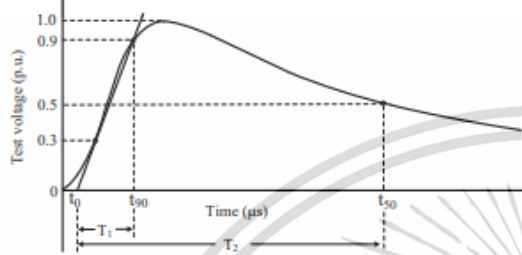


Fig. 1. The lightning impulse voltage waveform.

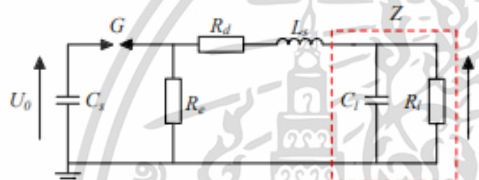


Fig. 2. The equivalent circuit of the impulse voltage generator

However, the approach described above still requires stray and load impedance as input data, and some impulse voltage circuit parameters need to be known in the experiment for adjustment of the waveform parameters as the standard requirement. In practice, the precise determination of L_s , C_l , R_l , and U_0 is a time-consuming and complicated process.

In this paper, an effective frequency-domain approach based on linear curve fitting, polynomial curve fitting, and optimization techniques [14,15] is applied for the estimation of the circuit parameters of an impulse voltage circuit. In the preliminary experiment, the generation circuit included a measuring system but no test object was utilized to generate the impulse waveform for estimation of the parasitic impedance, i.e. parasitic inductance, equivalent load capacitance, and resistance. From the estimated parasitic impedance, the experiment with the same circuit parameters and a test object was performed for the determination of the load impedance in the frequency domain. The estimated test object model was validated by the experiment using the adjusted generation circuit parameters of which generated impulse waveform parameters are in the ranges of the standard requirements.

This paper is separated into five parts. The realistic equivalent circuit and its principle are described in part 2. Then the method for determining the circuit parameters of the lightning voltage impulse test in the frequency domain is described in part 3. Next, the results proved the circuit parameters and compared the errors in both the simulation case and the experimental case. The last part is a summary of this paper.

2. Equivalent circuit of lightning impulse voltage generation

This paper presents a frequency domain approach for determining L_s , C_l , R_l , U_0 , and Z .

In an ideal case, the circuit has no inductance, and the capacitance at the load is just pure load capacitance. In practice, however, there are more complex than that. Because of the presence of connecting leads in the circuit or even the inductance at the impulse generator, the inductance in the circuit is represented by the parameter L_s . The presence of a simple test object and parallel capacitors, such as a voltage divider and stray capacitance will cause more capacitance in the circuit to be represented by the parameter C_l . Furthermore, the resistance is sometimes paralleled to the load indicated by the parameter R_l . In addition, if the load is so complex that it cannot be given in terms of C_l and R_l , or if there is no need to know the separate parameters, it can be considered as a Z term. Because of this, the actual situation is more complex and challenging to calculate. However, the estimated L_s , C_l , and Z can only determine the sum of the parameters but cannot determine the value of the inductance or capacitance of the individual components. In practice, as seen in Fig. 2, an equivalence circuit can be employed for estimating. Even though the values of the complete circuit were consolidated into a few parameters, the findings were accurate and straightforward.

To simplify the analysis, the Laplace transform [16] is employed to convert the circuit in Fig. 2 to Fig. 3.

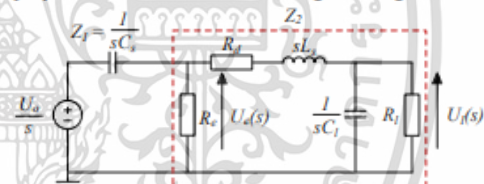


Fig. 3. Laplace transform of the impulse voltage generator

Then we can see that (1) can be used to express $U_e(s)$

$$U_e(s) = \frac{U_0}{s} \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_1} \right). \quad (1)$$

Where U_0 is the input voltage, Z_1 and Z_2 are load impedance as shown in (2) and (3)

$$Z_1 = \frac{1}{sC_s}, \quad (2)$$

$$Z_2 = \frac{R_e \left(\frac{R_l}{sC_l R_l + 1} + R_d + sL_s \right)}{R_e + \frac{R_l}{sC_l R_l + 1} + R_d + sL_s}. \quad (3)$$

The output voltage (U_l) can be expressed in (4)

$$U_l(s) = \frac{C_s R_l R_e U_0}{(\alpha_1)s^3 + (\alpha_2)s^2 + (\alpha_3)s + (\alpha_4)} \quad (4)$$

where $\alpha_1 = C_s C_l L_s R_l R_e$
 $\alpha_2 = C_l L_s R_l + C_s L_s R_e + C_l L_s R_l + C_s C_l R_l R_d R_e$
 $\alpha_3 = L_s + C_s R_l R_e + C_l R_l R_d + C_l R_l R_e + C_s R_d R_e$
 $\alpha_4 = R_l + R_d + R_e$.

3. Determination of stray and load circuit parameters

In practice, the only known circuit components of the impulse generator are R_d , R_e , and C_s . Other circuit components are difficult to measure and complex, such as C_l , R_l , U_0 , L_s from every electrical partway, or even the complicated load. Some values might be estimated from the crucial parameters provided by the manufacturer as expressed on the nameplate or in the test report. However, such parameters are sometimes improper for lightning impulse voltage tests due to the wide frequency range and transient conditions.

The proposed approach is utilized for determining L_s , C_l , R_l , U_0 , and Z from the impulse voltage waveform from a preliminary test. Every parameter in the impulse voltage circuit will be known. After that, all known parameters may be utilized to determine what R_d and R_e should be for the impulse voltage waveform to be in the standard range [1].

The procedure for finding L_s , C_l , U_0 , and Z is explained as follows.

In the beginning, R_d and R_e are estimated from the initial impulse voltage generating and record the waveform of the impulse voltage as shown in Fig. 4.

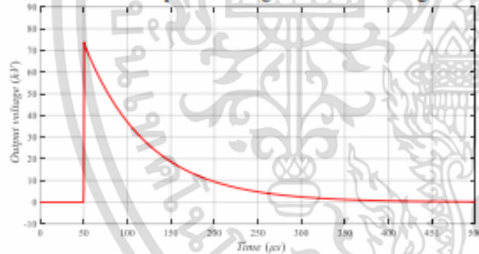


Fig. 4. The recorded impulse voltage waveform

After that, the portion of the wavefront part below 20% of the peak voltage was removed [19], because the impulse voltage waveform frequently has an undesired interference in a form of spike voltage at the front part [17]. After that, the removed waveform part is replaced by a waveform part which is extrapolated by (5) using the data from 20% to 30% of the peak.

$$y = a(x - b)^c \tag{5}$$

Also, the waveform on the tail part is extrapolated until it approaches zero, as shown in Fig. 5. Waveform extrapolation is performed until it reaches a final value of 0.01% of the peak value due to the anti-aliasing resulting from the Fourier transform and its inversion. As a result, the calculation of stray and load parameters is more precise. The function in (6) is utilized for extrapolation of

the data from 50% of peak voltage to the end of the recorded data. Fig. 5 presents the extrapolated results in comparison with the originally recorded waveform.

$$y = ae^{-bx} \cos(cx + d) \tag{6}$$

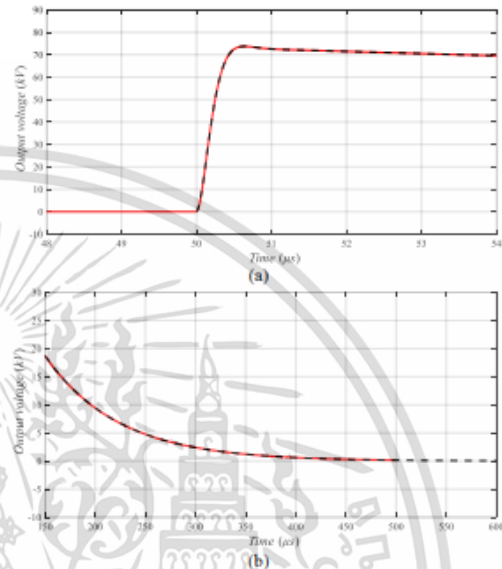


Fig. 5. (a) Removing and fitting below the 20% of the peak in the wavefront and (b) extrapolating until it approaches zero

Next, after preparing the data for ease of analysis, the Fourier transform [16] is used for analyzing the waveform in the frequency domain, as shown in Fig. 6. However, in the frequency domain, higher frequencies tend to be scattered by noise signals. As a result, the data over 250 kHz were eliminated, and only the data below 250 kHz was used for the determination of the stray and load parameters, as shown in Fig. 7.

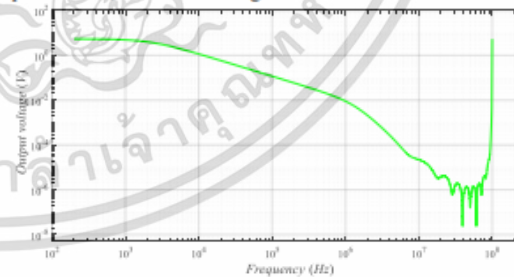


Fig. 6. Applying the Fourier transform to the impulse voltage waveform.

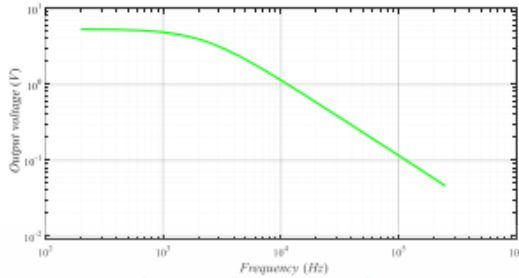


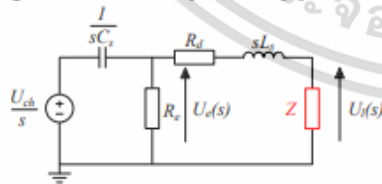
Fig. 7. Keep the data below 250kHz.

After that, the waveform in the frequency range below 250 kHz is used for the estimation of the coefficients in (7) and (8) by linear regression. Eqs (7) and (8) are derived from (4) with the separation of real and imaginary parts. From the estimated parameters in (7) and (8) L_s , C_s , R_s , and U_0 can be simply solved.

$$\text{Re} \left(\frac{1}{U_i(s)} \right) = \frac{L_s C_s}{U_0} \left(\frac{R_d}{L_s C_s R_s R_i} + \frac{1}{L_s C_s R_s} + \frac{1}{L_s C_s R_i} \right) - \frac{L_s C_s}{U_0} \left(\frac{R_d}{L_s} + \frac{1}{R C_s} + \frac{1}{R_s C_s} \right) \omega^2 \quad (7)$$

$$\text{Im} \left(\frac{1}{U_i(s)} \right) = \frac{L_s C_s}{U_0} \left(\frac{R_s}{L_s C_s R_i} + \frac{1}{L C_s} + \frac{R_s}{L C_s R_s} + \frac{1}{R_s C_s} + \frac{1}{L C_s} \right) \omega - \frac{L_s C_s}{U_0} \omega^3 \quad (8)$$

Lastly, after all the parameters in the lightning impulse voltage circuit are determined, the load combined with C_s and R_i or complicated load in terms of Z can be calculated using (9) as shown in Fig. 8. Furthermore, if inductors, resistors, or capacitors are paralleled or series with the load, the value parameter can be paralleled or series with Z . Then, by substituting Z in (10), we get U_i in the frequency domain. A time-domain impulse waveform can be obtained by applying the inverse Fourier transform to U_i . Equation (10)'s R_d and R_s parameters can be adjusted with the help of the circuit simulation until the lightning impulse waveform parameters are within the range according to the standard requirement [1].

Fig. 8. The load combined with C_s and R_i in terms of Z .

$$Z(s) = \frac{\left(\frac{R_s}{R_s C_s s + 1} + R_d + sL_s \right) U_i(s)}{\left(\frac{R_s}{R_s C_s s + 1} \right) C_s U_0 - U_i(s)} \quad (9)$$

$$U_i(s) = \frac{\left(\frac{R_s}{R_s C_s s + 1} \right) Z(s) C_s U_0}{\left(\frac{R_s}{R_s C_s s + 1} \right) + (R_d + sL_s) + Z(s)} \quad (10)$$

This approach allows the next impulse voltage generating to determine R_d and R_s using circuit simulation without trial-and-error experiment and it also reduces the unintentional damage due to the trial-and-error approach.

4. Verification of the proposed method

The verification of the proposed method is separated into two parts, i.e., 1) verification with simulations and 2) verification of the actual waveforms from the experiment.

4.1 Verification with simulations

In the first part, the proposed method was verified using the simulated waveforms with the known circuit parameters. In this proof, every parameter is known. The parameters are $R_d = 200 \Omega$, $C_s = 0.25 \mu\text{F}$, $R_s = 300 \Omega$, $C_i = 1 \text{ nF}$, $R_i = 10 \text{ k}\Omega$, and L_s from $15 \mu\text{H}$ to $960 \mu\text{H}$. Increasing L_s increases the percentage overshoot of the impulse voltage waveform [18]. As a result, the L_s has been raised until the overshoot rate reaching to 30% in this simulation. With the known R_d , R_s , and C_s , the proposed method was utilized to determine L_s , R_i , and C_i as the results are expressed in TABLE I-IV.

TABLE I
DETERMINED L_s IN COMPARISON WITH THE KNOWN VALUES

Case	Calculated L_s (μH)	Exact L_s (μH)	Tolerance (%)
L15	14.9977	15.0000	-0.0153
L30	29.9767	30.0000	-0.0777
L60	60.0248	60.0000	0.0413
L120	120.3698	120.0000	0.3082
L240	240.5293	240.0000	0.2205
L480	478.8322	480.0000	-0.2433
L960	957.5970	960.0000	-0.2503

TABLE II
COMPARING C_i OF THE CALCULATED RESULT TO THE SIMULATION

Case	Calculated C_i (nF)	Exact C_i (nF)	Tolerance (%)
L15	1.0020	1.0000	0.2000
L30	1.0011	1.0000	0.1100
L60	0.9998	1.0000	-0.0200
L120	0.9974	1.0000	-0.2600
L240	0.9956	1.0000	-0.4400
L480	1.0012	1.0000	0.1200
L960	1.0013	1.0000	0.1300

TABLE III
DETERMINED R_i IN COMPARISON WITH THE KNOWN VALUES

Case	Calculated R_i (Ω)	Exact R_i (Ω)	Tolerance (%)
L15	9986.6819	10000	-0.1332
L30	9985.9232	10000	-0.1408
L60	9978.9309	10000	-0.2107
L120	9941.1705	10000	-0.5883
L240	10105.6617	10000	1.0566
L480	10680.2918	10000	6.8029
L960	9995.7490	10000	-0.0425

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE IV
DETERMINED U_0 IN COMPARISON WITH THE KNOWN VALUES

Case	Calculated U_0 (V)	Exact U_0 (V)	Tolerance (%)
L15	74844.7483	75000.0000	-0.2070
L30	74844.7819	75000.0000	-0.2070
L60	74845.7060	75000.0000	-0.2057
L120	74851.0879	75000.0000	-0.1985
L240	74835.3654	75000.0000	-0.2195
L480	74774.8971	75000.0000	-0.3001
L960	74918.8269	75000.0000	-0.1082

The data provided in the TABLE above reveal that the determined L_s , C_s and U_0 values are very modest with a deviation of less than 3%. Only the determined R_l is quite inaccurate, but this is acceptable because R_l has very little effect on the impulse voltage waveform. As a result, when transferring the inverse Fourier transform back to the time domain, as illustrated in Fig. 9, it was discovered that the results of the calculation using the proposed method almost totally agree with the waveform from the simulation.

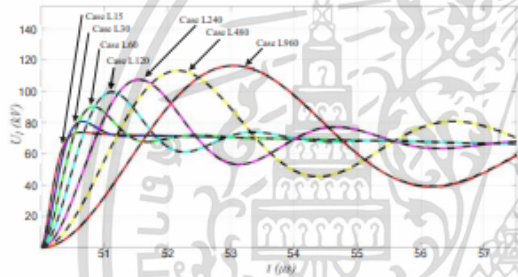


Fig. 9. Comparison of the impulse voltage waveform from simulation and calculated from the determined L_s , C_s , R_l , and U_0 .

4.2 Verification of the actual waveforms from the experiment

In this section, the proposed method was validated using the 3 cases of experimental data with the circuit parameters as shown in TABLE V.

TABLE V
THE 3 CASES OF THE EXPERIMENTAL DATA

Case	C_s (µF)	R_d (Ω)	R_e (Ω)	L_d (mH)	R_p (Ω)	V_p (kV)	Load
1(1)	1.33	180	60	-	-	75	No load
1(2)	1.33	180	60	-	-	75	*
1(3)	1.33	220	60	-	-	125	*
2(1)	1.33	180	60	-	-	75	**
2(2)	1.33	80	90	-	-	125	**
3(1)	1.33	180	60	-	-	75	***
3(2)	1.33	500	90	0.2	600	125	***

*24 kV 250 kVA DY11
**24 kV 5 MVA DY11
***115/24 kV (24kV) 50 MVA
 L_d is an inductance across the R_d and L_s .
 R_p is a resistance parallel to load.

In case 1(1), experiment by generating the lightning impulse voltage waveform without any load as shown in Fig. 10. There are just three parameters that are known: $C_s = 1.33$ µF, $R_d = 180$ Ω, and, $R_e = 60$ Ω. The results of calculating unknown parameters using the proposed

methods are presented in TABLE VI. So, all parameters are known.

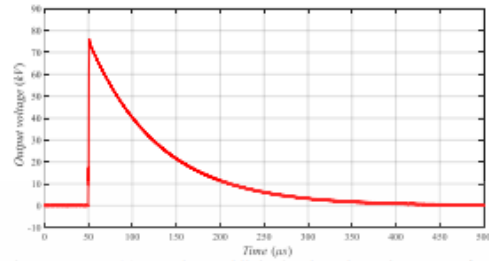


Fig. 10. Case 1(1) experimental lightning impulse voltage waveform

TABLE VI
THE CALCULATED L_s , C_s , R_l , AND U_0 VALUE

Parameters	Value
L_s calculated (µH)	29.9480
C_s calculated (nF)	2.1069
R_l calculated (Ω)	9961.7924
U_0 calculated (V)	76619.8701

Then, in case 1(2) connected a 24 kV 250 kVA DY11 distribution transformer as a load with the measured parameters $R = 10000$ Ω, $L = 310$ mH, and $C = 0.3$ nF.

However, the standard [1] determined that the transformer's voltage rated for equipment at 24 kV must undergo testing at the rated lightning impulse withstand at 125 kV. Additionally, the first R_d , R_e adjustment test is performed under 70% of the test voltage. Therefore, the load parameter is parallel to Z in (9) and substituted in (10) to obtain U_l . After obtaining U_l in the frequency domain, an inverse Fourier transform is performed to become the time domain. The calculated time-domain lightning impulse voltage waveform is compared with the experimental lightning impulse voltage waveform in case 1(2), as shown in Fig. 11. There is a 0.9996 R-square error in it.

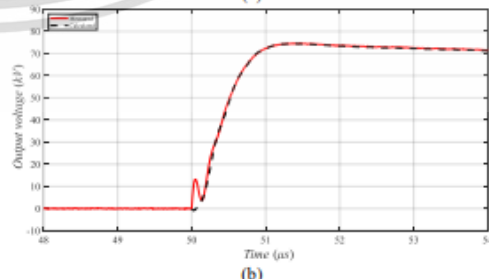
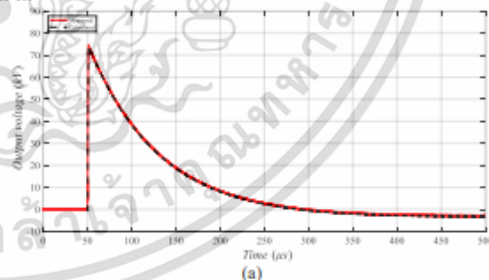


Fig. 11. Calculated waveform compared to case 1(2) experimental lightning impulse voltage waveform (a) full wave (b) wavefront

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

However, in case 1(2) the computed T_1 was $0.8615 \mu s$, which was inadequate, thus R_d was adjusted to 220 to adjust the wavefront to a higher value and tested at 125 kV voltage as required by the standard. When comparing the lightning impulse voltage waveform calculated by the proposed method with case 1(3), the R-square value is 0.9997 as shown in Fig. 12.

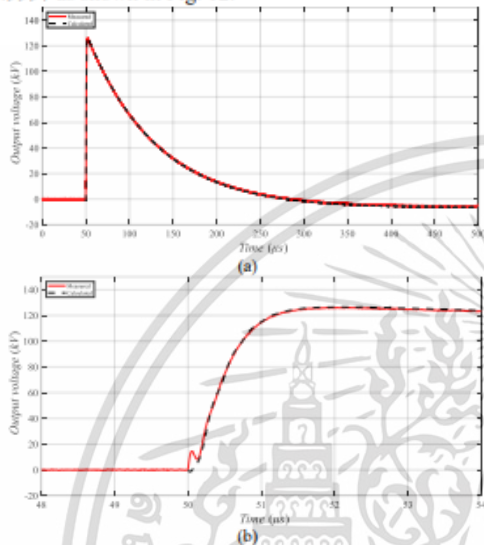


Fig. 12. Calculated waveform compared to case 1(3) experimental lightning impulse voltage waveform (a) full wave (b) wavefront

In case 2(1), use the same lightning impulse voltage circuit as in case 1 but change the load to a 24 kV 5 MVA DY11 power transformer, as shown in Fig.13. Since case2(1) already have a loaded transformer, the parameters calculated from case 1(1) use only L_s and U_0 . Furthermore, the parameters C_i and R_i are combined with the load as Z by using (9) to calculate. As a result, knowing the C_i and R_i values separately is not necessary.

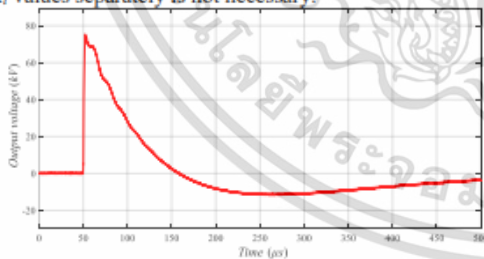


Fig. 13. Case 2(1) experimental lightning impulse voltage waveform

Then, case 2(2) is parallel $C = 1 \text{ nF}$ with the power transformer load changing T_1 and T_2 . Therefore, parallel Z with $C = 1 \text{ nF}$ and adjust R_d to 80Ω R_e to 90Ω to alter T_1 and T_2 within the specified range [1]. Furthermore, the impulse voltage test withstands of the 24 kV transformer must be tested at 125 kV, as in case 1(3), therefore U_0 in (10) is changed to 125 kV. After obtaining the U_l from (10), the inverse Fourier transform was used to obtain waveform in the time domain.

Then the lightning impulse voltage waveform from the calculations was compared with that obtained from case 2(2), the R-square value was 0.9994 as shown in Fig. 14.

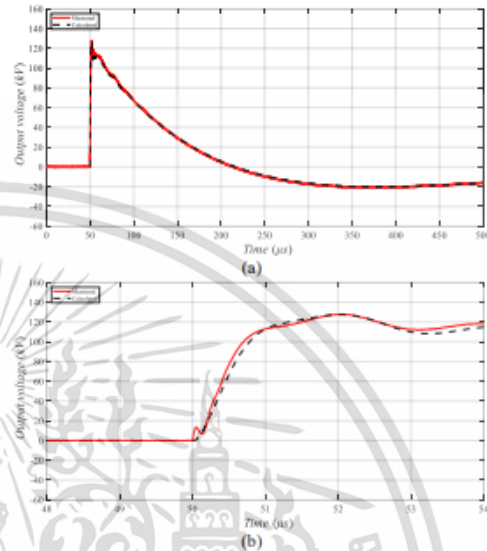


Fig. 14. Calculated waveform compared to case 2(2) experimental lightning impulse voltage waveform (a) full wave (b) wavefront

In case 3(1), use the same lightning impulse voltage circuit as case 1 but change the load to a 115/24 kV (24kV) 50 MVA power transformer as shown in Fig. 15. Same as case 2, since case 3(1) already have a loaded transformer, the parameters computed from case 1(1) use only L_s and U_0 .

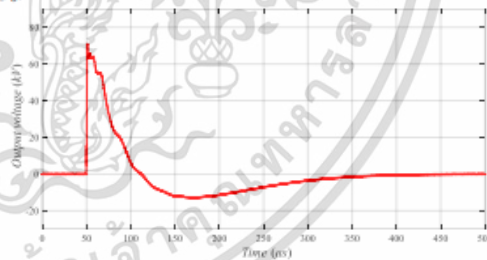


Fig. 15. Case 3(1) experimental lightning impulse voltage waveform

Nevertheless, when measuring the waveform parameter case 3(1), $T_1 = 0.6841 \mu s$ and $T_2 = 24.1605 \mu s$ are not within the standard range. Glaninger's circuit [17] was introduced to solve this problem. As shown in Fig. 16, L_d is connected across R_d and L_s , while R_p is connected in parallel with the load to alter the lightning impulse voltage waveform. In terms of calculating the parameter R_p , simply paralleling its value with Z in (9) provides a new Z value. In the case of adding the L_d parameter, (10) is derived to obtain (11), which is the same U_l equation, just adding the L_d term to the circuit following Glaninger's circuit [17]. Moreover, $R_d = 500 \Omega$ and $R_e = 90 \Omega$ are adjusted to keep T_1 and T_2 within the standard range [1]. Substitute the new

Z values, L_d , R_d , and R_e into (11) to find U_i . However, U_i is also in the frequency domain, so the inverse Fourier transform is used to transform it into time-domain form. Then compare the calculated waveform with the experimental waveform in case 3(2), the R-square value was 0.9990 as in Fig. 17.

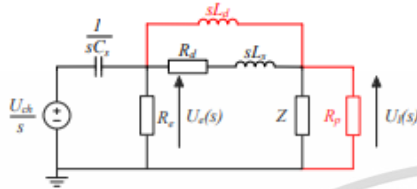


Fig. 16. Glaninger's circuit

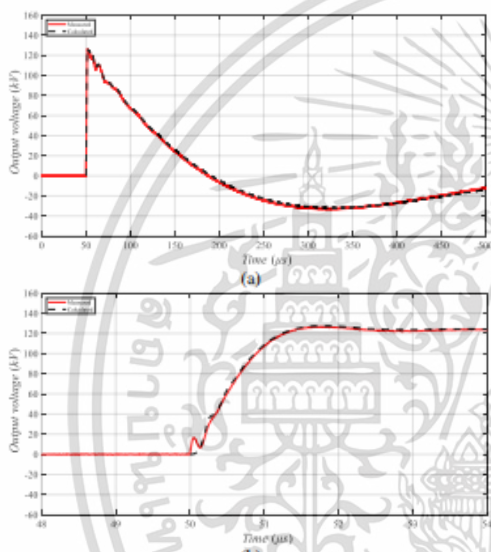


Fig. 17. Calculated waveform compared to case 3(2) experimental lightning impulse voltage waveform (a) full wave (b) wavefront

$$U_i(s) = \left[C_e R_e Z(s) U_k (R_e + sL_d + sL_e) \right] / \left[R_e R_p + R_e Z(s) + L_d R_p s + L_e R_p s + L_e R_e s + L_e Z(s) s + L_e Z(s) s + L_d L_e s^2 + C_e R_e R_p Z(s) s + C_e L_d L_e R_p s^2 + C_e L_d R_e R_p s^2 + C_e L_e R_e Z(s) s^2 + C_e L_e R_e Z(s) s^2 \right] \quad (11)$$

In all three cases, the calculated lightning impulse voltage waveform with the measured one agrees very well. R-square is greater than 0.999.

Although the experimental waveform has noise and spikes, the proposed method can be eliminated such effects by the proposed curve fitting. This confirms that the impulse voltage circuit parameters are determined precisely by the simple proposed method.

5. Conclusion

The effective method for determining stray and load circuit parameters based on calculations in the frequency domain has been developed in this paper. The waveforms

from simulations (without noise signal) and experiments were used to verify the validity of the proposed method. It is found that the proposed method yields stray and load circuit parameters regardless of their complexity with acceptable precision and fast calculation speed. From the determined circuit parameters in the preliminary tests, the circuit parameters (the front and tail resistors) can be adjusted to obtain the front time and time to half according to the specified standards. It can be concluded that the proposed method is an attractive method for determining the stray and load circuit parameters and proper circuit parameters for the generation of the lightning impulse voltage waveforms according to the specified standards.

Reference

- [1] *High-Voltage Test Techniques. Part 1: General Definitions and Test Requirements*, IEC 60060-1, 2010.
- [2] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, "High Voltage Engineering: Fundamentals," 2nd ed., Newnes: Oxford, UK, 2000.
- [3] H. R. Mirzaei, "A Simple Fast and Accurate Simulation Method for Power Transformer Lightning Impulse Test," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 3, pp. 1151-1160, June 2019.
- [4] H. R. Mirzaei, F. Bayat and K. Miralikhani, "A Semi-Analytic Approach for Determining Marx Generator Optimum Setup During Power Transformers Factory Test," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 1, pp. 10-18, Feb. 2021.
- [5] S. Okabe, T. Tsuboi and J. Takami, "Basic study of possible waveforms generated in lightning impulse withstand voltage test on UHV equipment," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, no. 4, pp. 1127-1133, Aug. 2009.
- [6] M. Hinow, W. Hauschild and E. Goekenbach, "Lightning impulse voltage and overshoot evaluation proposed in drafts of IEC 60060-1 and future UHV testing," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 5, pp. 1628-1634, Oct. 2010.
- [7] Božidar Filipović-Grčić, Dalibor Filipović-Grčić, Petar Gabrić, "Estimation of load capacitance and stray inductance in lightning impulse voltage test circuits," *Electric Power Systems Research*, Volume 119, 2015.
- [8] P. Tuethong, P. Yuthagowith, and A. Kunakorn, "Effective Simulation Approach for Lightning Impulse Voltage Tests of Reactor and Transformer Windings," *Energies*, vol. 13, no. 20, p. 5399, Oct. 2020.
- [9] P. Tuethong, K. Kitwattana, P. Yuthagowith, and A. Kunakorn, "An Algorithm for Circuit Parameter Identification in Lightning Impulse Voltage Generation for Low-Inductance Loads," *Energies*, vol. 13, no. 15, p. 3913, Jul. 2020.
- [10] P. Yuthagowith, P. Kitcharoen, and A. Kunakorn, "Systematic Design and Circuit Analysis of Lightning Impulse Voltage Generation on Low-Inductance Loads," *Energies*, vol. 14, no. 23, p. 8010, Nov. 2021.
- [11] B. Vahidi and J. Beiza, "Using PSpice in teaching impulse Voltage testing of power transformers to senior undergraduate students," in *IEEE Transactions on Education*, vol. 48, no. 2, pp. 307-312, May 2005.
- [12] L. Pelikan, M. Krbal and J. Orsagova, "Simulation of Impulse Generator Followed by Practical Verification," *2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2020, pp. 1-5.
- [13] R. M. Del Vecchio, R. Ahuja and R. D. Frenette, "Determining ideal impulse generator settings from a generator-transformer circuit model," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 1, pp. 142-148, Jan. 2002.
- [14] A. Zielesny, "From Curve Fitting to Machine Learning," 2nd ed., Springer: Switzerland, 2016.
- [15] Mustafa ŞEKER, "Parameter estimation of positive lightning impulse using curve fitting-based optimization techniques and least squares algorithm," *Electric Power Systems Research*, Volume 205, 2022.
- [16] J. G. Proakis, D. G. Manolakis, "Digital Signal Processing Principles, Algorithms, and Applications," 3rd ed., Prentice Hall: USA, 1995.

The 7th International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH2023)

- [17] C. Dechthummarong, S. Thepa, D. Chenvidhya, C. Jivacate, K. Kirtikara and J. Thongpron, "Lightning impulse test of field-aged PV modules and simulation partial discharge within MATLAB," *2012 9th International Conference on Electrical Engineering /Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2012.
- [18] K. Schwenk, M. Gamlin, "Load range extension methods for lightning impulse testing. with high voltage impulse generators," *14th ISH Beijing paper B -78*, 2005.
- [19] P. Yuthagowith, "Non-iterative Technique for Determination of Full Lightning Impulse Voltage Parameters," *Energies*, 2022.



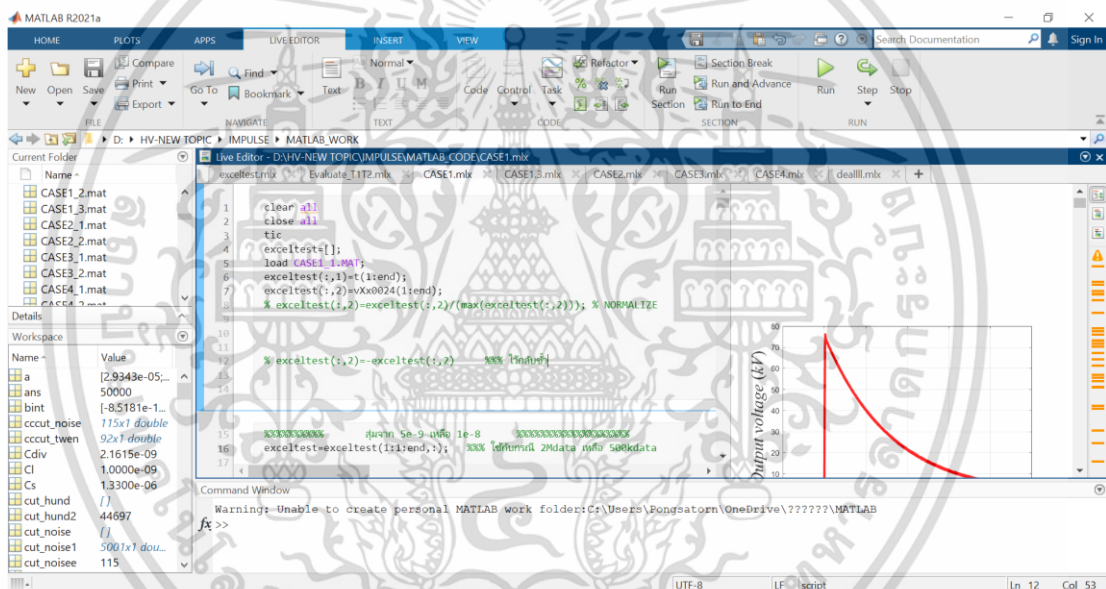
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าประกอบแฝง และโหลดในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

MATLAB เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งย่อมาจาก MATrix LABoratory การทำงานของโปรแกรม MATLAB อยู่บนพื้นฐานการคำนวณทางเมตริกซ์เป็นแกนหลัก (Matrix Manipulation and Computation) มีพื้นฐานภาษาคำสั่งคล้าย ๆ C และ Pascal นอกจากนี้ยังสามารถใช้เสมือนเครื่องคิดเลข ทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ได้ทันที โดยหน้าต่างของโปรแกรมเป็นดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 หน้าแสดงผลของโปรแกรม MATLAB

การนำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม MATLAB ไม่จำเป็นต้องพิมพ์ที่ละบรรทัด เนื่องจากโปรแกรมสามารถติดต่อกับโปรแกรมอื่น ๆ ในระบบปฏิบัติการ Windows คือสามารถนำ ASCII text file เข้าสู่โปรแกรมได้โดยตรง โดยไม่ต้องเขียนคำสั่งพิเศษเพิ่มเติม

การคำนวณในโปรแกรม MATLAB จะเป็นการคำนวณแบบเมตริกซ์ เช่น บวก ลบ คูณ หาร นั่นคือเมตริกซ์ทั้งสองต้องสอดคล้องกันตามกฎพื้นฐานการบวก ลบ คูณ หาร

นอกจากนี้ยังมีจุดเด่นดังต่อไปนี้

- MATLAB เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและแสดงผลในตัว ซึ่งสามารถแสดงผลออกมาเป็นเลขหรือรูปภาพก็ได้ แสดงกราฟ 2 มิติ 3 มิติ ได้อย่างง่ายดาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถควบคุมการทำงานในโปรแกรมได้ทั้งชุดคำสั่ง (Command line) หรือจะทางโปรแกรม (Script file) ก็ได้
- มีการเขียนโปรแกรมเป็นแบบคณิตศาสตร์ที่คุ้นเคย จึงง่ายกว่าการเขียนด้วยโปรแกรมขั้นสูง เช่น C, Pascal, Fortran
- ตัวโปรแกรมมีฟังก์ชันสำเร็จรูปเพื่อเรียกใช้ได้ทันที หรือต้องการเขียนเอง ก็สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันของตัวเองขึ้นมาได้
- MATLAB สามารถโยนหรือส่งข้อมูลแบบ Dynamic link กับโปรแกรมที่อยู่บนพื้นฐาน windows เช่น Excel หรือโปรแกรมที่เขียนเองด้วยภาษา C หรือภาษาอื่น ๆ ก็ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาที่ใช้ในการคำนวณองค์ประกอบวงจรแฉงและโหลด

ตารางที่ ค.1-ค.2 แสดงเวลาเฉลี่ยในการใช้คำนวณองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแฉงและโหลดที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงความเร็วและใช้เวลาในการคำนวณโดยเฉลี่ยประมาณใด โดยทำการคำนวณการทดลองละ 5 ครั้ง แล้วทำการเฉลี่ยเวลาออกมา อย่างไรก็ตามเวลาเฉลี่ยที่ระบุอาจมีปัจจัยภายนอกมาเกี่ยวข้อง เช่น สเปคคอมพิวเตอร์ การใช้งานโปรแกรมอื่นไปด้วย หรือแม้แต่อุณหภูมิคอมพิวเตอร์ก็ส่งผลต่อการคำนวณ ดังนั้นเวลาเฉลี่ยที่ระบุไปคือการบอกคร่าว ๆ ผู้ที่นำโปรแกรมนี้ไปใช้ในการคำนวณอาจได้เวลาในการคำนวณไม่ตรง แต่ใกล้เคียง

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ในการคำนวณมีสเปคดังนี้

- หน่วยประมวลผล

11th Generation Intel® Core™ i5-1135G7 Processor (2.40 GHz up to 4.20 GHz)

- ระบบปฏิบัติการ

Windows 10 Pro 64 preinstalled through downgrade rights in Windows 11 Pro 64 (English)

- หน่วยความจำ

16 GB SO-DIMM DDR4 3200MHz

- การจัดเก็บข้อมูล

512 GB SSD M.2 2242 PCIe Gen3/4

ตารางที่ ค.1 แสดงเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลต่อ 1 รอบของการทดสอบแบบจำลองรูปคลื่นขึ้นมา

กรณี	เวลาที่ใช้โดยเฉลี่ย (วินาที)
L_{15}	12.79
L_{30}	12.60
L_{60}	12.68
L_{120}	12.18
L_{240}	12.25
L_{480}	13.40
L_{960}	12.95


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 แสดงเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลต่อ 1 รอบของการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

กรณี	เวลาที่ใช้โดยเฉลี่ย (วินาที)
1(1)	12.30
1(2)	14.29
1(3)	13.38
2(1)	11.99
2(2)	13.51
3(1)	11.97
3(2)	14.31
4(1)	11.83
4(2)	13.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายพงศธร เต็มเตชาติพงศ์	
วัน เดือน ปีเกิด	4 พฤศจิกายน 2541 ที่ขอนแก่น	
ที่อยู่	159/138 หมู่บ้านชลพฤษ์กรีนวิลล์ ถ.ศรีจันทร์ ตำบลบ้านเป็ด อำเภอเมืองขอนแก่น ขอนแก่น 40000	
ประวัติการศึกษา	2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้น โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ศึกษาศาสตร์) 2559 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ศึกษาศาสตร์) 2563 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้