การศึกษาเชิงเปรียบเทียบการประเมินค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นฟ้าผ่าโดยระเบียบวิธีเลเวนเบิร์กมาร์ควอร์ท และวิธีตัวกรองอันเซนท์เททคาลมาน

นายเอกพล สุริยานุภาพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A COMPARATIVE STUDY ON LIGHTNING IMPULSE PARAMETER EVALUATION USING LEVENBERG-MARQUARDT ALGORITHM AND UNSCENTED KALMAN FILTER

Mr. Ekabol Suriyanubhab

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบการประเมินค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นฟ้าผ่าโดยระเบียบวิธีเลเวนเบิร์กมาร์ควอร์ทและวิธีตัวกรองอันเซนท์เทพคาลมาน
โดย	นายเอกพล สุริยานุภาพ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา)

....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิบาล พฤกษานุบาล)

เอกพล สุริยานุภาพ: การศึกษาเชิงเปรียบเทียบการประเมินค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นฟ้าผ่าโดยระเบียบวิธีเลเวนเบิร์กมาร์ควอร์ทและวิธีตัวกรองอันเซนท์เททคาลมาน (A COMPARATIVE STUDY ON LIGHTNING IMPULSE PARAMETER EVALUATION USING LEVENBERG-MARQUARDT ALGORITHM AND UNSCENTED KALMAN FILTER), อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา, 74 หน้า

แนวทางในการประเมินรูปคลื่นดลฟ้าผ่าสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน การประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นดลฟ้าผ่าโดยอาศัยการปรับรูปโค้ง ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นแนวทางหนึ่งที่มีการใช้งานแพร่หลาย และมีมาตรฐานรองรับ กรรมวิธีที่มีมาก่อนหน้าคือตัวกรองคาลมานขยาย และการปรับรูปโค้งโดยวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทเป็น 2 วิธีประเมินรูปคลื่นที่สามารถประเมินได้ดีบนโปรแกรมทดสอบรูปคลื่น TDG ซึ่งมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปคลื่นที่ทดสอบได้จากหม้อแปลง เพราะสมการปรับปรุงความแปรปรวนของตัวกรองคาลมานขยายเป็นแบบเชิงเส้น อาจส่งผลให้ความแม่นยำในการประเมินรูปคลื่น ที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงลดลง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาเปรียบเทียบตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน ซึ่งมีการปรับปรุงความแปรปรวนแบบไม่เชิงเส้น กับวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทซึ่งเป็นกรรมวิธีไม่เชิงเส้นเช่นกัน โดยเริ่มจากการประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรม TDG ก่อนเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของแต่ละวิธี แล้วจึงนำไปประเมินรูปคลื่นดลฟ้าผ่าที่ได้จากหม้อแปลงต่อไป ผลที่ได้จากการทดสอบรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรม TDG พบว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถประเมินรูปคลื่นได้ถูกต้องทุกกรณี ในขณะที่ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานจะประเมินได้ดีเฉพาะรูปคลื่นที่ไม่มีการรบกวนหรือรูปคลื่นเรียบ ซึ่งมีการแกว่งมากกว่า 500 kHz เท่านั้น โดยที่ค่าเริ่มต้นและความผิดพลาดของแบบจำลอง เป็นมูลเหตุสำคัญที่วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานไม่สามารถประเมินได้อย่างถูกต้อง แม้ว่าการปรับปรุงความแปรปรวนจะเป็นแบบไม่เชิงเส้นก็ตาม ในการทดสอบกับรูปคลื่นจากหม้อแปลงซึ่งมีลักษณะการแกว่งบริเวณยอดรุนแรง ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานจึงประเมินได้เฉพาะบริเวณหลังคลื่นเท่านั้น แต่วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถประเมินทั้งรูปคลื่นโดยพารามิเตอร์ที่คำนวณได้บางตัวมีค่าไม่ถูกต้อง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่อนิสิต** ....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก** ....
ปีการศึกษา 2557	

##5370668421: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: LIGHTNING IMPULSE / PARAMETER EVALUATION/ UNSCENTED KALMAN FILTER / LEVENBERG - QUARDT / TRANSFORMER

EKABOL SURIYANUBHAB: A COMPARATIVE STUDY ON LIGHTNING IMPULSE PARAMETER EVALUATION USING LEVENBERG-MARQUARDT ALGORITHM AND UNSCENTED KALMAN FILTER, ADVISOR: WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA, DR.-Ing, 74 pp.

There are several ways to evaluate lightning impulse parameters. The one usual way is curve fitting by using mathematical models based on exponential function according to international standard (IEC). The main previous works on curve fitting methodology are the extended kalman filter and levenberg - marquardt method. The both of them are used to evaluate lightning impulse parameters generated from TDG program not from transformer testing and the extended kalman filter variance updating in the process depends upon the state - space linearization. This may cause inaccurate evaluation. This thesis is comparative study on the lightning impulse parameter evaluation using these 2 methods, the unscented kalman filter and levenberg - marquardt method with 2 steps. First, TDG's lightning impulse parameter evaluations have been performed to investigate the 2 method's performance and the next, the lightning impulse parameter evaluations on transformer testing have been executed. The results illustrate that, for TDG test, levenberg - marquardt method can evaluate lightning impulse parameters exactly in every cases but the unscented kalman filter can evaluate exactly only the no noise or smooth curve with oscillation frequency less than 500 kHz cases. The cordial cause is the inaccurate initial values. In transformer lightning impulse parameter evaluation, the levenberg - marquardt method can evaluate the parameters but not accurate, for the unscented kalman filter, It can evaluate some undetermined coefficients of the model but not enough to construct complete curve because of distortion at the front and peak of the curve. The main causes are the error of model and the limitation of initial value determination. Because the oscillation and peak distortion are not noise so the unscented kalman filter cannot dispel them but the filter admit to the process. This makes the unscented kalman filter suffering about covariance matrix indeterminableness when some epochs of iteration have passed.

Department ....Electrical Engineering....	Student's Signature ....
Field of study ....Electrical Engineering....	Advisor's Signature ....
Academic Year ......2014......	

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา ที่แนะแนวทางในงานวิจัยฉบับนี้ ให้ผู้เขียนได้เล็งเห็นถึงประเด็นสำคัญรวมถึงผลักดันให้ผู้เขียนได้ทดลองแนวทางดังกล่าวจนสำเร็จลุล่วง อีกทั้งยังเมตตาตรวจต้นฉบับในเวลาที่จำกัด และเสนอวิธีการแก้ปัญหาในขณะที่ผู้เขียนมองไม่เห็นทางออก ผู้เขียนซาบซึ้งในพระคุณข้อนี้อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการ ผศ.ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ ประธานกรรมการ และ ผศ.ดร.อภิบาล พฤกษานุบาล กรรมการจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งของท่านถึง 2 ครั้ง เพื่อดำเนินการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และสอบวิทยานิพนธ์ ด้วยบรรยากาศการสอบที่เปี่ยมไปด้วยวิชาการและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ยิ่งต่อผู้เขียนมาก ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายแต่ไม่ท้ายสุด ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณแม่ของผู้เขียน ผู้เป็นทุกสิ่งทุกอย่าง ทั้งผู้คอยให้กำลังใจ และช่วยตรวจทานต้นฉบับในเบื้องต้นให้โดยไม่เห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย อีกทั้งยังคอยกระตุ้นเตือนให้ผู้เขียนมานะพยายามในการ ดำเนินการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

คุณความดีและสารัตถประโยชน์ใดที่พึงมีในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ครูอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ผู้เขียนทั้งทางโลกและทางธรรม และขอมอบแด่ คุณพ่อ ผู้ล่วงลับ และคุณแม่ผู้เป็นกำลังใจเสมอมา ส่วนข้อผิดพลาดอันใดถ้าหากมีปรากฏในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ญ

สารบัญภาพ .... ฎ

1 บทนำ **1**

1.1 ที่มาและความสำคัญ 2

1.2 ความเป็นมาและงานก่อนหน้า 3

1.2.1 วิธีประดิษฐ์รูปคลื่นฟ้าผ่าโดยวิธีพหุนาม 3

1.2.2 วิธี Cubic spline interpolation 4

1.2.3 วิธี Genetic algorithm 4

1.2.4 วิธี K - factor 5

1.2.5 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท 5

1.2.6 วิธีตัวกรองคาลมานขยาย (Extened kalman filter) 6

1.3 วัตถุประสงค์ 8

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 8

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 8

2 องค์ความรู้ที่ใช้ในการทดลอง **9**

2.1 แบบจำลองวงจรการเกิดรูปคลื่นฟ้าผ่า (Lightning impulse circuit) 9

2.2 รูปคลื่นมาตรฐานและการวิเคราะห์รูปคลื่นตามมาตรฐาน 12

2.2.1 รูปคลื่นดลฟ้าผ่าเต็ม 12

2.2.2 รูปคลื่นดลสวิตชิ่ง (Switching-impulse voltage) 13

2.2.3 เกณฑ์การวิเคราะห์รูปคลื่นโดยซอฟท์แวร์ตามมาตรฐาน 14

2.2.4 โปรแกรมสำหรับทดสอบซอฟท์แวร์ 14

2.2.5 ความถูกต้องของซอฟท์แวร์ (Software validation) 17

หน้า

2.2.6 การจัดกลุ่มและหมวดหมู่ของรูปคลื่นอ้างอิง (Classification of reference waveforms) 17

2.3 ระเบียบวิธีและขั้นตอนในการวิเคราะห์รูปคลื่นโดยซอฟท์แวร์ 19

2.3.1 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท (Levenberg-Marquardt method) 20

2.3.2 วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน (Unscented kalman filter) 22

2.3.3 รูปแบบของฟังก์ชันที่ใช้ในการวิเคราะห์ 28

2.3.4 การหาค่าเริ่มต้น 28

3 การทดลองเปรียบเทียบวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทและตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานบนการทดสอบหม้อแปลง 30

3.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง 30

3.2 การจำแนกรูปคลื่น 31

3.3 การหาค่าเริ่มต้นและการวิเคราะห์รูปคลื่น 33

3.3.1 การหาค่าเริ่มต้นสำหรับการสร้างหลังคลื่นและการสร้างหลังคลื่น 33

3.3.2 การหาค่าเริ่มต้นสำหรับหน้าคลื่น 36

3.4 รูปคลื่นตกค้างส่วนหาง (Residual curve of real curve and tail plot) 41

3.5 เกณฑ์ที่ใช้อ้างอิงกรณีทดสอบกับหม้อแปลง 41

4 ผลการทดลอง 42

4.1 การทดสอบขั้นตอนวิธีบนแบบจำลองของเลขชี้กำลัง 42

4.1.1 การทดลองกับฟังก์ชันเลขชี้กำลังเดี่ยว 42

4.1.2 การทดลองกับฟังก์ชันเลขชี้กำลังคู่ 42

4.2 ผลการดำเนินการบนโปรแกรมทดสอบ TDG 43

4.2.1 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 1 45

4.2.2 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 3 45

4.2.3 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 4 45

4.2.4 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 5 47

4.2.5 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 6 48

4.2.6 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 8 49

4.2.7 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 9 49

4.2.8 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 10 49

4.3 ผลการดำเนินการบนรูปคลื่นจากหม้อแปลง 51

4.3.1 รูปคลื่นจากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 1 51

4.3.2 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 2 53

หน้า

4.3.3 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 3 55
4.3.4 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 4 57

5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 60

5.1 สรุปผลการดำเนินการบนโปรแกรม TDG 60
5.1.1 เวลาที่ใช้ในการประมวลผล 60
5.1.2 ค่าเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการ 63
5.1.3 ความถูกต้องของคำตอบ 63
5.2 สรุปผลการดำเนินการบนรูปคลื่นฟ้าผ่าที่ได้จากหม้อแปลง 63
5.3 วิเคราะห์ผลที่ได้ 64
5.4 ข้อเสนอแนะ 65

รายการอ้างอิง 66

ภาคผนวก 68

ก รูปคลื่นดลที่เกิดจากโปรแกรมทดสอบ TDG 69

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 74

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ตารางแสดงการจัดหมวดหมู่รูปคลื่น 18
2.2 ตารางแสดงขอบเขตของพารามิเตอร์ 18

4.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 1 (รูปคลื่นเรียบฟ้าผ่าเต็ม ไร้การแกว่ง) 45
4.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 3 (รูปคลื่นเรียบฟ้าผ่าเต็ม มีการแกว่งน้อยกว่า 500 kHz) 47
4.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 4 (รูปคลื่นเรียบฟ้าผ่าเต็ม การแกว่งเกิน 500 kHz) 47
4.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 5 (รูปคลื่นเรียบสวิตชิ่ง) 48
4.5 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 6 (รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม ไร้การแกว่ง แต่มีการรบกวน, * แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ตรงกับขอบเขตที่กำหนด) 48
4.6 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 8 (รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม มีการแกว่งน้อยกว่า 500 kHz มีการรบกวน) 49
4.7 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 9 (รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม มีการแกว่งเกิน 500 kHz มีการรบกวน) 50
4.8 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 10 (รูปคลื่นสวิตชิ่ง มีการรบกวน) 50
4.9 ตารางแสดงผลการประเมินพารามิเตอร์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่ได้จากหม้อแปลงกรณีทดลองทดลองที่ 1 54
4.10 ตารางแสดงผลการประเมินรูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงกรณีการทดลองที่ 2 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถประเมินได้ทุกพารามิเตอร์ 54
4.11 ตารางแสดงการผลการประเมินรูปคลื่นจากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 3 57
4.12 ตารางแสดงการประเมินพารามิเตอร์ที่ได้จากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 4 59

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

1.1 รูปแสดงตัวอย่างของรูปคลื่นฟ้าผ่าที่ได้จากหม้อแปลง 3

2.1 วงจรให้กำเนิดรูปคลื่นดลฟ้าผ่า 9

2.2 รูปคลื่นฟ้าผ่ากรณีที่ 1 เป็นลักษณะของรูปคลื่นดลฟ้าผ่าเต็ม 10

2.3 รูปแสดงฟังก์ชันเลขชี้กำลังคู่ในส่วนหน้าคลื่น, หลังคลื่น และรูปคลื่นดลฟ้าผ่าสมบูรณ์ที่เป็นไปตามทฤษฎี 11

2.4 รูปแสดงความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ ของรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม 15

2.5 รูปแสดงพารามิเตอร์ของรูปคลื่นสวิตชิ่ง 15

2.6 รูปคลื่นที่แนะนำในการวิเคราะห์ในมาตรฐาน IEC1083-2 ([3]) 16

2.7 รูปคลื่นที่มาตรฐาน IEC1083-2 ไม่ได้แนะนำกรรมวิธีในการจำแนกให้ ([3]) 16

3.1 รูปพรีทริก 10% 31

3.2 รูปแสดงช่วงเวลาขณะที่มีแรงดันเป็น 0.6 ของค่ายอด ของฟ้าผ่าเต็ม อยู่ระหว่าง 10 μs กับ 100μs 32

3.3 รูปแสดงช่วงเวลาขณะที่มีแรงดันเป็น 0.6 ของค่ายอด ของฟ้าผ่าสับ มีค่าน้อยกว่า 10 μs 32

3.4 รูปแสดงช่วงเวลาขณะที่มีแรงดันเป็น 0.6 ของค่ายอด ของรูปคลื่นสวิตชิ่ง มีค่ามากกว่า 100 μs 33

3.5 รูปแสดงวิธีการหาค่าเริ่มต้น α เพื่อใช้ประดิษฐ์หลังคลื่น 34

3.6 รูปแสดงวิธีการเลือกจุดสำหรับหาค่าเริ่มต้น β เพื่อการประดิษฐ์หน้าคลื่น 37

3.7 รูปคลื่นแสดงนิยามของ *รูปคลื่นตกค้างส่วนหาง*, หางคลื่น และ รูปคลื่นจริง (รูปคลื่นกรณีที่ 9) 37

3.8 รูปคลื่นแสดงการสร้างส่วนหน้าคลื่น (รูปคลื่นกรณีที่ 9) 38

3.9 รูปคลื่นสมบูรณ์ที่ได้จากการรวมส่วนหางคลื่น และส่วนหน้าคลื่นเข้าด้วยกันแล้ว (รูปคลื่นกรณีที่ 9) 38

3.10 รูปคลื่นแสดงการวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้างส่วนหางเพื่อคำนวณความถี่การแกว่ง 39

3.11 รูปคลื่นแสดงความถี่ขนาดใหญ่ที่สุดที่ได้จากการใช้ FFT (Fast Fourrier Transform) . . . 40

4.1 รูปคลื่นดลฟ้าผ่าที่ใช้ทดสอบกรรมวิธี 43

4.2 แผนผังขั้นตอนการประมวลผลของทั้ง 2 กรรมวิธี 46

4.3 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 0.84/60 μs 51

รูปที่ หน้า
4.4 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 0.84/60.01 μs . . . 52
4.5 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 0.84/60 μs และรูปคลื่นที่ประเมินได้โดยวิธี LM . . . 52
4.6 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 0.84/60.01 μs บริเวณค่ายอด . . . 53
4.7 รูปหลังคลื่นที่ได้จากตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน . . . 53
4.8 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.65/46.77 μs . . . 54
4.9 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.65/46.77 μs และรูปคลื่นที่ประเมินได้โดยวิธี LM . . . 54
4.10 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.65/46.77 μs บริเวณค่ายอด . . . 55
4.11 รูปแสดงหลังคลื่นที่ประดิษฐ์ได้จากตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน . . . 55
4.12 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.05/50 μs . . . 56
4.13 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.05/50 μs และรูปคลื่นที่ประเมินได้โดยวิธี LM . . . 56
4.14 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.05/50 μs บริเวณค่ายอด . . . 56
4.15 รูปแสดงหลังคลื่นที่ประดิษฐ์ได้จากตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน . . . 57
4.16 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.13/86.5 μs . . . 58
4.17 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.05/50 μs และรูปคลื่นที่ประเมินได้โดยวิธี LM . . . 58
4.18 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.05/50 μs บริเวณค่ายอด . . . 58
4.19 รูปแสดงหลังคลื่นที่ประดิษฐ์ได้จากตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน . . . 59

5.1 รูปแสดงเกณฑ์การหยุดทำงานของวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน . . . 61
5.2 รูปแสดงเกณฑ์การหยุดทำงานของวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท . . . 62

ก.1 รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 1 (LI) . . . 69
ก.2 รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 3 (LISL) . . . 70
ก.3 รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 4 (LIFA) . . . 70
ก.4 รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 5 (SI) . . . 71
ก.5 รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 6 (LI with noise) . . . 71

รูปที่		หน้า
ก.6	รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 8 (LISL with noise)	72
ก.7	รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 9 (LIFA with noise)	72
ก.8	รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 10 (SI with noise)	73

บทที่ 1

บทนำ

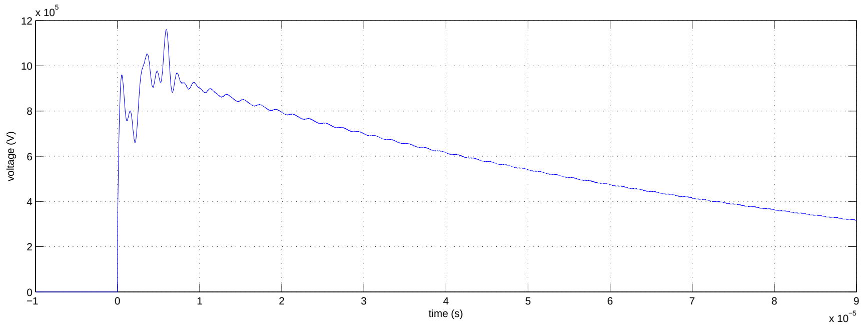
ในการติดตั้งระบบไฟฟ้าแรงสูงกลางแจ้งนั้น อุปกรณ์ที่นำมาติดตั้งจำเป็นต้องการทดสอบแรงดันฟ้าผ่าโดยต้องผ่านมาตรฐาน IEC 60060-1, IEC 60060-2 ซึ่งกำหนดคุณลักษณะของรูปคลื่นฟ้าผ่าไว้ 3 กรณีคือ รูปคลื่นดลฟ้าผ่าเต็ม (Full lightning impulse) , รูปคลื่นดลฟ้าผ่าสับ (Lightning impulse chopping) และ รูปคลื่นดลสวิตซิ่ง (Lightning impulse switching) หรือรูปคลื่นสวิตซิ่ง โดยที่ในแต่ละชนิดจะมีลักษณะและค่าพารามิเตอร์เฉพาะที่ต้องวิเคราะห์ ซึ่งในปัจจุบันมีการนำเอาเครื่องตรวจวัดแรงดันหรือออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอล (Digital oscilloscope) มาใช้ในการทดสอบ ผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลแบบดิจิตอลนี้จะทำให้การวิเคราะห์สัญญาณในแบบวิยุต (Discrete analysis) มีความสะดวกมากขึ้น โดยในการวิเคราะห์นั้นค่าพารามิเตอร์สำคัญที่เกี่ยวข้องมีดังนี้ 1.แรงดันค่ายอด หรือ peak voltage (V_p) เป็นแรงดันสูงสุดของรูปคลื่นฟ้าผ่าที่ทำการทดสอบ 2. เวลา ณ แรงดันค่ายอด หรือ time to peak (T_p) เป็นจุดเวลาที่สัมพันธ์กับแรงดันค่ายอดที่วัดได้ 3.เวลาหน้าคลื่น หรือ front time (T_1) เป็นพารามิเตอร์เสมือนชนิดหนึ่งที่จะใช้บอกช่วงเวลาในการยกตัวของรูปคลื่น และ 4.เวลาหลังคลื่น หรือ time to half (T_2) เป็นพารามิเตอร์เสมือนที่บอกช่วงเวลาการลดลงของแรงดันของรูปคลื่น นอกจากนี้สำหรับรูปคลื่นฟ้าผ่าสับและรูปคลื่นสวิตซิ่งจะมีพารามิเตอร์ที่ต้องประเมินเพิ่มเติมอีกคือ เวลาณ ขณะเกิดการสับ แรงดันขณะเกิดการสับ หรือเวลาเหนือ 90% พารามิเตอร์เหล่านี้ล้วนมีความสำคัญในการทดสอบ หากค่าใดที่ทดสอบได้มีขนาดมากกว่าหรือน้อยกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานยอมรับ จำต้องมีการปรับเปลี่ยนวงจรที่ใช้ในการทดสอบต่อไป ซึ่งมาตรฐานของการทดสอบมีความสำคัญมาก ความน่าเชื่อถือของผู้ทำการทดสอบ รวมถึงซอฟท์แวร์ที่ใช้ประมวลผลก็เป็นสิ่งสำคัญไม่ยิ่งหย่อนกว่ากัน หากว่าการดำเนินการประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นฟ้าผ่าสามารถกระทำได้อย่างอัตโนมัติ รวดเร็ว แม่นยำ เชื่อถือได้ และใช้งานง่าย ซอฟท์แวร์นั้นก็จะโดดเด่นและสามารถนำไปใช้ได้จริงทั้งสถานที่ปฏิบัติงานหรือในห้องปฏิบัติการ แต่การจะประเมินรูปคลื่นทดสอบให้มีความแม่นยำนั้น ชนิดของพารามิเตอร์ก็มีลักษณะในการวิเคราะห์แตกต่างกัน ซึ่งกระบวนการที่จะใช้ต้องมีความเหมาะสม และด้วยเหตุนี้เองกรรมวิธีที่เป็นอัตโนมัติ (หรือกึ่งอัตโนมัติ) จึงเกิดขึ้นหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันตามแต่องค์ความรู้ที่ใช้ ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาและกรรมวิธีอัตโนมัติเป็นสำคัญ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในอดีต การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่า จะอาศัยผู้ชำนาญการเป็นผู้วิเคราะห์เป็นหลัก ซึ่งอาศัยแนวทางในการประมาณแบบเป็นเชิงเส้น ถ้าหากรูปคลื่นที่พิจารณาปราศจากสภาวะเพอร์เทอร์เบชั่น อันได้แก่ สัญญาณรบกวน (Noise), ส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) ซึ่งมักจะเป็นผลมาจากการแกว่ง (Oscillation) เป็นต้น เหล่านี้ การพิจารณาโดยผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งทำการวัดด้วยสายตาแต่เพียงอย่างเดียวอาจจะให้ความเห็นไม่ตรงกัน และผู้ทำการทดลองทั่วๆ ไป ก็ไม่สามารถวัดได้อย่างน่าเชื่อถือ โดยปัจจุบัน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น มีการนำเครื่องวัดแบบดิจิตอลเข้ามาใช้ ซึ่งจะสามารถทำให้เราเก็บค่าข้อมูลของคลื่นแรงดันฟ้าผ่าได้สะดวก และยังสามารถนำเอาข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์ได้อย่างอิสระ ประกอบกับเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ เรื่องที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแบบวิยุต ก็มีความแม่นยำมากขึ้น ดังนั้น หลักการของเราก็คือ *จะหารูปคลื่นต่อเนื่องเหมาะสมที่สุด* ที่จะสามารถประดิษฐ์รูปคลื่นฟ้าผ่าของเราได้ โดยกรรมวิธีทางสัญญาณและทางคณิตศาสตร์ แล้วจากนั้น จะใช้รูปคลื่นที่ประดิษฐ์ขึ้นเองนี้ หาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังกล่าวข้างต้น ทดแทนข้อมูลของสัญญาณจริง ความแตกต่างในการประมาณนั้นขึ้นอยู่กับ 1. สมการ คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ โดยรูปแบบพหุนามจะมีจุดอ่อนเรื่องส่วนพุ่งเกิน และการแกว่ง จากงานวิจัยหลายฉบับเสนอให้ใช้แบบจำลองที่ส่วนประกอบของฟังก์ชันเลขชี้กำลัง และฟังก์ชันเชิงไซน์ เพราะในทางทฤษฎีรูปคลื่นฟ้าผ่าเกิดจากฟังก์ชันเลขชี้กำลังคู่ 2. เครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่จะใช้ร่วมกับแบบจำลองที่เลือก ในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบ 2 กรรมวิธี ซึ่งเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน

ความแม่นยำที่ได้ รวมถึงระดับความเชื่อมั่น ก็จะแตกต่างกันในแต่ละวิธี ในอดีตที่ผ่านมาทั้งหมด งานวิจัยรวมไปถึงมาตรฐานที่กำหนดเพื่อใช้ทดสอบขั้นตอนวิธีนั้น ล้วนแล้วแต่ตั้งอยู่บนชุดทดสอบเคเบิล (Cable testing platform) หรือโปรแกรมมาตรฐานสำหรับการทดสอบ (TDG) ซึ่งทั้ง 2 กรณีนี้อาศัยเพียงแบบจำลองที่ผ่านการประมาณ ก็สามารถให้ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้อย่างถูกต้อง เพราะการรบกวนอยู่บนสมมติฐานที่ว่า “สัญญาณรบกวน มีลักษณะเป็นเกาส์เซียนไวท์” ซึ่งประสบผลสำเร็จในการทดลองเป็นอย่างดี แต่ความไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงอันเนื่องมาจากลักษณะของแบบจำลองที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจว่า การประเมินรูปคลื่นเหล่านั้น มีความเป็นไปได้มากน้อยเพียงไรสำหรับการประเมินพารามิเตอร์รูปคลื่นของหม้อแปลง อีกทั้งวิธีอัตโนมัติที่มีอยู่อาศัยการทำเป็นเชิงเส้น (Linearized) ในขั้นตอนของการปรับปรุง ดังนั้นเราจึงต้องอาศัยความถูกต้องของแบบจำลองซึ่งมีลักษณะไม่เชิงเส้นทดแทนการทำให้เป็นเชิงเส้นดังล่าว ลักษณะของรูปคลื่นของหม้อแปลงสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 1.1 ซึ่งรูปคลื่นดังกล่าวนี้มีความเพี้ยนของบริเวณหน้าคลื่นมาก ในงานวิจัยชิ้นนี้ จะทำการเปรียบเทียบ *กรรมวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน* (Unscented Kalman filter) กับ *ระเบียบวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท* (Levenburg-Marquardt method) เป็นหลัก ซึ่งทั้งสองวิธีดังกล่าวต่างก็เป็นกรรมวิธีไม่เชิงเส้นทั้งคู่ โดยมีจุดประสงค์ เพื่อที่จะศึกษาถึงความแม่นยำของแต่ละวิธี โดยมีมาตรฐานของ IEC 60060-1, IEC

60060-2 และ IEC1083-2 เป็นตัวกำหนด แล้วจากนั้นจะนำไปทดสอบกับระบบจริง โดยมีผู้เชี่ยวชาญเป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 1.1: รูปแสดงตัวอย่างของรูปคลื่นฟ้าผ่าที่ได้จากหม้อแปลง

1.2 ความเป็นมาและงานก่อนหน้า

1.2.1 วิธีประดิษฐ์รูปคลื่นฟ้าผ่าโดยวิธีพหุนาม

จะใช้สมการพหุนามเป็นแบบจำลองในการประดิษฐ์รูปคลื่น โดยมีสมการเป็น

$$p(t) = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \ldots + a_0 \quad (1.1)$$

เมื่อ

a_i: คือสัมประสิทธิ์ของพหุนามอันดับที่ i ใดๆ

t: คือ เวลาขณะใดๆ

$p(t)$: คือ ขนาดของแรงดันที่เวลา t

วิธีการดังกล่าวนี้มีส่วนสำคัญคือ เสนอแบบจำลองเป็นแบบพหุนาม ส่วนกรรมวิธีในการหาค่าเหมาะสมสามารถใช้การหาค่าเหมาะสมสุดเชิงเส้น (Linear optimization) ทำให้การรบกวนกำลังสองตามหลักการของเกาส์มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสมรรถนะของฟังก์ชันพหุนามในการปรับเส้นโค้งจะใช้จำนวนพจน์มาก หากรูปคลื่นมีลักษณะการแกว่ง (การเปลี่ยนแปลงของข้อมูลแบบรวดเร็ว) ในขณะที่บริเวณหางคลื่นของรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มหรือรูปคลื่นสวิตชิ่ง จะค่อนข้างเรียบหากมีจำนวนพจน์มากบริเวณหางคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงมากตามไปด้วย ดังนั้นวิธีนี้ (แบบจำลองนี้) จึงสามารถประดิษฐ์รูปคลื่นสวิตชิ่งและรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ไม่มีการแกว่งเท่านั้น ไม่สามารถวิเคราะห์ส่วนพุ่งเกินของรูปคลื่นได้

1.2.2 วิธี Cubic spline interpolation

ใช้สมการพหุนามเป็นแบบจำลองเช่นเดิม แต่จะแบ่งรูปคลื่นออกเป็นส่วนๆ แล้วคำนวณสัมประสิทธิ์ในแต่ละช่วงเพื่อให้ได้สมการพหุนามที่เหมาะสมในการประดิษฐ์รูปคลื่น เนื่องจากความแตกต่างของรูปคลื่นในแต่ละช่วง (ช่วงยอดคลื่นที่อาจมีการแกว่ง) เป็นอุปสรรคสำคัญในการใช้แบบจำลองพหุนาม ดังนั้นเมื่อแบ่งออกเป็นช่วงๆ แล้วทำการปรับเส้นโค้งให้เหมาะในแต่ละส่วน จะสามารถสร้างสมการพหุนามที่เหมาะแก่แต่ละช่วงนั้นได้ อาทิเช่น ช่วงยอดคลื่นอาจมีจำนวนพจน์มากเพื่อให้เพียงพอต่อการกำหนดการแกว่ง ช่วงหลังคลื่นอาจจะใช้จำนวนพจน์ที่น้อยกว่า เพื่อให้รูปคลื่นมีลักษณะเรียบ แล้วจึงใช้วิธีการปรับเส้นโค้งแบบที่ใช้ในสมการพหุนามเพื่อคำนวณพารามิเตอร์ของพหุนามออกมา แต่เนื่องด้วยการแกว่งมีลักษณะเหมือนกราฟเชิงไซน์ (Sinusoidal) มากกว่า ดังนั้น วิธีการนี้สามารถประดิษฐ์รูปคลื่นสวิตชิ่งและรูปคลื่นอิมพัลส์ได้ทุกแบบ แต่ยกเว้นบริเวณส่วนยอดคลื่น จึงไม่สามารถวิเคราะห์ส่วนพุ่งเกินได้

1.2.3 วิธี Genetic algorithm

เป็นกรรมวิธีที่พัฒนาเพื่อหาผลเฉลยของปัญหา โดยการเรียงค่าของผลเฉลยที่คาดการณ์เอาไว้เป็นเหมือนแถวของข้อมูลซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับโครโมโซมของพันธุกรรม แล้วจากนั้นจะเลือก 2 ค่าใดๆ ออกมาเพื่อทดสอบความเหมาะสมโดยจะมีตัวตัดสินคือความพอดี (Fitness) เป็นเกณฑ์ว่า ค่าที่เลือกมาเพื่อทดสอบให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับคำตอบหรือไม่ ค่าใดใกล้เคียงสุดก็จะจัดให้ค่านั้นเป็นค่าที่อยู่ในลำดับแรกๆ ของสายพันธุกรรมเพื่อใช้ในการวนรอบครั้งถัดไป สำหรับการประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นฟ้าผ่านี้ จะใช้แบบจำลองเป็นฟังก์ชันเลขชี้กำลังประกอบกับฟังก์ชันรูปไซน์ (Sinusoidal function) ในการประดิษฐ์รูปคลื่น ซึ่งมีสมการเป็น

$$V(t) = A_1 e^{-a_1 t} - A_2 e^{-a_2 t} + A_3\left(1 - e^{-a_3 t}\right)\cos(\omega t + \phi) \tag{1.2}$$

ผู้ทำการทดลองจะสุ่มเลือกค่าของตัวแปรจากขอบเขตที่เป็นไปได้ จากสายพันธุกรรม เมื่อเลือกแล้วจะทำการแทนค่าแล้วเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นจริงกับรูปคลื่นที่ประดิษฐ์ได้จากแบบจำลอง โดยอาศัยเกณฑ์กำลังสองน้อยสุดเป็นตัวตัดสิน มีสมการเป็น

$$\text{fitness} = \frac{f}{\sqrt{\sum\left[y(t) - \hat{y}(t)\right]^2}} \tag{1.3}$$

โดยที่

f คือ ตัวประกอบการคูณ

$y(t)$ คือ ข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลอง

$\hat{y}(t)$ คือ ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง

fitness คือ ค่าของความเหมาะสม ยิ่งมากยิ่งดี

ค่าประกอบการคูณจะถูกเลือกเพื่อเพิ่มขีดความเหมาะสมของผลเฉลย ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ผู้ทำการทดลองต้องเป็นผู้เชี่ยวชาญจึงสามารถเลือกได้อย่างเหมาะสม เพราะการเริ่มต้นกระบวนการวิวัฒนาการจะต้องเริ่มจากโครโมโซม (ผลเฉลยที่เป็นไปได้) ที่ใกล้เคียงกับคำตอบ นอกจากนี้ยังมีความยืดหยุ่นเพราะสามารถเลือกเองได้ แต่วิธีการดังกล่าวต้องใช้ประสบการณ์ และผู้ทดลองต้องเป็นผู้เลือกค่าที่เหมาะสมจึงยังไม่อาจถือได้ว่าเป็นวิธีอัตโนมัติ

1.2.4 วิธี K - factor

วิธีนี้เสนอขึ้นมาโดย K. Hackemack et al. [4] โดยอาศัยผลการทดลองเรื่องการเบรกดาวน์ของฉนวนในห้องทดลอง แล้วสังเกตผล พบว่าการแกว่งของรูปคลื่นดลฟ้าผ่า จะมีความสัมพันธ์กันกับชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง โดยการศึกษาพฤติกรรมการเบรกดาวน์ของฉนวนทดสอบแล้วเปรียบเทียบกับแรงดันเฉลี่ยที่คำนวณได้ ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน มีสมการของแรงดันทดสอบเป็น

$$U_{\text{test}} = kU_{\text{peak}} + (1-k)U_{\text{peak(meancurve)}}$$

โดย U_{peak} คือแรงดันสูงสุดของรูปคลื่นที่ประดิษฐ์ตามมาตรฐาน ส่วนค่าของ k จะขึ้นกับความถี่ของของรูปคลื่น หลังจากทำการกรองโดยตัวกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter) แล้วจะคำนวณพารามิเตอร์จากรูปคลื่นเชิงเวลาที่ได้จากผลตอบเชิงความถี่ที่กรองส่วนของการแกว่งออกไปแล้ว กรรมวิธีนี้เป็นการเสนอแนวคิดเรื่องการประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นฟ้าผ่าจากห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนจึงขึ้นกับวัสดุที่ใช้ว่าเป็นวัสดุชนิดใด เพื่อจะเลือกตัวกรองที่เหมาะสมได้

1.2.5 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท

กรรมวิธีนี้เริ่มต้นจากการกำหนดฟังก์ชันสูญเสีย (Cost function) และหาค่าที่ทำให้ฟังก์ชันสูญเสียนี้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสัญกรณ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ตามสมการ

$$\min_{\mathbf{x}\in\mathbb{R}^n} \epsilon^T\epsilon \qquad (1.4)$$

โดยที่ ϵ เป็นเวกเตอร์ค่าผิดพลาด (Error) ระหว่างข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลอง, $\epsilon^T\epsilon$ คือ ฟังก์ชันสูญเสีย โดยเวกเตอร์ค่าผิดพลาดสามารถแสดงได้ตามสมการ

$$\epsilon = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} \qquad (1.5)$$

โดยที่แบบจำลองนั้น เราสามารถกำหนดเป็นไปตามสมการใดก็ได้ ตามสมการต่อไปนี้

$$y(t) = A\left(e^{-at} - e^{-bt}\right) \tag{1.6}$$

$$y(t) = A\left(e^{-at} - e^{-bt}\right) + B\left(1 - \cos\omega t\right)e^{-\gamma t} \tag{1.7}$$

$$y(t) = A\left(e^{-at} - e^{-bt}\right) + B\ e^{-\delta t}\sin\phi t \tag{1.8}$$

$$y(t) = A\left(e^{-at} - e^{-bt}\right) + B\left(1 - \cos\omega t\right)e^{-\gamma t} + C\ e^{-\delta t}\sin\phi t \tag{1.9}$$

$$y(t) = A\left(e^{-at} - e^{-bt}\right)\left(1 - Be^{-ct^{d}}\right) \tag{1.10}$$

โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นที่เหมาะสม กรรมวิธีจะใช้ค่าดังกล่าวในการวนรอบเพื่อปรับปรุงคำตอบให้ได้ใกล้เคียงที่สุด ด้วยสมการ

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \left[\mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{J}(\mathbf{x}) + \lambda\mathbf{I}\right]^{-1}\mathbf{J}^T(\mathbf{x})\epsilon(\mathbf{x}) \tag{1.11}$$

เมื่อ J คือตัวกำหนดยาโคเบียน สมการดังกล่าวนี้ สามารถใช้ได้กับทุกรูปคลื่น และสามารถประเมินพารามิเตอร์ได้อย่างเป็นอัตโนมัติ

1.2.6 วิธีตัวกรองคาลมานขยาย (Extened kalman filter)

วิธีดังกล่าวอาศัยแนวคิดทางระบบควบคุมโดยการสร้างสมการสถานะของรูปคลื่นฟ้าผ่าขึ้นมา แล้วจากนั้นจึงกำหนดค่าเริ่มต้นทั้งตัวแปรสถานะเริ่มต้น (x_0) และความแปรปรวนเริ่มต้น (P_0) แล้วจึงสร้างกระบวนการปรับปรุงค่าตัวแปรสถานะที่เริ่มต้นนี้ให้เข้าสู่คำตอบซึ่งจะทำให้ความแปรปรวนมีค่าน้อยสุด Pérez et al. [11], [12] เป็นผู้เสนอวิธีการดังกล่าวนี้ขึ้นมา ในฐานะจะเป็นตัวแทนของระบบการประเมินรูปคลื่นฟ้าผ่าที่เป็นอัตโนมัติ โดยอาศัยแนวทางของระบบควบคุม โดยเขาได้ทดลองทำกับรูปคลื่นฟ้าผ่าที่ได้จากโปรแกรมทดสอบ ซึ่งเป็นส่วนแนบท้ายของมาตรฐาน IEC1083-2 ได้ผลตรงตามเกณฑ์ โดยมีหลักการแสดงได้โดยสังเขปดังนี้
แสดงระบบรูปคลื่นฟ้าผ่าในรูปแบบสมการสถานะ

$$x_k = f_{k-1}(x_{k-1}) + w_{k-1} \tag{1.12}$$

$$y_k = h_k(x_k) + v_k \tag{1.13}$$

$$w_k \sim (0, Q) \tag{1.14}$$

$$v_k \sim (0, R) \tag{1.15}$$

โดยให้ $f(x)$ เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ และ $h(x)$ เป็นแบบจำลองฟังก์ชันของรูปคลื่นฟ้าผ่า โดยที่มีการรบกวน v_k เป็นการรบกวนที่ประกอบอยู่ในรูปคลื่น และให้ w_{k-1} เป็น 0 สำหรับการปรับปรุงตัวแปรสถานะ จะพิจารณาระบบว่าเป็นเชิงเส้นในช่วงสั้นๆ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้สมการปรับปรุงแบบที่ใช้

ในคาลมานเชิงเส้น (Linear kalman) ได้ โดยขั้นตอนในการปรับปรุงมีดังนี้
เริ่มด้วยการประมาณระบบเป็นเชิงเส้น

$$F_{k-1} = \left.\frac{\partial f_{k-1}}{\partial x}\right|_{x=\hat{x}^+_{k-1}} \quad (1.16)$$

$$L_{k-1} = \left.\frac{\partial w_k}{\partial w}\right|_{x=\hat{x}^+_{k-1}} = I \quad (1.17)$$

จากนั้น นำค่าที่ประมาณได้เข้าสู่กระบวนการปรับปรุงจากขั้นตอนที่ $k-1$ สู่ขั้นตอนที่ k ตามสมการต่อไปนี้

$$P^-_k = F_{k-1}P^+_{k-1}F^T_{k-1} + Q_{k-1} \quad (1.18)$$

$$x^-_k = f_{k-1}(x^+_{k-1}, u_{k-1}, 0) \quad (1.19)$$

ขั้นตอนสุดท้าย เมื่อรับค่าสังเกตขณะเหตุการณ์ที่ k เข้ามาในระบบ ลำดับถัดมาจึงสร้างสมการปรับปรุง สร้างอัตราขยาย (Gain, K) และปรับปรุงความแปรปรวนเพื่อใช้ในกระบวนการรอบถัดไปตามสมการ

$$H_k = \left.\frac{\partial h_k}{\partial x}\right|_{x^-_k} \quad (1.20)$$

$$M_k = \left.\frac{\partial v_k}{\partial v}\right|_{x^-_k} = I \quad (1.21)$$

$$K_k = P^-_k H^T_k (H_k P^-_k H^T_K + M_k R_k M^T_k)^{-1} \quad (1.22)$$

$$x^+_k = x^-_k + K_k[y_k - h_k(x^-_k, 0)] \quad (1.23)$$

$$P^+_k = (I - K_k H_k)P^-_k \quad (1.24)$$

และแบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง Pérez et al. อ้างจากงานของ T.R. McComb et al. [10] ว่าควรจะอยู่ในรูปของสมการเลขชี้กำลังที่มีลักษณะ

$$V(t) = A_0 \left(e^{-a(t+t_0)} + Be^{-b(t+t_0)}\right)\left(1 - Ce^{-c(t+t_0)^d}\right) \quad (1.25)$$

โดยสมมุติค่าเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นมาตรฐาน แม้ว่ากรรมวิธีดังกล่าวนี้จะให้การประเมินพารามิเตอร์รูปคลื่นได้ดี ใช้งานง่าย และเป็นอัตโนมัติ แต่เพราะขั้นตอนการปรับปรุงความแปรปรวนยังเป็นเชิงเส้นอยู่ การประเมินรูปคลื่นอาจจะไม่แม่นยำหากการรบกวนมีขนาดใหญ่ เป็นที่น่าสนใจว่าหากการปรับปรุงความแปรปรวนและตัวแปรสถานะ อาศัยการทำเป็นเชิงเส้นน้อยที่สุด น่าจะให้ผลการคำนวณตัวแปรสถานะมีความแม่นยำยิ่งขึ้น ส่งผลต่อการประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นฟ้าผ่าที่จะแม่นยำยิ่งขึ้นต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ การประดิษฐ์รูปคลื่นดลฟ้าผ่า ที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลง โดยใช้ระเบียบวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท (Levenberg - Marquardt method) กับวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน (Unscented Kalman filter) ซึ่งเป็นกรรมวิธีอัตโนมัติและไม่เป็นเชิงเส้นทั้ง 2 วิธีและเป็นการนำเสนอเชิงการทดลองสมรรถนะของตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานว่ามีความแม่นยำเพียงไรในการประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นฟ้าผ่า โดยพิจารณาในด้านความเป็นอัตโนมัติของทั้ง 2 วิธีการ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาเปรียบเทียบ 2 กรรมวิธีต่อไปนี้ โดยอาศัยแนวทางของการปรับเส้นโค้ง
   (a) วิธีทางคณิตศาสตร์โดยตรง คือ วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท ใช้หลักการการปรับเส้นโค้งเพื่อให้ความผิดพลาดกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด
   (b) วิธีการทางระบบควบคุม คือ ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน โดยพิจารณาข้อมูลรูปคลื่นฟ้าผ่าเป็นระบบพลวัตไม่เชิงเส้น แล้วทำการประมาณ ค่าตัวแปรสถานะ โดยมีกระบวนการซึ่งจะทำให้ ความแปรปรวนมีค่าน้อยสุด
2. ทดสอบซอฟท์แวร์ด้วยรูปคลื่นฟ้าผ่าที่ได้จากหม้อแปลงและเปรียบเทียบผลที่ได้กับผู้เชี่ยวชาญ โดยขั้นตอนของการทดสอบโปรแกรมจะกระทำกับรูปคลื่นอ้างอิงที่ได้จากโปรแกรม TDG
3. ใช้กระบวนการ 2 ขั้นตอนคือ ประดิษฐ์ส่วนหางคลื่นก่อน และประดิษฐ์หน้าคลื่นในลำดับถัดมา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในงานวิจัยชิ้นนี้ ผู้ทำงานวิจัยมุ่งหวังว่าจะทำให้ได้รับประโยชน์ดังนี้

1. ทำให้การวิเคราะห์รูปคลื่นฟ้าผ่าเป็นไปโดยอัตโนมัติมากที่สุด
2. ปรับปรุงวิธีการในการประมาณ โดยวิเคราะห์ในแบบไม่เชิงเส้น เพื่อป้องกันปัญหา กรณีชุดทดสอบมีการรบกวนอย่างรุนแรง และ มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง
3. เพื่อใช้สำหรับเป็นขั้นตอนวิธีมาตรฐาน ในการกำหนดมาตรฐานรูปคลื่นฟ้าผ่าต่อไปในอนาคต
4. เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน เพราะเมื่อการทำงานอยู่บนความเป็นซอฟท์แวร์แล้วการประเมินพารามิเตอร์จะสามารถกระทำได้ทั้งในและนอกห้องปฏิบัติการ

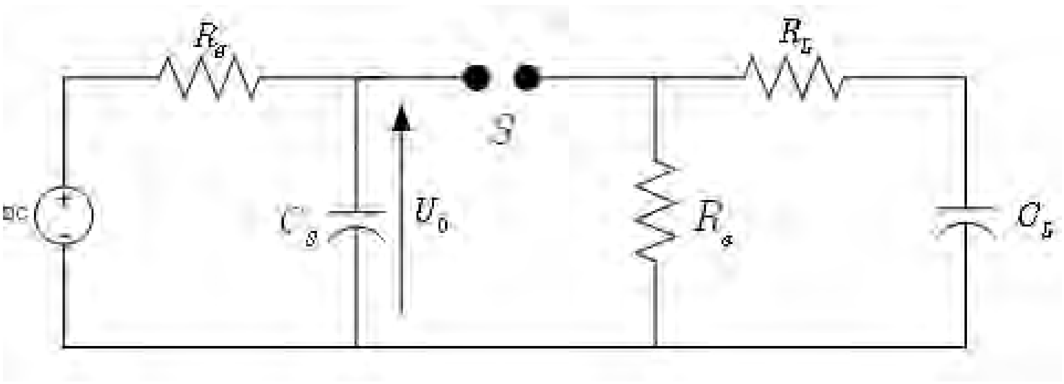
บทที่ 2

องค์ความรู้ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 แบบจำลองวงจรการเกิดรูปคลื่นฟ้าผ่า (Lightning impulse circuit)

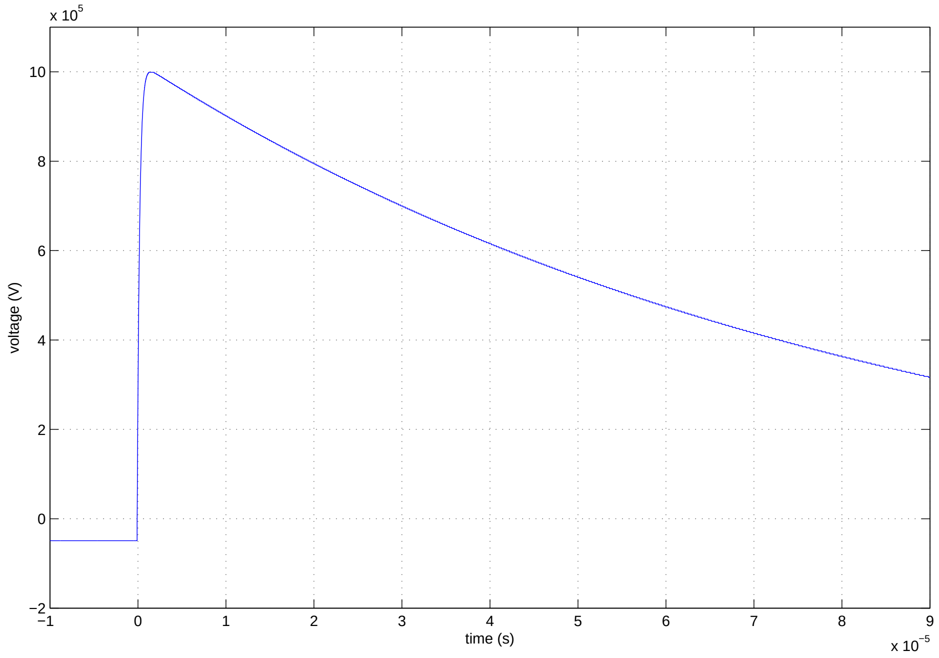
ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จะอาศัยวงจร RC เป็นตัวให้กำเนิดคลื่นดล โดยผู้ทดลองจะทำการอัดประจุผ่านวงจร RC เพื่อให้มีความต่างศักย์ตามต้องการ จากนั้นจึงทำการคายประจุผ่านสปาร์กแก็ป (Spark gap, S) โดยที่มีวัสดุทดสอบ (สายเคเบิล หรือ ในกรณีงานวิจัยนี้คือหม้อแปลง) ต่ออย่างอนุกรมกับสปาร์กแก็ป ดังรูป 2.1
ตามรูปที่ 2.1 สัญกรณ์แสดงค่าต่างๆ ดังนี้

- R_s คือ ความต้านทานจำกัดแรงดัน
- C_s คือ ตัวเก็บประจุเริ่มต้น
- S คือ สปาร์กแก็ป
- R_e คือ ความต้านทานสำหรับการปล่อยประจุ
- R_L คือ ความต้านทานโหลด
- C_L คือ ตัวเก็บประจุโหลด
- U_0 คือ แรงดันอัดประจุ



รูปที่ 2.1: วงจรให้กำเนิดรูปคลื่นดลฟ้าผ่า

แหล่งจ่ายแรงดันจะทำการอัดประจุ ผ่านตัวต้านทาน R_s จนกระทั่ง C_s มีแรงดันเป็น U_0 ซึ่งแรงดันดังกล่าวนี้จะขึ้นกับระยะห่างระหว่างสปาร์กแก็ป (S) จนกระทั่งเกิดการสปาร์ก ประจุจาก C_s จะถูกถ่ายผ่านตัวต้านทาน R_Lเข้าสู่ตัวเก็บประจุ C_L เมื่อประจุเต็ม ตัวเก็บประจุ C_L ก็จะถ่ายเทประจุผ่าน R_L มายัง R_e จนกระทั่งประจุหมด โดย R_e มีผลต่อหน้าคลื่น และ R_L มีผลต่อหลังคลื่น ซึ่งรูปคลื่นทดสอบ เมื่อทำการเก็บข้อมูลด้วยวิธีดิจิตัล (Digital recorded) จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 (เป็นกรณีตัวอย่างของรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มไร้การแกว่งและการรบกวน กรณีที่ 1) ในทางทฤษฎี รูป

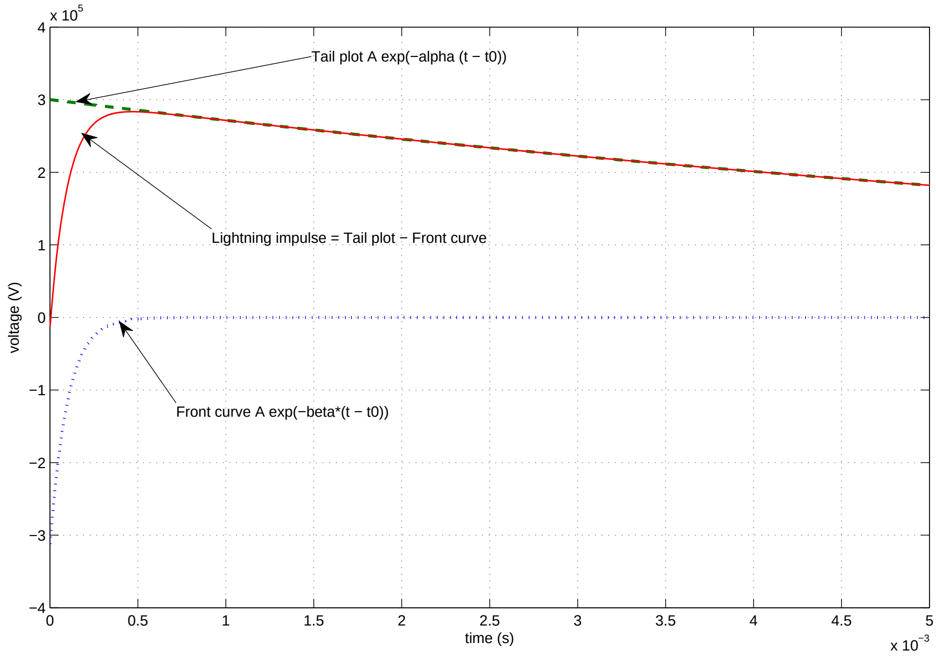


รูปที่ 2.2: รูปคลื่นฟ้าผ่ากรณีที่ 1 เป็นลักษณะของรูปคลื่นดลฟ้าผ่าเต็ม

คลื่นฟ้าผ่าสามารถจำลองได้ด้วยฟังก์ชันชี้กำลังคู่ (Double exponentials) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 รูปคลื่นฟ้าผ่าสมบูรณ์เกิดจากการรวมกันของ 2 ฟังก์ชันดังกล่าว เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการเกิดฟ้าผ่าจะพบว่าผลเฉลยของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่สอดคล้องกับกราฟที่ได้คือ

$$V(t) = A\left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right) \tag{2.1}$$

โดยที่ A คือ แรงดันสูงสุดของรูปคลื่น, α และ β คือ ค่าคงที่เชิงเวลาจากผลเฉลยสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง 2 สมการ (ในที่นี้กำหนดเป็นค่าบวก)



รูปที่ 2.3: รูปแสดงฟังก์ชันเลขชี้กำลังคู่ในส่วนหน้าคลื่น, หลังคลื่น และรูปคลื่นดลฟ้าผ่าสมบูรณ์ ที่เป็นไปตามทฤษฎี

2.2 รูปคลื่นมาตรฐานและการวิเคราะห์รูปคลื่นตามมาตรฐาน

ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 และ IEC 1083-2 ได้กำหนดรูปแบบของรูปคลื่นมาตรฐาน พารามิเตอร์ที่ต้องทำการคำนวณ (เวลาหน้าคลื่น เวลาหลังคลื่น ฯลฯ) ขั้นตอนในการคำนวณ รวมถึงแบบจำลองที่สนับสนุนให้ใช้ สำหรับโปรแกรมในการประมวลผล และรายละเอียดเพิ่มเติมสำหรับซอฟท์แวร์จะปรากฏอยู่ใน IEC 1083-2 พร้อมทั้งโปรแกรมสร้างรูปคลื่นจำลองเพื่อทดสอบซอฟท์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น สำหรับรายละเอียดในการเก็บข้อมูลจากห้องทดลอง วิธีการวัดและสังเกต รวมไปถึงการดูแลเครื่องมือต่างๆ นั้นจะถูกกล่าวถึงไว้ใน IEC 60060-2 ซึ่งนิยามของคุณลักษณะการทดสอบบางประการ ก็จะนำมาใช้ขยายความนิยามของมาตรฐานทั้ง 2 คือ IEC60060-1 และ IEC1083-2 ด้วย ในมาตรฐานดังกล่าว ได้กำหนดนิยามและชนิดของรูปคลื่นไว้ดังนี้

1. รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม (Full lightning impulse)
2. รูปคลื่นฟ้าผ่าสับ (Lightning impulse chopping)
3. รูปคลื่นฟ้าผ่าสวิตชิ่ง (Lightning impulse switching)

และยังสามารถจำแนกตามลักษณะเพิ่มเติม (Imposing) ซึ่งหมายถึงสภาวะพิเศษที่สามารถเกิดร่วมกับรูปคลื่นทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวได้ 3 แบบ คือ

1. การแกว่ง (Oscillation) คือ ลักษณะของรูปคลื่นดลฟ้าผ่าที่ประกอบด้วยลักษณะฟังก์ชันเชิงไซน์บริเวณยอดคลื่น อันเนื่องมาจากสภาพธรรมชาติของวัสดุทดสอบ แต่ในรูปคลื่นมาตรฐานปรากฏการณ์ในส่วนนี้ จะเป็นลักษณะที่ถูกกำเนิดโดยรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีส่วนประกอบของฟังก์ชันแบบเกาส์ (Gaussian function) ตามที่เสนอในงานของ T. R. McComb et al. [10]
2. ส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) เป็นส่วนต่างของแรงดันระหว่างรูปคลื่นประดิษฐ์กับรูปคลื่นจริง
3. การรบกวน (Noise) คือ สัญญาณที่เข้าสู่ระบบทดสอบ เป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการ และในที่งานวิจัยนี้จะอนุมานว่าเป็นการรบกวนแบบเกาส์เซียน

2.2.1 รูปคลื่นดลฟ้าผ่าเต็ม

แรงดันดลซึ่งมี **หน้าคลื่นน้อยกว่า** $20\mu s$ มีลักษณะไม่เป็นคาบ และไม่เกิดการคายประจุผ่านฉนวนของวัสดุทดสอบหรือเกิดเบรกดาวน์ในวัสดุทดสอบนั้น โดยรูปคลื่นจะมีการเพิ่มขึ้นของแรงดันอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาที่สั้นในระดับไมโครวินาที และจะลดลงด้วยอัตราที่ช้ากว่า จนกระทั่งแรงดันเข้าสู่ 0 ในที่สุด บริเวณที่แรงดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเรียกว่า **หน้าคลื่น** และส่วนที่แรงดันลดลงแล้วนั้นจะเรียกว่า **หลังคลื่น** หรือ **หางคลื่น** และบริเวณที่คลื่นมีแรงดันสูงสุดจะเรียก **ยอดคลื่น**

แรงดันยอดคลื่น (Peak voltage), V_p

แรงดันขณะที่รูปคลื่นมีขนาดของแรงดันสูงสุด ก่อนที่จะเริ่มลดลง แรงดันดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับขนาดของแรงดัน U_0 ตามรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นแรงดันทดสอบ สำหรับกรณีที่รูปคลื่นทดสอบมีขนาดของความถี่การแกว่งบริเวณยอดมากกว่า 500 kHz แรงดันสูงสุดในกรณีนี้ จะหมายเอาแรงดันสูงสุดของรูปคลื่นที่ประดิษฐ์ได้ ซึ่งการพิจารณาแรงดันสูงสุดมีความสำคัญมากต่อการคำนวณพารามิเตอร์อื่นๆ ที่จะกล่าวถึงต่อไป หากกรรมวิธีใดประดิษฐ์รูปคลื่นส่วนยอดไม่ดี (เช่น การใช้แบบจำลองพหุนาม แล้วคำนวณสัมประสิทธิ์ด้วยกรรมวิธีเชิงเส้น) พารามิเตอร์อื่นๆ ก็มีโอกาสไม่แม่นยำตามไปด้วย สัญกรณ์ที่ใช้แทนค่าของยอดคลื่นคือ V_p

เวลายกตัว (Raising time), t_r

ช่วงเวลาที่นับจากขณะที่แรงดันกำลังเพิ่มขึ้นจาก 30% ของแรงดันยอดคลื่น จนกระทั่งถึงขณะที่แรงดันเป็น 90% ของแรงดันยอดคลื่น เวลายกตัวนี้เป็นผลมาจาก การถ่ายเทประจุทดสอบผ่านสปาร์กแก็ปเข้าสู่ตัวเก็บประจุ C_L พารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะวัดจากบริเวณหน้าคลื่น ซึ่งระดับความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันยอดคลื่น มีสัญกรณ์เป็น t_r

เวลาหน้าคลื่น (Front time, T_1**)**

พารามิเตอร์เสมือน นิยามโดย $\frac{1}{0.6}$ ของเวลายกตัว ($\frac{1}{0.6}t_r$) เป็นเวลาสมมุติที่เปรียบเสมือนตัวแทนของเวลาที่แรงดันใช้เวลาในการยกตัวจนมีขนาดสูงสุด เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งตามตารางที่ 2.2 ซึ่งอ้างอิงมาจากมาตรฐาน IEC1083-2 และซอฟท์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นควรจะต้องประเมินพารามิเตอร์นี้ให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด สัญกรณ์กำหนดให้เป็น T_1

จุดเริ่มต้นเสมือน (Virtual origin), O_1

จุดบนแกนเวลาซึ่งเกิดจากการลากเส้นตรงผ่านจุดที่มีแรงดันเป็น 0.3 และ 0.9 แรงดันทดสอบมาตัด ดังรูปที่ 2.4 (จุด O_1 เกิดจากเส้นตรงที่ลากผ่านจุด A และ B) จุดเริ่มต้นดังกล่าวจะเป็นเวลาสมมุติที่ถือว่า แรงดันดลฟ้าผ่าจะไม่เป็น 0 นับจากจุดนี้ พารามิเตอร์ดังกล่าวไม่ได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐานว่าจะต้องมีค่าเป็นเท่าใด **แต่** มีส่วนสำคัญในการคำนวณ**เวลาหลังคลื่น** สัญกรณ์ที่ใช้คือ O_1

เวลาหลังคลื่น (Time to half), T_2

พารามิเตอร์เสมือนที่เป็นช่วงเวลานับจากจุดเริ่มต้นเสมือน (O_1) ไปจนถึงเวลาที่แรงดันลดลงเหลือเป็น $0.5V_p$ เป็นพารามิเตอร์สำคัญอีกตัวหนึ่งเช่นเดียวกับเวลาหน้าคลื่น ที่มาตรฐานกำหนดสัญกรณ์กำหนดเป็น T_2 โดยพารามิเตอร์ทั้ง 5 ตัวที่กล่าวมานี้ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.4 นิยามที่กล่าวมาบางข้อ จะใช้ประกอบการพิจารณารูปคลื่นสวิตชิ่งด้วย

2.2.2 รูปคลื่นดลสวิตชิ่ง (Switching-impulse voltage)

รูปคลื่นซึ่งมีเวลาหน้าคลื่นมากกว่า $20\mu s$ เวลาสำหรับรูปคลื่นสวิตชิ่งจะอยู่ในระดับมิลลิวินาที (ms) และการคำนวณพารามิเตอร์จะอ้างอิงจากรูปคลื่นจริง ดังนั้นนิยามของพารามิเตอร์จึงแตกต่าง

จากกรณีรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม ดังนี้

จุดเริ่มต้นจริง (True origin), O

จุดซึ่งแรงดันของรูปคลื่นเปลี่ยนจาก 0 มาเป็นบวก แล้วเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงแรงดันสูงสุด พารามิเตอร์นี้ต่างจากจุดเริ่มต้นเสมือนเนื่องจากไม่ได้คำนวณจากเวลายกตัว

เวลาหน้าคลื่น

ในกรณีของรูปคลื่นสวิตซิ่ง มาตรฐาน IEC60060-1 ไม่ได้กำหนดไว้ ในที่นี้จะใช้ตามนิยามกรณีรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มคือ $\frac{1}{0.6}$ ของเวลายกตัว และใช้นิยามของเวลายกตัวตามแบบของรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม ซึ่งถ้าพิจารณาดังรูปที่ 2.5 เวลายกตัว T_{AB} และเวลาหน้าคลื่นจะคำนวณจาก $\frac{1}{0.6}T_{AB}$

เวลาหลังคลื่น

ช่วงเวลาที่เริ่มต้นวัดจากจุดเริ่มต้นจริง ซึ่งมีแรงดันเป็น 0 จนกระทั่งถึงจุดเวลาที่แรงดันลดลงจากแรงดันยอดคลื่นมาเหลือเพียงครึ่งหนึ่ง ตามรูปที่ 2.5 คือพารามิเตอร์ T_2

แม้ว่าในงานวิจัยฉบับนี้ จะมิได้มุ่งเน้นไปที่การทดสอบรูปคลื่นดลสวิตซิ่ง เนื่องจากช่วงเวลาอยู่ในระดับมิลลิวินาทีและมีหางคลื่นยาวกว่ากรณีฟ้าผ่าเต็มก็ตาม แต่เพื่อเป็นการพิจารณาถึงสมรรถนะและเพื่อการทำความเข้าใจต่อกรรมวิธีจึงได้ทำการทดลองกับรูปคลื่นชนิดดังกล่าวนี้ด้วย

2.2.3 เกณฑ์การวิเคราะห์รูปคลื่นโดยซอฟท์แวร์ตามมาตรฐาน

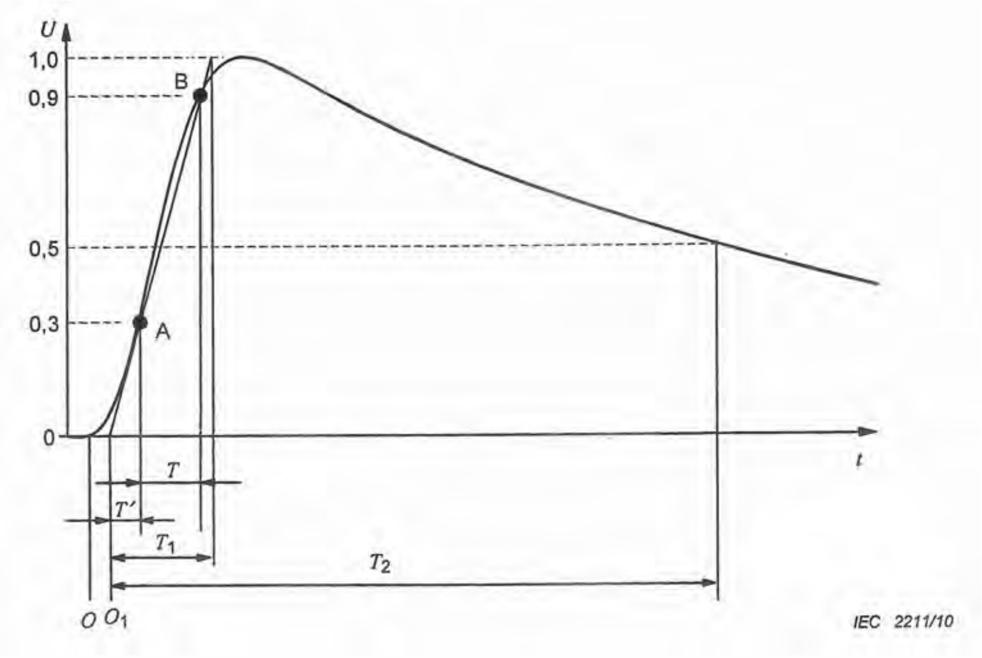
มาตรฐาน IEC1083-2 (1996) ได้กำหนดหลักเกณฑ์เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์รูปคลื่นดลฟ้าผ่าโดยซอฟท์แวร์ และเพื่อประกอบการประเมินกับโปรแกรมทดสอบซึ่งเป็นส่วนแนบท้ายมาตรฐาน IEC1083-2 ไว้ดังนี้

- ความถี่หลักมากกว่า 0.5 MHz
- ช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินน้อยกว่า 1 μs
- ขนาดของส่วนพุ่งเกินหรือการแกว่งใกล้กับบริเวณยอดไม่เกิน 5% ของค่ายอด

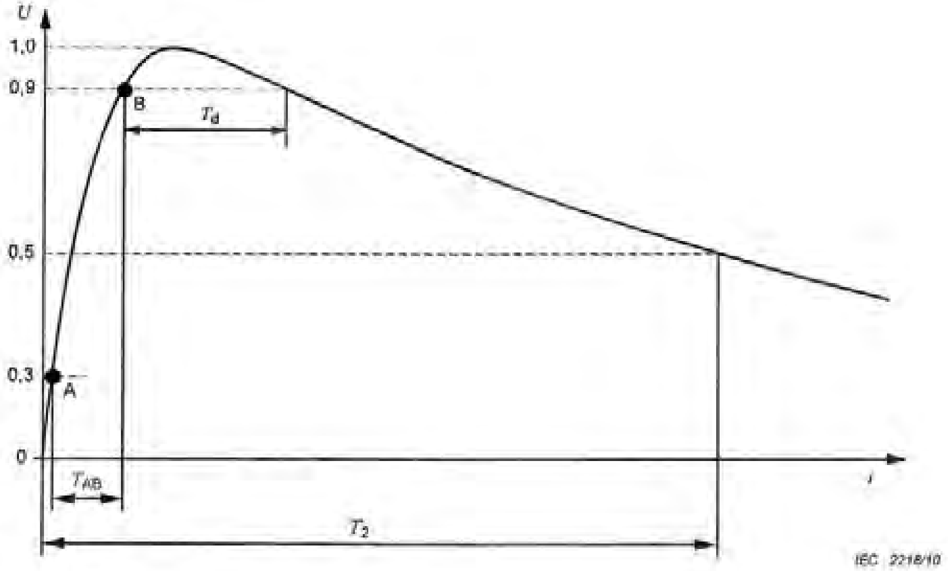
ลักษณะตัวอย่างรูปคลื่นตามมาตรฐาน IEC1083-2 แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 เป็นรูปคลื่นที่มาตรฐานแนะนำเกณฑ์ที่เหมาะสม สามารถจำแนกได้ชัดเจนโดยซอฟท์แวร์ เพื่อให้ซอฟท์แวร์ประเมินได้ถูกต้อง อีกทั้งเป็นรูปคลื่นที่สามารถสร้างได้จากโปรแกรมทดสอบ แต่สำหรับกรณีหม้อแปลง การบิดเบี้ยวจะเกิดขึ้นเนื่องด้วยวงจรจะมีตัวเหนี่ยวนำประกอบอยู่ด้วย ซึ่งรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบมักจะปรากฏในแบบใดแบบหนึ่งดังรูปที่ 2.7

2.2.4 โปรแกรมสำหรับทดสอบซอฟท์แวร์

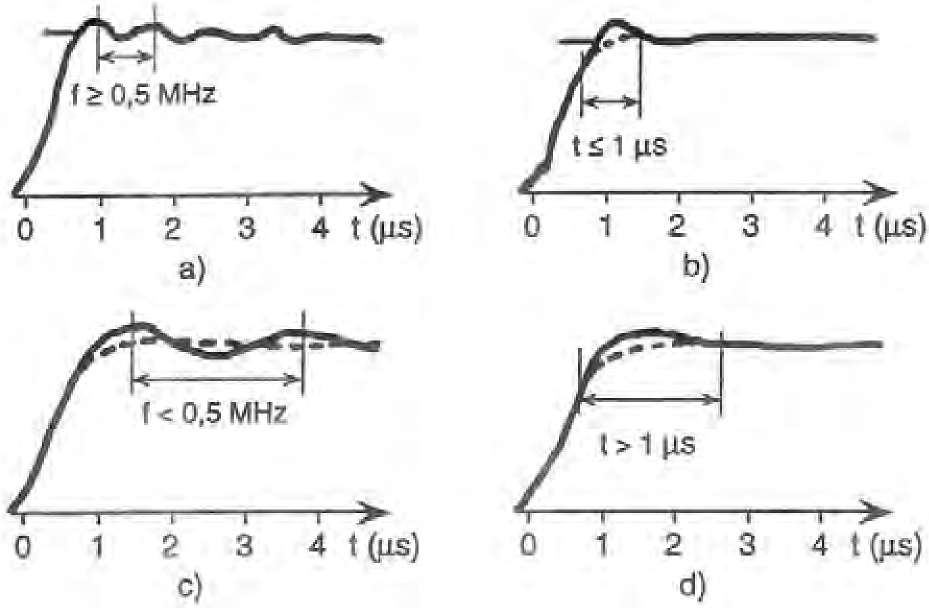
สำหรับซอฟท์แวร์ที่เขียนขึ้นเพื่อนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการต่างๆ ก่อนนำไปประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นดลฟ้าผ่าจะต้องผ่านการทดสอบด้วยโปรแกรม ซึ่งถือเป็นส่วนแนบท้ายของมาตรฐาน IEC



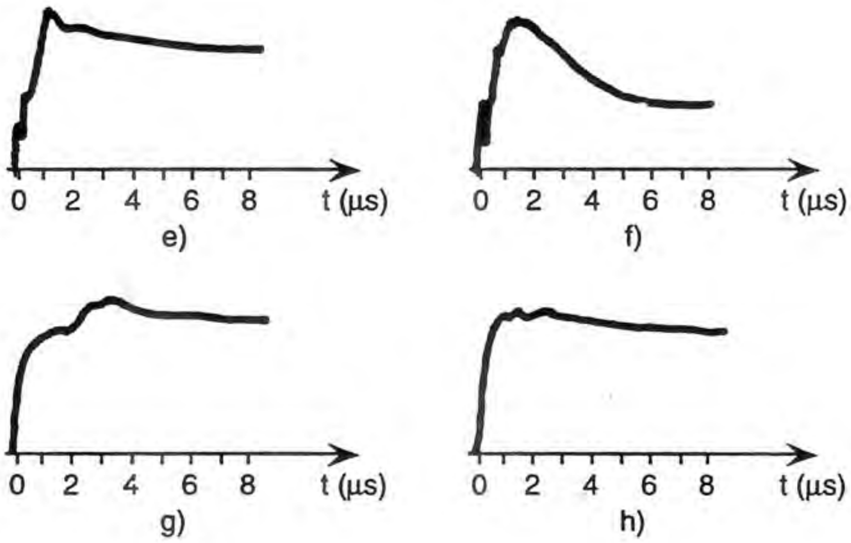
รูปที่ 2.4: รูปแสดงความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ ของรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม



รูปที่ 2.5: รูปแสดงพารามิเตอร์ของรูปคลื่นสวิตชิ่ง



รูปที่ 2.6: รูปคลื่นที่แนะนำในการวิเคราะห์ในมาตรฐาน IEC1083-2 ([3])



รูปที่ 2.7: รูปคลื่นที่มาตรฐาน IEC1083-2 ไม่ได้แนะนำกรรมวิธีในการจำแนกให้ ([3])

1083-2 โปรแกรมดังกล่าวคือ **Test Data Generator (TDG)**

Test Data Generator (TDG)

TDG เป็นโปรแกรมสำหรับกำเนิดรูปคลื่นอ้างอิงที่กำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์ที่ถูกต้องมาให้แล้ว ข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นมีสกุลเป็น .dat สามารถแสดงได้ในโปรแกรม Microsoft excel ประกอบด้วยข้อมูล 2 ชุด คือชุดข้อมูลของเวลา (อยู่ในระดับ μs สำหรับกรณีฟ้าผ่าเต็ม และ ms สำหรับกรณีสวิตซิ่ง) และชุดข้อมูลของแรงดัน (อยู่ในระดับ MV) ซึ่งทั้ง 2 จะสัมพันธ์กัน และข้อมูลที่ได้จะเป็นแบบวิยุต รูปคลื่นสามารถจำแนกได้ 3 หมวดคือ

1. รูปคลื่นเชิงวิเคราะห์ (Analytical defined impulses) เป็นรูปคลื่นที่ปราศจากการรบกวน (Noise) แต่อาจมีการแกว่ง เป็นรูปคลื่นเรียบ มีอยู่ 5 กรณี
2. รูปคลื่นเชิงวิเคราะห์ชนิดมีการรบกวน คือรูปคลื่นเรียบ 5 กรณีดังกล่าว ที่มีการรวมการรบกวนเข้าไป จำนวนของรูปคลื่นชนิดนี้ จะมีเท่ากันกับรูปคลื่นเชิงวิเคราะห์
3. รูปคลื่นซึ่งถูกบันทึกภายใต้เงื่อนไขปรกติ เป็นรูปคลื่นที่เสมือนการทดลองจริง อาจจะมีสัณฐานของรูปคลื่นแตกต่างจาก 5 กรณีแรกไปมาก (ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เพื่ออ้างอิงกับซอฟท์แวร์ทดสอบ ส่วนรูปคลื่นจริงที่ใช้คือรูปคลื่นทดสอบจากหม้อแปลง)

2.2.5 ความถูกต้องของซอฟท์แวร์ (Software validation)

ถ้าหากซอฟท์แวร์ที่เขียนขึ้น ประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นในกลุ่มใดผ่านก็จะต้องประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นทุกหมวดในกลุ่มนั้นผ่านทั้งหมด เช่น ถ้าหากประเมินพารามิเตอร์ T_1 ผ่านสำหรับกลุ่ม LI (Full Lightning impulse กรณีที่ 1) จะต้องประเมินหมวดที่ 1 และหมวดที่ 6 ผ่านทั้ง 2 หมวด (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 2.2.6) เป็นต้น

2.2.6 การจัดกลุ่มและหมวดหมู่ของรูปคลื่นอ้างอิง (Classification of reference waveforms)

กลุ่มของรูปคลื่นดลสามารถแสดงได้ดังนี้

LI	-	Lightning impulse
LIC	-	Lightning impulse, chopped
LIFO	-	Lightning impulse with front oscillations
LICFO	-	Lightning inpulse with front oscillations, chopped
LILO	-	Lightning impulse with long duration overshoot
LISO	-	Lightning impulse with short duration overshoot
LISL	-	Lightninh impulse with slow oscillations
LIFA	-	Lightning impulse with fast oscillations
SI	-	Switching impulse
CI	-	Current impulse

จากตารางที่ 2.1 เป็นการจัดหมวดหมู่ของรูปคลื่นดล ในแต่ละกลุ่มจะมี 2 หมวดคือ หมวด

รูปคลื่นเรียบไร้การรบกวน กับหมวดที่มีการรบกวน สำหรับรูปคลื่นแต่ละหมวดที่ถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรม TDG นั้นจะมีการระบุค่าขอบเขตของพารามิเตอร์ที่ถูกต้องสอดคล้องกับมาตรฐานเอาไว้ด้วย ดังตารางที่ 2.2 รูปคลื่นดลฟ้าผ่ากรณีต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก

กลุ่มของรูปคลื่น	รูปคลื่นวิเคราะห์ (Analytic)		รูปคลื่นบันทึกภายใต้เงื่อนไขทดสอบปรกติ (Recorded under normal test conditions)
	รูปคลื่นเรียบ	รูปคลื่นมีการรบกวน	
LI	1	6	-
LIC	2	7	-
LIFO	-	-	11
LICFO	-	-	12
LILO	-	-	13
LISO	-	-	14
LISL	3	8	-
LIFA	4	9	-
SI	5	10	-
CI	-	-	15

ตารางที่ 2.1: ตารางแสดงการจัดหมวดหมู่รูปคลื่น

กลุ่มของรูปคลื่น	หมวดรูปคลื่น	ค่ายอด (MV)	T_1/T_p (μs)	T_2/T_p (μs)	ขนาดของยอดคลื่น/การแกว่ง/ส่วนพุ่งเกิน (kHz/μs/ %V_p)
LI	1,6	1.04 - 1.06	0.81 - 0.87	57.5 - 62.5	-
LIC	2,7	0.86 - 0.88	0.49 - 0.53	0.55 - 0.59	-
LIFO	11	0.94 - 0.96	1.07 - 1.19	82 - 91	-
LICFO	12	0.84 - 0.87	0.48 - 0.54	0.51 - 0.56	-
LILO	13	(-1.08) - (-1.06)	3.40 - 3.76	56 - 62	$\tau > 1\mu s$ $\beta > 5\%$
LISO	14	(-0.97) - (-0.95)	1.85 - 2.05	43 - 47	$\tau < 1\mu s$ $\beta > 5\%$
LISL	3,8	1.04 - 1.06	1.6 - 1.7	45 - 49	$f < 500$kHz $A \leq 5\%$
LIFA	4.9	0.96 - 0.99	1.0 - 1.1	48 - 52	$f > 500$kHz $A > 5\%$
SI	5,10	0.94 - 0.96	240 - 260	2400 - 2600	-
CI	15	(-10.1) - (-9.9)	8.3 - 9.2	20 - 22	-

ตารางที่ 2.2: ตารางแสดงขอบเขตของพารามิเตอร์

2.3 ระเบียบวิธีและขั้นตอนในการวิเคราะห์รูปคลื่นโดยซอฟท์แวร์

ในมาตรฐาน IEC60060-1 (2010) ภาคผนวก B (Annex B) ได้แสดงขั้นตอนการประเมินรูปคลื่นดลฟ้าผ่าไว้ 17 ขั้นตอน แต่การใช้ซอฟท์แวร์ประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแบบอัตโนมัติซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกรรมวิธีตามมาตรฐาน IEC1083-2 เป็นหลัก 17 ขั้นตอนดังกล่าวไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ในแนวทางนี้ เพราะมาตรฐานไม่ได้ระบุรายละเอียดว่า จะสร้างอย่างไร โดยกรรมวิธีของคาลมานจะต้องมีการให้ค่าเริ่มต้น ซึ่งบริเวณตามที่มาตรฐานกำหนดเป็นส่วนของยอดคลื่น การใช้ตัวกรองคาลมานอาจให้ผลที่ไม่ดีนัก โดยเฉพาะตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานที่ต้องการค่าเริ่มต้นที่มีความถูกต้องสูง ต้องมีการสร้างส่วนหางคลื่นขึ้นมาก่อน ดังนั้นจึงอาศัยงานวิจัยของ Pérez et al. [11] ซึ่งวิเคราะห์รูปคลื่นโดยใช้ตัวกรองคาลมานขยายและพารามิเตอร์ที่ประเมินได้โดยวิธีนี้ เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน งานวิจัยดังกล่าวมีหลักเกณฑ์การวิเคราะห์รูปคลื่นดลและนิยามสำคัญดังนี้

- Mean curve without overshoot (MCWO) คือ รูปคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นโดยนำเอาส่วนพุ่งเกินออกไปแล้วหรือรูปคลื่นซึ่งปราศจากส่วนพุ่งเกิน
- Mean curve with overshoot (MCO) คือ รูปคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นโดยมีส่วนพุ่งเกินอยู่

ขั้นตอนในการวิเคราะห์จะดำเนินการดังนี้ [11]

1. สร้างรูปคลื่นเฉลี่ย (Mean curve) ขึ้นมาเพื่อตรวจสอบขนาดของการแกว่ง หากความถี่โตสุดมีขนาดมากกว่า 5% ของค่ายอด ให้ถือว่าไม่ได้มาตรฐาน ให้หยุดดำเนินการ หากไม่ใช่ให้ดำเนินการต่อ
2. สร้างรูปคลื่น MCO หากว่ารูปคลื่นนี้ไม่มีส่วนพุ่งเกิน ให้คำนวณพารามิเตอร์ทุกอย่างจากรูปคลื่นนี้ แล้วหยุดดำเนินการ หากไม่ใช่ให้ดำเนินการต่อ
3. สร้างรูปคลื่น MCWO ขึ้นมา แล้วคำนวณ **ช่วงเวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน (Duration of overshoot)** และ **ขนาดของส่วนพุ่งเกิน** หากรูปคลื่นชนิดใดใน 2 รูปคลื่นนี้ได้ขนาดส่วนพุ่งเกินมากกว่า 5% ของค่ายอดให้ถือว่ารูปคลื่นไม่ตรงตามมาตรฐานการทำงานยุติ หากไม่ใช่ ให้คำนวณขนาดของการแกว่ง หากขนาดของการแกว่งมากกว่า 5% ของค่ายอดก็ให้ถือว่าไม่เป็นไปตามมาตรฐานด้วย แต่ถ้าไม่ใช่ดังที่กล่าวมาทั้งหมด ให้ดำเนินการต่อ
4. หากช่วงเวลาการเกิดส่วนพุ่งเกินมากกว่า $1\mu s$ ให้คำนวณพารามิเตอร์ทุกอย่างจาก MCO ถ้าไม่ใช่ให้คำนวณพารามิเตอร์ทุกอย่างจาก MCWO

2.3.1 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท (Levenberg-Marquardt method)

วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทถือว่าเป็นวิธีไม่เชิงเส้น อยู่ในวิชาว่าด้วยการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) อาศัยขั้นตอนทางคณิตศาสตร์ที่จะลดความผิดพลาดกำลังสองให้มีค่าน้อยที่สุด โดยวิธีการดังกล่าวจะเริ่มจากการกำหนดฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าเหมาะสมสุดเป็น

$$f(x)$$

และต้องการจะหาค่าของ x^* ซึ่งจะทำให้

$$E(x) = \epsilon^T \epsilon$$

มีค่าน้อยที่สุด โดยที่

$$\epsilon(x) = f(x) - \bar{f} \tag{2.2}$$

$$E(x) = \epsilon^T \epsilon \tag{2.3}$$

$$= (f(x) - \bar{f})^T (f(x) - \bar{f}) \tag{2.4}$$

เรียก $E(x)$ ว่าฟังก์ชันสูญเสีย (Cost function) เป็นฟังก์ชันชนิด ฟังก์ชันค่าจริง (Real value function) และ f คือ ค่าที่ถูกต้องของ $f(x)$ เมื่อ $x \to x^*$ หรืออาจเขียนได้ว่า

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} E(x)$$

สมมุติให้มีฟังก์ชัน $g(x)$ ซึ่ง

$$E(x) \approx g(x) = E(x^{(k)}) + \mathbf{D}E(x^{(k)})(x - x^{(k)}) + \frac{1}{2}(x - x^{(k)})^T F(x^{(k)})(x - x^{(k)}) \tag{2.5}$$

โดยวิธีของนิวตัน จะได้

$$0 = \nabla g(x) = \left(\mathbf{D}E(x^{(k)}) + \frac{1}{2}(x - x^{(k)})^T (F^T + F)\right)^T \tag{2.6}$$

ถ้าหาก F เป็นเมทริกซ์สมมาตรจะได้ว่า

$$0 = \nabla g(x) = \nabla E(x^{(k)}) + F(x - x^{(k)}) \tag{2.7}$$

สร้างเป็นสมการที่ใช้ในการวนรอบหาคำตอบได้เป็น

$$x \equiv x^{(k+1)} = x^{(k)} - F^{-1} \nabla E(x^{(k)}) \tag{2.8}$$

โดยเปรียบเทียบกับการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ ทำให้ทราบว่า

$$F(x) \equiv H(x) = \mathbf{D}^2 E(x) \tag{2.9}$$

เรียก $H(x)$ ว่า เฮสเซียนของฟังก์ชัน $E(x)$ (Hessian of $E(x)$)

กลับมาพิจารณาฟังก์ชัน $E(x)$ เพื่อหา $H(x)$ เข้าไปแทนในสมการที่ 2.8 ดังนี้
หาอนุพันธ์อันดับ 1 ของ $E(x)$

$$\mathbf{D}E(x) = \mathbf{D}(\epsilon^T\epsilon) \tag{2.10}$$

$$= \epsilon^T\mathbf{D}\epsilon + \left(\mathbf{D}\epsilon^T\right)\epsilon \tag{2.11}$$

$$= \epsilon^T\mathbf{D}\epsilon + (\mathbf{D}\epsilon)^T\epsilon \tag{2.12}$$

$$= 2\epsilon^T\mathbf{D}\epsilon \tag{2.13}$$

เมื่อ $\epsilon(x)$ เป็น เวกเตอร์ฟังก์ชัน (Vector function) เรานิยามอนุพันธ์อันดับ 1 ของ $\epsilon(x)$ ดังนี้

$$J(x) = \mathbf{D}\epsilon(x) \tag{2.14}$$

และเรียก $J(x)$ ว่า จาโคเบียนของ $\epsilon(x)$ (Jacobian of vector function $\epsilon(x)$)
ในสมการที่ 2.8 ต้องการอนุพันธ์อันดับ 2 (เฮสเซียน) จึงอาศัยสมการที่ 2.13 นำมาหาอนุพันธ์ซ้ำ ดังนี้

$$\mathbf{D}\nabla E(x) \triangleq \mathbf{D}^2E(x) = 2J^T\mathbf{D}\epsilon + 2\mathbf{D}\left(J^T\right)\epsilon \tag{2.15}$$

$$= 2J^TJ + 2S(x)\epsilon \tag{2.16}$$

โดยให้ $S(x) = \mathbf{D}\left(J^T\right)$ นำค่าที่ได้ไปแทนใน 2.8 ได้

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \frac{1}{2}\left(J^TJ + S(x)\epsilon\right)^{-1}\nabla E(x^{(k)}) \tag{2.17}$$

$$= x^{(k)} - \left(J^TJ + S(x)\epsilon\right)^{-1}J^T\epsilon \tag{2.18}$$

โดยปรกติ ค่าของ $J^TJ + S(x)\epsilon$ จะต้องนิยามบวกเสมอ เพื่อให้ค่าปรับปรุงลู่เข้าสู่คำตอบ (Descent to solution) เพื่อให้ดังกล่าวคำนวณได้ง่าย และนิยามบวกเสมอ จึงแก้ไขให้ $S(x)\epsilon = \lambda I_n$ เพราะเหตุที่ว่า $S(x)\epsilon$ จะมีค่าน้อยๆ เสมอ โดยการแก้ไขนี้ กำหนดว่า λ เป็นค่าบวกน้อยๆ ที่เหมาะสม เราสามารถเขียนสมการที่ 2.18 ได้ใหม่ในรูป

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \left(J^TJ + \lambda I_n\right)^{-1}J^T\epsilon \tag{2.19}$$

เรียกสมการที่ 2.19 ว่า สมการหาค่าเหมาะสมสุดโดยวิธีของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท (Levenberg - Marquardt method) ในงานวิจัยนี้จะให้

- $f(x)$ คือ ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง และ
- $\bar{f}$ คือ ค่าที่สังเกตได้ณ ขณะใดๆ ที่สัมพันธ์กับ $f(x)$

ขั้นตอนวิธีในการดำเนินการสำหรับวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท [14]
คำนวณค่าเริ่มต้น $x^{(0)}$ (สำหรับการวนซ้ำรอบที่ k ใดๆ จะแทน x_0 ด้วย x_k) และ $\lambda_0 = 0.01$

1. คำนวณ $E(x^{(k)})$ ($E(x^{(0)})$ ในรอบแรกสุด)

2. คำนวณค่า $J(x^{(k)})$ (เป็น $J(x^{(0)})$ สำหรับรอบแรกสุด)

3. แทนใน $\left(J^T J + \lambda I_n\right)^{-1} J^T \epsilon$

4. คำนวณค่า $x^{(k+1)}$ (เป็น $x^{(1)}$ ในรอบแรกสุด) โดยอาศัยสมการที่ 2.19

5. พิจารณาค่าของ $E(x^{(k+1)})$ และ $E(x^{(k)})$ ถ้าหาก

   (a) $E(x^{(k+1)}) < E(x^{(k)})$ ให้

   - $x_{\text{new}} = x_{\text{old}}$
   - $\lambda_{\text{new}} = 0.1\lambda_{\text{old}}$
   - ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2

   (b) $E(x^{(k+1)}) > E(x^{(k)})$ ให้

   - $\lambda_{\text{new}} = 10\lambda_{\text{old}}$
   - ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4

2.3.2 วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน (Unscented kalman filter)

วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานถือว่า เป็นกรรมวิธีไม่เชิงเส้นเช่นเดียวกับวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท เพียงแต่แนวคิดพื้นฐานแตกต่างกัน เลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทเป็นกรรมวิธีที่ทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยสุดตามระเบียบวิธีกำลังสองน้อยสุดของเกาส์ (Least square principle - optimal noise) แต่วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน (แม้แต่ตัวกรองอื่นๆ ในกรอบงานคาลมานก็มีลักษณะเช่นนี้) เป็นการสร้างอัตราขยาย (Gain K) ที่จะไปปรับปรุงตัวแปรสถานะให้มีความแปรปรวนน้อยสุด (Optimal control) จึงต้องอาศัยตัวแปรเริ่มต้น (x_0) เหมือนกับวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท แต่ ต้องมี**ความแปรปรวน**ด้วย เพราะกลไกสำคัญในการปรับปรุงตัวแปรสถานะต้องอาศัยความแปรปรวนรูปแบบสมการสถานะแบบวิยุต สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x_k &= f(x_{k-1}) + w_k \\ y_k &= g(x_k) + v_k \end{aligned} \tag{2.20}$$

ในการประเมินรูปคลื่นดลฟ้าผ่า เราสามารถพิจารณาว่าการรบกวนอยู่ในรูป **บวกเข้า** เพื่อความสะดวกต่อการพิจารณาและการเขียนโปรแกรม (ในการประยุกต์รูปสมการ 2.21 ให้สอดคล้องกับรูป

คลื่นดลฟ้าผ่า ตามงานวิจัยของ Pérez et al. [12] ก็เสนอในรูปอย่างบวกเช่นเดียวกัน) เมื่อแสดงรูปแบบทั่วไปของสมการสถานะแล้ว ขั้นตอนต่อจากนี้ไปจะได้เสนอเกี่ยวกับหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานต่อไป

2.3.2.1 การแปลงอันเซนท์เท็ท (Unscented transformation)

ก่อนจะเริ่มในส่วนของตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน จำเป็นจะต้องกล่าวถึง 2 เรื่องสำคัญก่อนนั่นคือ **การแปลงอันเซนท์เท็ท (Unscented transformation)** และ **จุดซิกม่า (Sigma points)** ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการแปลงอันเซนท์เท็ทก่อน ดังนี้
กำหนดให้มีการแปลง

$$y = h(x) \tag{2.21}$$

ให้ตัวแปรสถานะ x มีค่าเฉลี่ยเป็น $\bar{x}$ และความแปรปรวนเป็น P สิ่งที่ต้องการคือ **ค่าเฉลี่ยของ** y **หรือ** $\bar{y}$ **โดยที่ทราบ** $\bar{x}$ หรืออาจจะแสดงได้ว่า

$$\bar{x} \longrightarrow \bar{y}$$

แต่ในความเป็นจริง เราไม่อาจทราบ $\bar{y}$ ได้ ดังนั้นจึงต้องหาความเชื่อมโยงระหว่าง $\bar{x}$ และ $\bar{y}$ ให้ได้โดยการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์

$$\bar{y} = h(\bar{x}) + \frac{1}{2!}E[\mathbf{D}_{\tilde{x}}^2 h] + \frac{1}{4!}E[\mathbf{D}_{\tilde{x}}^4 h] + \cdots \tag{2.22}$$

ในสมการที่ 2.22 จะเห็นได้ว่า การจะให้ $\bar{x}$ กลายเป็น $\bar{y}$ ต้องอาศัยนิพจน์ $\frac{1}{2!}E[\cdot] + \cdots$ เข้าช่วย จึงอาศัยการเลือกจุดที่เหมาะสม ซึ่งจะต้องรักษาความแม่นยำของการแปลงและทำให้การกระจายนี้ถูกต้องมากที่สุด (อย่างน้อยในนิพจน์อันดับ 2 ควรจะถูกต้อง)

2.3.2.2 จุดซิกม่า (Sigma points)

เพื่อให้ $\bar{x} \longrightarrow \bar{y}$ มากที่สุด จะมีวิธีการเลือกจุดซึ่งต่อไปจะเรียกว่าจุดซิกม่า โดยให้ $\bar{x}$ เป็นค่าเฉลี่ยของ x ที่ทราบค่า และ P เป็นความแปรปรวนของ x ในขณะที่มีค่าเฉลี่ยเป็น $\bar{x}$ จะสามารถเลือกจุดซิกม่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x^{(i)} &= \bar{x} + \left(\sqrt{nP_i}\right)^T \\ x^{(i+n)} &= \bar{x} - \left(\sqrt{nP_i}\right)^T \end{aligned} \tag{2.23}$$

เมื่อ $i = 1, 2, \ldots, n$ และ $\sqrt{P}_i$ คือ รากที่ 2 ของเมทริกซ์ P แล้วคัดเฉพาะแถวที่ i มาดำเนินการเพื่อความยืดหยุ่นยิ่งขึ้น จะปรับปรุงวิธีการเลือกดังกล่าวนี้ด้วยสมการ

$$
\begin{aligned}
x^{(0)} &= \bar{x} \\
W^{(0)} &= W^{(0)} \\
W^{(i)} &= W^{(i+n)} = \frac{1 - W^{(0)}}{2n} \\
x^{(i)} &= \bar{x} + \left(\sqrt{\frac{n}{1 - W^{(0)}} P}\right)_i^T \\
x^{(i+n)} &= \bar{x} - \left(\sqrt{\frac{n}{1 - W^{(0)}} P}\right)_i^T
\end{aligned} \tag{2.24}
$$

โดยวิธีเลือกเช่นนี้จะมีตัวแปรอิสระให้ปรับค่าได้ตามความเหมาะสมคือ $W^{(0)}$ คือ น้ำหนักเริ่มต้นงานวิจัยนี้จะให้เป็น 2/3 เพราะกำหนดให้การรบกวนเป็นแบบเกาส์ และสำหรับ $W^{(i)}$ ใดๆ จะเป็นน้ำหนักของจุดที่ i ขั้นตอนนี้จะมีจุดทั้งหมด $2n + 1$ จุด และเรียกวิธีการเลือกในสมการที่ 2.24 หรือสมการที่ 2.23 ว่า **การเลือกจุดซิกม่าแบบสมมาตร (Symmetric sigma-point selection)** อาศัยการเลือกตามสมการ 2.23 หรือสมการ 2.24 จะทำให้สมการที่ 2.22 ประมาณได้แม่นยำถึงนิพจน์**อันดับที่ 2** ขั้นตอนต่อจากนี้จะพิจารณาความแปรปรวนของ $\bar{y}$ โดยพยากรณ์จาก $\bar{x}$ มีขั้นตอนดังนี้

แปลงจุดซิกม่าทุกจุดของ x จะได้จุดซิกม่าของ y ผ่านการแปลง $h(\cdot)$

$$y^{(i)} = h(x^{(i)}), \qquad i = 0, 1, 2, \ldots, 2n \tag{2.25}$$

หาค่าเฉลี่ย

$$y_u = \sum_{i=0}^{2n} W^{(i)} y^{(i)} \tag{2.26}$$

ค่าเฉลี่ยที่ได้นี้ (y_u) คือ **ค่าประมาณของ** $\bar{y}$ ไม่ใช่ค่าเฉลี่ยที่แท้จริง ของ y แต่มีความถูกต้องถึงอันดับที่ 2 และใช้ค่าดังกล่าวหาความแปรปรวนของ y

$$P_{y'} = \sum_{i=0}^{2n} W^{(i)} (y^{(i)} - y_u)(y^{(i)} - y_u)^T \tag{2.27}$$

ความแปรปรวนที่ได้จะถูกต้องด้วยโมเมนต์อันดับที่ 2 เพียงอันดับเดียว (การพิสูจน์โดยละเอียดจะอยู่ในงานของ Julier [8] และ Simon [13])

2.3.2.3 การเลื่อนจุดซิกม่า (Scaled sigma points)

ดังที่ได้แสดงถึงการเลือกจุดซิกม่าไปแล้ว วิธีดังกล่าว (สมการที่ 2.24) จะให้ค่าความแปรปรวนถูกต้องเพียงอันดับ 2 เท่านั้น เพื่อลดผลของความผิดพลาดในส่วนของความแปรปรวน

จึงสามารถเลือกจุดซิกม่าใหม่ซ้ำลงไปอีกได้ดังนี้
เมื่อให้

$$\begin{aligned}\tilde{y} &= \tilde{h}(\bar{x},\alpha,\mu) \\ &= \frac{h(\bar{x}+\alpha\tilde{x})-h(\bar{x})}{\mu} - h(\bar{x})\end{aligned}$$

กระจายอนุกรมเทย์เลอร์จะได้

$$\begin{aligned}\tilde{y} &= h(\bar{x}) + \frac{\alpha}{\mu}\mathbf{D}_{\tilde{x}}h + \frac{\alpha^2}{\mu}\frac{\mathbf{D}^2_{\tilde{x}}h}{2!} \\ &\quad + \frac{\alpha^3}{\mu}\frac{\mathbf{D}^3_{\tilde{x}}h}{3!} + \frac{\alpha^4}{\mu}\frac{\mathbf{D}^4_{\tilde{x}}h}{4!} + \cdots \end{aligned} \tag{2.28}$$

จะพบว่า

$$\begin{aligned} y_u &\approx E[\tilde{y}] \\ P_u &\approx \alpha^2 E[(\tilde{y}-E[\tilde{y}])(\tilde{y}-E[\tilde{y}])^T] \end{aligned} \tag{2.29}$$

ซึ่งสมการที่ 2.29 สามารถใช้แทนสมการที่ 2.25 ในการแปลงอันเซนท์เท็ทได้ และยังมีข้อดีอีกคือ มีตัวแปรเสริม 2 ตัว คือ α และ μ ที่สามารถเลือกได้อย่างอิสระ เพื่อจะทำให้ความแปรปรวนถูกต้องขึ้น ตามปรกติจะเลือกให้ $\alpha^2 = \mu$ และจะให้ $\alpha = 10^{-3}$ สำหรับงานวิจัยนี้
โดยสรุป จะสามารถแสดงขั้นตอนของการเลื่อนจุดซิกม่าเพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ 2.29 ได้ดังนี้

$$\tilde{x}^{(i)} = \alpha x^{(i)} + (1-\alpha)x^{(0)} \tag{2.30}$$

$$\tilde{W}^{(i)} = \begin{cases} \frac{W^{(0)}+\alpha^2-1}{\alpha^2} & i=0 \\ \frac{W^{(i)}}{\alpha^2} & i\neq 0 \end{cases} \tag{2.31}$$

และได้สมการสำหรับคำนวณความแปรปรวนเป็น

$$\tilde{y}^{(i)} = h(\tilde{x}^{(i)}) \tag{2.32}$$

$$y_u = \sum_{i=0}^{2n} \tilde{W}^{(i)}\tilde{y}^{(i)} \tag{2.33}$$

$$\begin{aligned} P_u &= \sum_{i=0}^{2n}\left\{\tilde{W}^{(i)}\left(\tilde{y}^{(i)}-y_u\right)\left(\tilde{y}^{(i)}-y_u\right)^T\right\} \\ &\quad +(1-\alpha^2)\left(\tilde{y}^{(0)}-y_u\right)\left(\tilde{y}^{(0)}-y_u\right)^T \end{aligned} \tag{2.34}$$

2.3.2.4 ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน

ขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมด เป็นการแปลงอันเซนท์เท็ทสำหรับรอบเดียว (One-step transformation) ในหัวข้อนี้จะแสดงการใช้งานจริงสำหรับตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน

1. ให้สมการสถานะกำหนดดังสมการที่ 2.21

2. หาค่า $\hat{x}_0^+$ และ P_0^+ โดย

$$\begin{aligned} \hat{x}_0^+ &= E[x_0] \\ P_0^+ &= E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T] \end{aligned} \tag{2.35}$$

   เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการวนรอบ (Iteration)

3. ขั้นตอนต่อจากนี้จะ **ขยายตัวแปรสถานะ (State propagation) จากเหตุการณ์ (Epoch) ที่** $k-1$ **ไปยังเหตุการณ์ที่** k

   (a) แปลงจุดซิกม่าตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k-1}^+ &= \hat{x}_{k-1}^+ \\ W^{(0)} &= W^{(0)} \\ W^{(i)} &= W^{(i+n)} = \frac{1-W^{(0)}}{2n} \\ \hat{x}_{k-1}^{(i)} &= \hat{x}_{k-1}^+ + \left(\sqrt{\frac{n}{1-W^{(0)}}P_{k-1}^+}\right)_i^T \\ \hat{x}_{k-1}^{(i+n)} &= \hat{x}_{k-1}^+ - \left(\sqrt{\frac{n}{1-W^{(0)}}P_{k-1}^+}\right)_i^T \end{aligned} \tag{2.36}$$

   (b) เลื่อนจุดซิกม่าด้วยสมการ

$$\tilde{x}_{k-1}^{(i)} = \alpha\hat{x}_{k-1}^{(i)} + (1-\alpha)\hat{x}_{k-1}^+ \tag{2.37}$$

   โดยมี $\tilde{W}^{(i)}$ ตามสมการที่ 2.31

   (c) แปลงจุดซิกม่าทั้ง $2n+1$ จุดผ่านฟังก์ชัน $f(\cdot)$ ดังนี้

$$\hat{x}_k^{(i)} = f(\tilde{x}_{k-1}^{(i)}) \tag{2.38}$$

   (d) เฉลี่ยจุดซิกม่า

$$\hat{x}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} \tilde{W}^{(i)}\hat{x}_k^{(i)} \tag{2.39}$$

   (e) คำนวณความแปรปรวน

$$\begin{aligned} P_k^- &= \left(\sum_{i=0}^{2n} \tilde{W}^{(i)} \left(\hat{x}_k^{(i)} - \hat{x}_k^-\right)\left(\hat{x}_k^{(i)} - \hat{x}_k^-\right)^T\right) \\ &\quad + (1-\alpha^2)\left(\hat{x}_k^{(0)} - \hat{x}_k^-\right)\left(\hat{x}_k^{(0)} - \hat{x}_k^-\right)^T + Q_{k-1} \end{aligned} \tag{2.40}$$

   โดยที่ Q_{k-1} คือ ความแปรปรวนของตัวแปรสุ่ม w_{k-1} ตามสมการที่ 2.21

4. ขั้นตอนต่อจากนี้จะเป็นการปรับปรุงค่า โดยผ่านสมการค่าสังเกต (Observer equation, y_k)

(a) เริ่มการแปลงจุดซิกม่าอีกครั้ง การทำเช่นนี้ จะทำให้ระบบของจุดซิกม่ามีความเป็นแบบแผนมากขึ้น การใช้จุดซิกม่าที่แปลงไว้ก่อนหน้าอาจจะกระทำได้ แต่ต้อง ยอมสูญเสียความถูกต้องในการคำนวณ ในงานวิจัยนี้จะแปลงจุดซิกม่าซ้ำอีกดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^- &= \hat{x}_k^- \\ W^{(0)} &= W^{(0)} \\ W^{(i)} &= W^{(i+n)} = \frac{1-W^{(0)}}{2n} \\ \hat{x}_k^{(i)} &= \hat{x}_k^- + \left(\sqrt{\frac{n}{1-W^{(0)}}P_k^-}\right)_i^T \\ \hat{x}_k^{(i+n)} &= \hat{x}_k^- - \left(\sqrt{\frac{n}{1-W^{(0)}}P_k^-}\right)_i^T \end{aligned} \tag{2.41}$$

(b) เลื่อนจุดซิกม่าด้วยสมการ

$$\tilde{x}_k^{(i)} = \alpha\hat{x}_k^{(i)} + (1-\alpha)\hat{x}_k^- \tag{2.42}$$

(c) แปลงจุดซิกม่าทั้งหมดผ่านสมการค่าสังเกต

$$\hat{y}_k^{(i)} = g(\tilde{x}_k^{(i)}) \tag{2.43}$$

(d) ทำนายค่าเฉลี่ยของ y ด้วยสมการ

$$\hat{y}_k = \sum_{i=0}^{2n} \tilde{W}^{(i)}\hat{y}_k^{(i)} \tag{2.44}$$

(e) คำนวณความแปรปรวนของ $\hat{y}_k$ ด้วยสมการ

$$\begin{aligned} P_y &= \left(\sum_{i=0}^{2n} \tilde{W}^{(i)}\left(\hat{y}_k^{(i)}-\hat{y}_k\right)\left(\hat{y}_k^{(i)}-\hat{y}_k\right)^T\right) \\ &\quad +(1-\alpha^2)\left(\hat{y}_k^{(0)}-\hat{y}_k\right)\left(\hat{y}_k^{(0)}-\hat{y}_k\right)^T + R_k \end{aligned} \tag{2.45}$$

เมื่อ R_k คือ ความแปรปรวนของค่าสังเกต y_k ตามสมการที่ 2.21

(f) คำนวนความแปรปรวนร่วม

$$P_{xy} = \sum_{i=0}^{2n} W^{(i)}\left(\tilde{x}_k^{(i)}-\hat{x}_k^-\right)\left(\hat{y}_k^{(i)}-\hat{y}_k\right)^T \tag{2.46}$$

(g) ขั้นตอนสุดท้ายสำหรับการปรับปรุงค่าของ $\hat{x}_k$ และ P_k เพื่อนำไปใช้ในวงรอบถัดไป

$$\begin{aligned} K_k &= P_{xy}P_y^{-1} \\ \hat{x}_k^+ &= \hat{x}_k^- + K_k(y_k-\hat{y}_k) \\ P_k^+ &= P_k^- - K_kP_yK_k^T \end{aligned} \tag{2.47}$$

สำหรับการประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นฟ้าผ่า จะใช้สมการสถานะดังนี้

$$\begin{aligned} x_k &= x_{k-1} \\ y_k &= g(x_k, t) + v_k \end{aligned} \tag{2.48}$$

เมื่อ t คือตัวแปรทางเวลาที่จะใช้ร่วมในการประเมินค่าตัวแปรสถานะ

2.3.3 รูปแบบของฟังก์ชันที่ใช้ในการวิเคราะห์

สมการที่จะใช้เป็นแบบจำลองรูปคลื่นดลฟ้าผ่ามีหลายรูปแบบ แต่ที่มีนำเสนอไว้โดย Pérez et al.[11] และ McComb et al.[10] จะมีลักษณะเป็นดังนี้

$$g(t) = A_0 \left(e^{-\alpha(t-t_0)} - Be^{-\beta(t-t_0)} \right) \left(1 - B_1 e^{-\gamma(t-t_0)^{\delta}} \right) \tag{2.49}$$

สมการดังกล่าวมีตัวแปรถึง 8 ตัวที่ต้องนำมาสร้างเป็นสมการสถานะ ในกรรมวิธีอันเซนท์เท็ทคาลมาน ต้องการค่าเริ่มต้น และต้องเป็นค่าเริ่มต้นที่ใกล้เคียงผลเฉลยมาก การจะเลือกจุดจากรูปคลื่นเพื่อมาเป็นค่าเริ่มต้นสำหรับตัวแปรทั้ง 8 นั้น **เป็นเรื่องที่ยากหรือหากว่าใช้โดยการประมาณ ค่าที่ได้จะขาดความแม่นยำ** ในงานของ McComb et al. [10] เองก็ถือว่าให้พิจารณาส่วนนิพจน์ในวงเล็บหลังว่าเป็นค่าคงที่ เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับสมการที่มาตรฐาน IEC60060-1 (2010) แนะนำ จึงใช้สมการต่อไปนี้

$$g(t) = A \left(e^{-\alpha(t-t_0)} - e^{-\beta(t-t_0)} \right) \tag{2.50}$$

รูปแบบสมการจะง่ายขึ้น ตัวแปรจะมีเพียง 4 ตัวและสามารถอาศัยขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมในการหาค่าตัวแปรทั้ง 4 **ได้อย่างแม่นยำขึ้นด้วย** อีกทั้งถ้าหากแยกงานออกเป็น 2 ขั้นตอนและแต่ละขั้นตอนเหลือตัวแปรครั้งละ 3 ตัว จะทำให้ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานหลีกเลี่ยงปัญหา ปรากฏการณ์การเลื่อนค่า (Non-local effect) ได้ด้วย (วิธีการแก้ปัญหานี้เสนอโดย Lubin chang et al. [9] ในขณะที่ทำการทดลองพบว่าขั้นตอนการหา $\sqrt{P}$ ยังไม่มีเสถียรภาพ จึงไม่นำมาใช้) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นกับตัวกรองในสกุลคาลมานทั้งหลาย หากว่ามิติของตัวแปรสถานะมีค่าตั้งแต่ 4 เป็นต้นไป ในงานวิจัยนี้จะใช้รูปแบบสมการตาม 2.50 เป็นหลัก

2.3.4 การหาค่าเริ่มต้น

Pérez et al. [12] ได้ให้ข้อสมมุติฐานเพื่อใช้ในการทำนายค่าเริ่มต้นของกระบวนสำหรับตัวกรองคาลมานขยายไว้ดังนี้

$$x_i \in [x_{i1}, x_{i2}] \tag{2.51}$$

เมื่อ x_i คือ ตัวแปรสถานะตัวที่ i เวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ x และ x_{i1}, x_{i2} คือ **ช่วงของตัวแปรสถานะ เป็นค่าตัวเลข** ที่ผู้ทำการประเมินจะคาดการณ์ว่าตัวแปร x_i จะอยู่ในระหว่างนี้ และให้ถือว่า

ตัวแปร x_i มีการแจกแจงแบบ **เอกรูป (Uniform distribution)** สำหรับความแปรปรวนสามารถหาได้ด้วยสมการ

$$\hat{\sigma}_i^2 = \frac{(x_{i2} - x_{i1})^2}{12} \tag{2.52}$$

นอกจากนี้ Pérez et al.[12] ยังได้เสนอให้ใช้ค่าเริ่มต้นที่จะให้กราฟที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นมาตรฐาน (1.2/50 μs) ของรูปคลื่นดลฟ้าผ่า แต่ในโปรแกรมมาตรฐาน TDG มียอดคลื่นที่หลากหลาย การเริ่มต้นในแบบดังกล่าวอาจจะไม่ถูกต้องเสมอไป และความแปรปรวนที่คำนวณได้อาจไม่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริง ซึ่งย่อมส่งผลต่อการคำนวณของตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานอย่างมาก ในกรณีนี้จะใช้การเลือกจุดตัวอย่างจากกราฟของรูปคลื่นจริง เพื่อใช้ในการคำนวณ (วิธีการนี้จะอยู่ในบทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง) รวมถึงเป็นส่วนสำคัญเพื่อใช้หาความแปรปรวนเริ่มต้นด้วย

บทที่ 3

การทดลองเปรียบเทียบวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทและตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานบนการทดสอบหม้อแปลง

เพื่อเปรียบเทียบกรรมวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทกับวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานบนการทดสอบหม้อแปลง ซอฟท์แวร์ที่ใช้จะต้องผ่านการประเมินรูปคลื่นที่กำเนิดจากโปรแกรม TDG เสียก่อน ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงวิธีการหาค่าเริ่มต้น ขั้นตอนการประดิษฐ์รูปคลื่น และรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

3.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

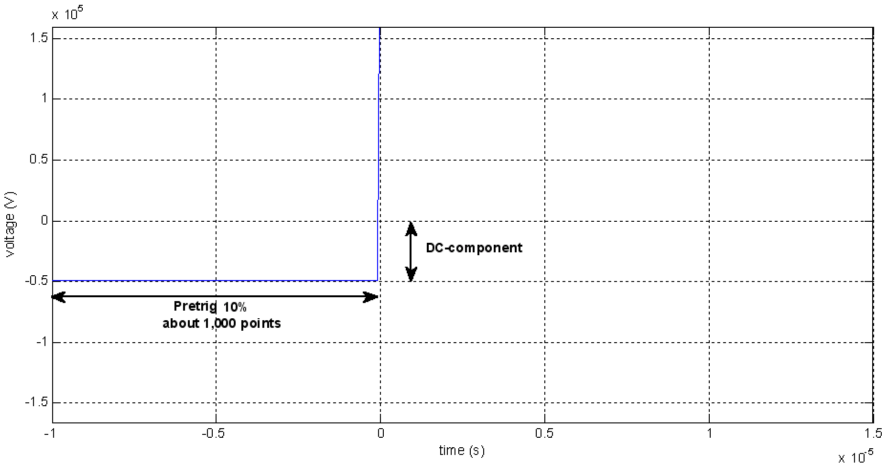
ในการเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธีนี้ จะต้องมีส่วนที่ควบคุมให้เหมือนกันเพื่อจะใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบได้

1. รูปคลื่นที่ใช้เป็นรูปคลื่นเดียวกัน (ทั้งจากโปรแกรม TDG และจากหม้อแปลง)
2. สมการที่ใช้เป็นสมการเดียวกัน (สมการที่ 2.50)
3. การให้ค่าเริ่มต้นดำเนินการด้วยวิธีเดียวกัน สำหรับกรณีการประดิษฐ์ส่วนหน้าคลื่น วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานจะใช้ตัวกรองคาลมานขยายดำเนินการก่อน เนื่องจากขีดจำกัดของกรรมวิธี
4. ขั้นตอนในการวิเคราะห์เพื่อประดิษฐ์รูปคลื่น ใช้เกณฑ์เดียวกัน (เกณฑ์การดำเนินการตามแนวทางของ Pérez et al. [11] ดังแสดงไว้แล้วในบทที่ 2)
5. โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลเป็นโปรแกรมเดียวกันคือ MATLAB 2008

ในเรื่องลักษณะของข้อมูลขาเข้ากรณีทดสอบกับโปรแกรม TDG จะใช้ตามแนวทางของ นพดล โคตรพันธ์ [14]

1. ใช้ข้อมูล 10,000 จุด (สำหรับโปรแกรม TDG)
2. มีจุดพรีทริก 10%
3. การรบกวนไม่เกิน 1% ของค่ายอด
4. อัตราการชักตัวอย่าง $\geq 30/t_r$ Hz

เมื่อ t_r คือ เวลาที่ใช้ในการยกตัว รูปคลื่นที่กำเนิดจากโปรแกรม TDG นั่นจะมีส่วนประกอบไฟตรง ซึ่งจะทำให้รูปคลื่นมีแรงดันเริ่มต้นไม่เป็นศูนย์ และเพราะมีพรีทริกที่ใช้ค่าประมาณ 10% ของจำนวนจุดทั้งหมด (จากทั้งหมด 10,000 จุด พรีทริกจะอยู่ที่ 970 จุด) ทำให้จุดกำเนิดของรูปคลื่นที่พิจารณาเลื่อนไปจากตำแหน่ง (0,0) ลักษณะของพรีทริกแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



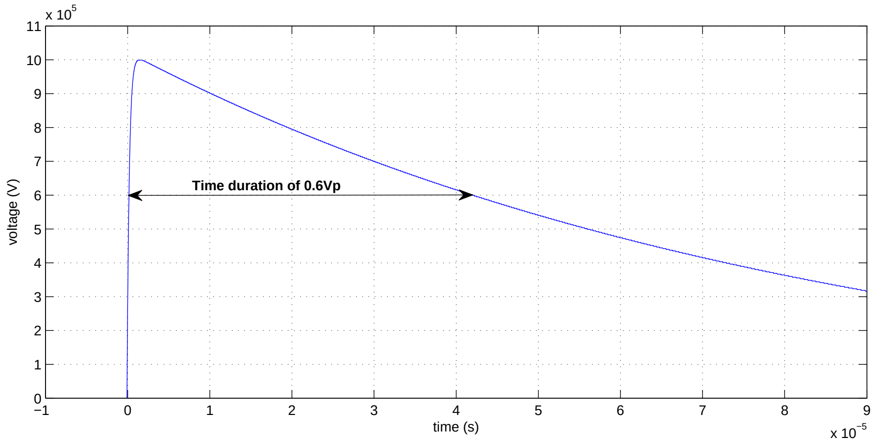
รูปที่ 3.1: รูปพรีทริก 10%

3.2 การจำแนกรูปคลื่น

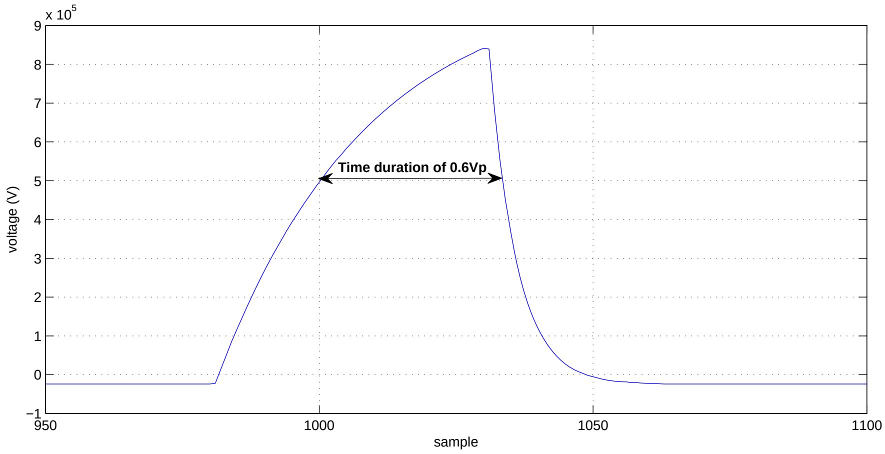
ในมาตรฐาน IEC60060-1 (2010) ได้แสดงถึงเกณฑ์ในการจำแนกรูปคลื่นเอาไว้ตามเวลาหน้าคลื่น แต่เพื่อการจำแนกรูปคลื่นโดยซอฟท์แวร์ให้มีความสะดวก จะอาศัยแนวทางของมาตรฐาน IEC1083-2 ร่วมด้วย โดยพิจารณาช่วงเวลาที่ใช้ในระหว่างที่มีแรงดันเป็น 60% ของค่ายอด สามารถสรุปได้ดังนี้

1. รูปคลื่นดลฟ้าผ่าสับ มีเวลา $t_{60\%} < 10\mu s$ (รูปที่ 3.3)
2. รูปคลื่นดลฟ้าผ่าเต็ม มีเวลา $10\mu s \leq t_{60\%} \leq 100\mu s$ (รูปที่ 3.2)
3. รูปคลื่นสวิตชิ่ง มีเวลา $100\mu s < t_{60\%}$ (รูปที่ 3.4)

ในงานวิจัยนี้ จะใช้เกณฑ์ดังกล่าวสำหรับจำแนกรูปคลื่นเพื่อใช้ทดสอบ และคัดเฉพาะรูปคลื่นสวิตชิ่งและรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มเท่านั้น สำหรับรูปคลื่นฟ้าผ่าสับจะไม่พิจารณาเนื่องจากกรรมวิธีมีขีดจำกัดในการประเมินพารามิเตอร์



รูปที่ 3.2: รูปแสดงช่วงเวลาขณะที่มีแรงดันเป็น 0.6 ของค่ายอด ของฟ้าผ่าเต็ม อยู่ระหว่าง 10 μs กับ 100μs



รูปที่ 3.3: รูปแสดงช่วงเวลาขณะที่มีแรงดันเป็น 0.6 ของค่ายอด ของฟ้าผ่าสับ มีค่าน้อยกว่า 10 μs

3.3 การหาค่าเริ่มต้นและการวิเคราะห์รูปคลื่น

จากสมการที่ 2.50 รูปคลื่นฟ้าผ่าสามารถแสดงได้ด้วยสมการ (นำมากล่าวที่นี้อีกครั้ง เพื่อความสะดวก)

$$g(t) = A\left(e^{-\alpha(t-t_0)} - e^{-\beta(t-t_0)}\right) \tag{3.1}$$

โดยที่ A, α และ β เป็นค่าคงที่บวก
ในบางกรณี อาจใช้สมการ

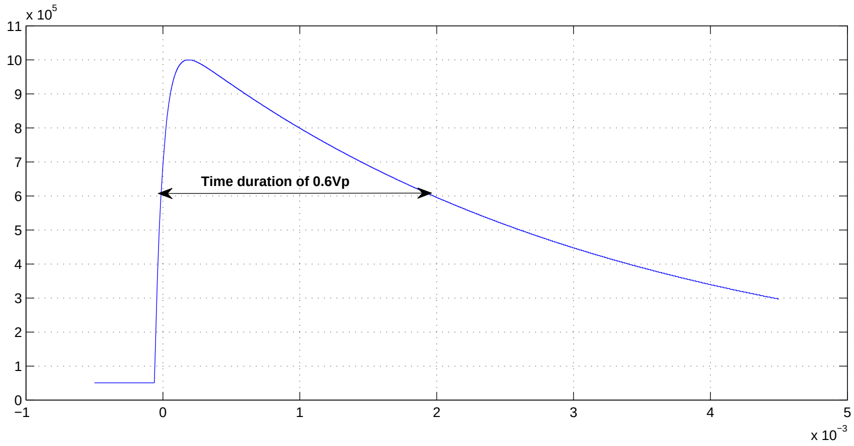
$$g(t) = Ae^{-\alpha(t-t_{})} - Be^{-\beta(t-t_0)} \tag{3.2}$$

สำหรับการสร้างหน้าคลื่นในกรณีความถี่มากกว่า 500 kHz ([10],[12]) จะเห็นได้ว่าสมการดังกล่าวคือรูปที่เปลี่ยนไปของสมการที่ 1.25 โดยการกระจาย A เข้าในวงเล็บ เมื่อคูณกับ B จะกลายเป็น B ตัวใหม่ และให้ส่วนของฟังก์ชันเกาส์เซียน (นิพจน์หลังสุดของสมการที่ 1.25) ถูกพิจารณาเป็นค่าคงที่ ในทางปฏิบัติจะแบ่งงานในการประดิษฐ์รูปคลื่นออกเป็น 2 ขั้นตอน ([11],[12]) คือ ขั้นตอนในการสร้างหางคลื่น และ ขั้นตอนการสร้างหน้าคลื่น โดยสมการที่ 3.2 จะเป็นส่วนสำคัญสำหรับสร้างหน้าคลื่นต่อไป

3.3.1 การหาค่าเริ่มต้นสำหรับการสร้างหลังคลื่นและการสร้างหลังคลื่น

เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น แรงดันดลจะลดลงจนมีค่าเข้าสู่ 0 ในช่วงนี้หากพิจารณาตามสมการที่ 2.50 ประกอบจะพบว่า

$$g(t)\big|_{t\to\infty} \approx g^*(t) = Ae^{-\alpha(t-t_0)} \tag{3.3}$$

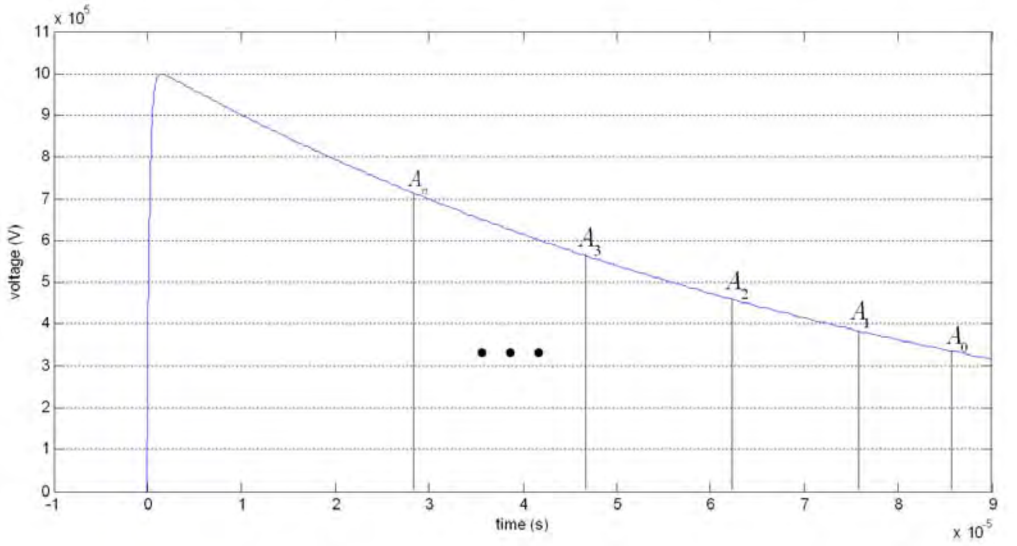


รูปที่ 3.4: รูปแสดงช่วงเวลาขณะที่มีแรงดันเป็น 0.6 ของค่ายอด ของรูปคลื่นสวิตชิ่ง มีค่ามากกว่า 100 μs

โดยอาศัยแนวคิดนี้ จะสามารถทำให้หาค่าของ A, α และ t_0 ได้ง่ายขึ้น

สำหรับขั้นตอนการหาค่าเริ่มต้นนั้น Pérez et al. [11], [12] ได้เสนอให้ใช้ค่าซึ่งสอดคล้องกับรูปคลื่น 1.2/50 แต่รูปคลื่นที่สร้างจากโปรแกรม TDG มีความหลากหลายในค่าของยอดคลื่น ([14]) อีกทั้งงานวิจัยนี้เมื่อทำการทดลองกับ TDG แล้วต้องนำไปทดสอบกับหม้อแปลงอีกด้วย การเริ่มต้นด้วยวิธีที่นำเสนอนั้นอาจไม่ครอบคลุม ดังนั้นจึงต้องสร้างวิธีการหาค่าเริ่มต้นที่เหมาะสม ([14]) ดังนี้

เริ่มโดยการเลือกจุดหลังคลื่นมาจำนวน $n+1$ จุด ดังรูปที่ 3.5 แล้วพิจารณาให้จุด A_0 เป็นจุด



รูปที่ 3.5: รูปแสดงวิธีการหาค่าเริ่มต้น α เพื่อใช้ประดิษฐ์หลังคลื่น

ตรึง โดยจุดนี้เป็นจุดที่อยู่ด้านปลายของหางคลื่น กำหนดให้ทุกค่าของตัวแปรที่ตำแหน่งนี้เป็นค่าคงที่ (มีขนาดแรงดันเป็น A_0 และเวลาณ จุดนี้เป็น T_0) เลือกจุด A_1 มาใช้ กำหนดให้มีสมการเลขชี้กำลัง 1 สมการที่ลากผ่านจุดทั้ง 2 นี้ และให้จุดทุกจุดบนสมการเลขชี้กำลังดังกล่าวเขียนได้เป็น

$$g_1(t) = A_1 e^{-\alpha(t-t_1)} \tag{3.4}$$

จุด A_0 ก็อยู่บนเส้นโค้งนี้ด้วย จึงได้ว่า

$$g_1(T_0) = A_0 = A_1 e^{-\alpha_1(T_0-t_1)} \tag{3.5}$$

แก้สมการเพื่อให้ได้ค่าของ α_1 ออกมาดังนี้

$$\begin{aligned} A_0 &= A_1 e^{-\alpha_1(T_0-t_1)} \\ \alpha_1 &= \frac{1}{t_1 - T_0} \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) \end{aligned} \tag{3.6}$$

โดยนัยเดียวกัน ให้เลือกจุด A_0 และจุด A_2 จะได้ α_2 ดังนี้

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= \frac{1}{t_2 - T_0}\ln\left(\frac{A_0}{A_2}\right) &(3.7)\\ \alpha_3 &= \frac{1}{t_3 - T_0}\ln\left(\frac{A_0}{A_3}\right) &(3.8)\\ &\vdots\end{aligned}$$

ทำเช่นนี้เรื่อยไปจนกระทั่งครบ n จุด แล้วจึงเฉลี่ยทั้ง n จุดนี้

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\alpha_i \qquad (3.9)$$

ในขณะนี้ ถือว่ามี α เริ่มต้นแล้ว

ต่อจากนี้จะใช้ค่าดังกล่าวเพื่อหาตัวแปรเริ่มต้นอีก 2 ตัวที่เหลือคือ A และ t_0 สำหรับตัวกรองคาลมานขยายหรือวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท ไม่จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนต่อจากนี้ แต่สำหรับวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน มีความจำเป็นต้องใช้ (การอภิปรายถึงผลว่าเหตุใดจึงมีความจำเป็นจะปรากฏอยู่ในบทที่ 5)

จากสมการที่ 3.3 ให้แทนค่า α ด้วย $\hat{\alpha}$ แล้วจัดรูปดังนี้

$$\begin{aligned}g^*(t) &= Ae^{-\hat{\alpha}(t-t_0)}\\ \ln(g^*(t)) &= \ln A - \hat{\alpha}(t-t_0)\\ \ln(g^*(t)) + \hat{\alpha}t &= \ln A + \hat{\alpha}t_0 &(3.10)\end{aligned}$$

ในขั้นตอนนี้ จะเปลี่ยนให้ $\hat{\alpha}$ ในพจน์ $\hat{\alpha}t_0$ กลายเป็น $\alpha_i t_0$ แทนเพื่อป้องกันการเกิดเมทริกซ์เอกฐาน แล้วแสดงในแบบเมทริกซ์

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}\ln(g^*(t_1)) + \hat{\alpha}t_1\\ \ln(g^*(t_2)) + \hat{\alpha}t_2\\ \vdots\\ \ln(g^*(t_n)) + \hat{\alpha}t_n\end{bmatrix} &= \begin{bmatrix}1 & \alpha_1\\ 1 & \alpha_2\\ \vdots & \vdots\\ 1 & \alpha_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ln A\\ t_0\end{bmatrix}\\ c &= M\begin{bmatrix}\ln A\\ t_0\end{bmatrix}\\ \begin{bmatrix}\ln A\\ t_0\end{bmatrix} &= \left(M^TM\right)^{-1}M^Tc &(3.11)\end{aligned}$$

ค่าที่ได้จากการแก้ด้วยการหาค่าเหมาะสมสุดเชิงเส้น (Linear optimization) ดังกล่าวนำมาหาค่า $\hat{A}$ และ $\hat{t}_0$ หลังจากนั้น จะจับคู่ $\binom{3}{2} = 3$ ครั้งโดยเลือก

- $\hat{A}$ และ $\hat{t}_0$ เพื่อหาค่าเริ่มต้น α_i (ขั้นตอนนี้อาจย้อนกลับไปใช้ค่าที่ได้คำนวณตอนเริ่มต้นได้)

- $\hat{A}$ และ $\hat{\alpha}$ เพื่อหาค่าเริ่มต้นของ t_{0i}
- $\hat{\alpha}$ และ $\hat{t}_0$ เพื่อหาค่าเริ่มต้น A_i

ค่าที่ได้ทุกค่านำมาจัดในรูปเมทริกซ์ เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นได้

$$x_i = \begin{bmatrix} A_i & \alpha_i & t_{0i} \end{bmatrix}^T \tag{3.12}$$

หาค่าเฉลี่ย จะได้ว่า

$$x_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{3.13}$$

ส่วนความแปรปรวนเริ่มต้นคำนวณโดย

$$P_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_0)(x_i - x_0)^T \tag{3.14}$$

3.3.2 การหาค่าเริ่มต้นสำหรับหน้าคลื่น

ในกรณีที่ความถี่ $\leq$ 500 kHz จะใช้รูปคลื่นจริง กรรมวิธีจะเริ่มต้นจากการเลือกจุดมา $m+1$ จุด ใช้จุดยอดคลื่นเป็น B_0 ณ จุดนี้มีแรงดันเป็น B_0 และมีเวลาเป็น T_0 ดังรูปที่ 3.6 ที่จุด B_1 สร้างสมการ

$$\begin{aligned} B_1 &= B_0\left(e^{-\hat{\alpha}(t_1-T_0)} - e^{-\beta_1(t_1-T_0)}\right) \\ \beta_1 &= \frac{1}{T_0 - t_1}\ln\left(e^{-\hat{\alpha}(t_1-T_0)} - \frac{B_1}{B_0}\right) \end{aligned} \tag{3.15}$$

ทำเช่นนี้กับจุด B_2 จนกระทั่งถึง B_m จะได้ β ออกมาทั้งหมด m จุด (คล้ายคลึงกับวิธีการหา α) แล้วจึงหาค่าเฉลี่ย

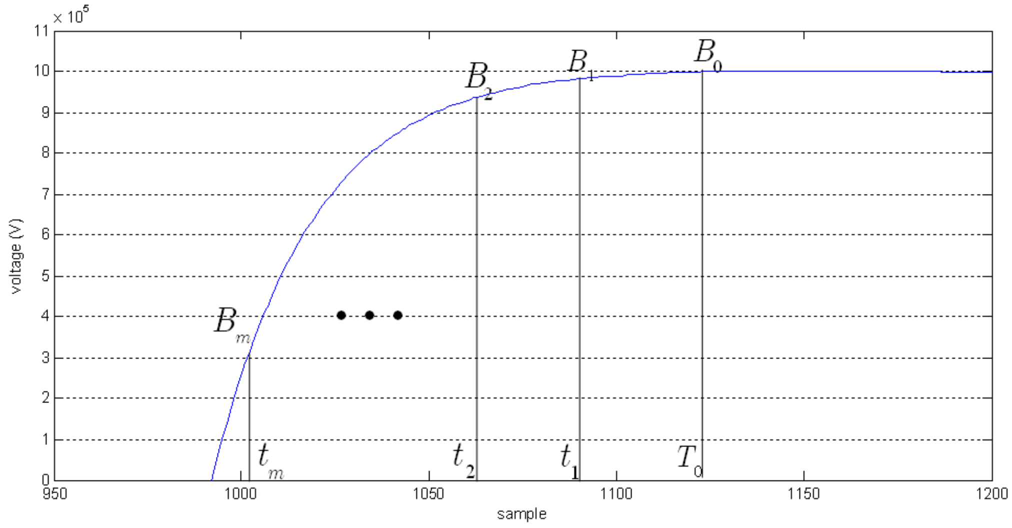
$$\hat{\beta} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\beta_i \tag{3.16}$$

สำหรับกรณีที่ความถี่ $>$ 500 kHz ให้ใช้สมการที่ 3.2 โดยพจน์แรกทางขวามือของสมการคือส่วนที่ได้จากการประดิษฐ์หางคลื่น ($Ae^{-\alpha(t-t_0)}$) และซ้ายมือของสมการ ($g(t)$) คือ ค่าที่ได้จากรูปคลื่นฟ้าผ่าจริงๆ โดยการจัดรูปสมการให้เหมาะสม ให้นิพจน์ที่ทราบค่าอยู่ด้านเดียวกันของสมการ

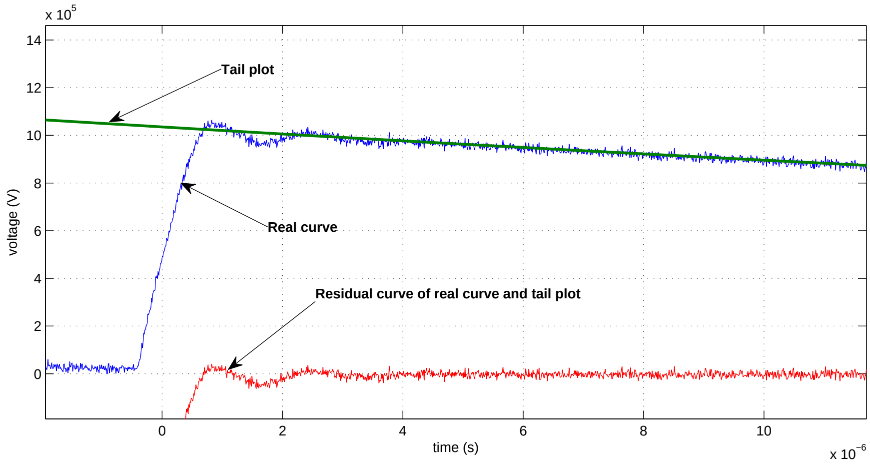
$$Be^{-\beta(t-t_0)} = Ae^{-\alpha(t-t_0)} - g(t) \tag{3.17}$$

จะสังเกตได้ว่า นิพจน์ทางขวามือของสมการจะเป็นตัวเลข (เมื่อแทนค่าลงไปแล้ว) เหลือแต่เพียงซ้ายมือของสมการเท่านั้นที่มีตัวแปรอยู่ และมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเลขชี้กำลังเดี่ยว (Single exponential) แล้วใช้วิธีการเช่นเดียวกับตอนดำเนินการกับหลังคลื่น เพียงแต่ **กระทำกับหน้าคลื่นแทน** รูปที่ 3.8 แสดงหน้าคลื่นที่ถูกประดิษฐ์ขึ้น โดยวิธีดังกล่าวนี้

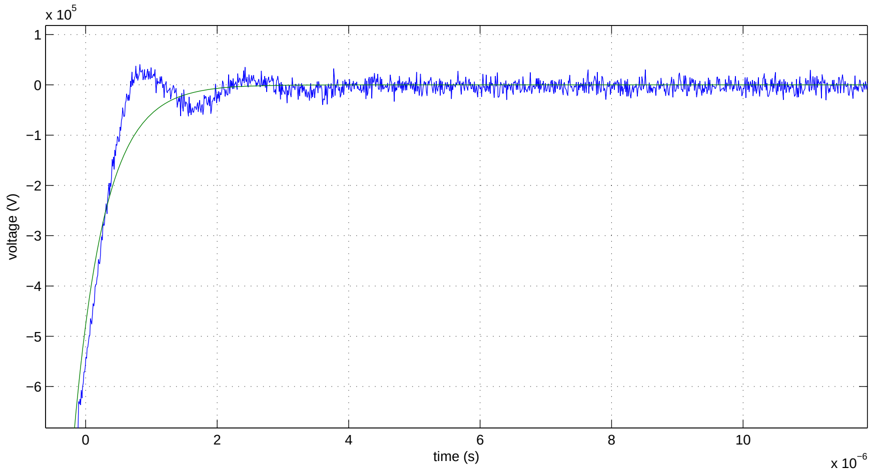
ที่ผ่านมาทั้งหมดเป็นกรรมวิธีสำหรับการสร้าง **รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม** และ **รูปคลื่นสวิตชิ่ง** สำหรับรูปคลื่นฟ้าผ่าสับในวิทยานิพนธ์จะไม่กล่าวถึง เนื่องจาก จำนวนจุดข้อมูลสำหรับดำเนินการกับตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานมีน้อยเกินไป อาจให้ค่าที่ไม่ถูกต้องได้ อีกทั้งรูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงที่ทำการทดสอบไม่ได้ประกอบด้วยรูปคลื่นที่เกิดการเบรกดาวน์



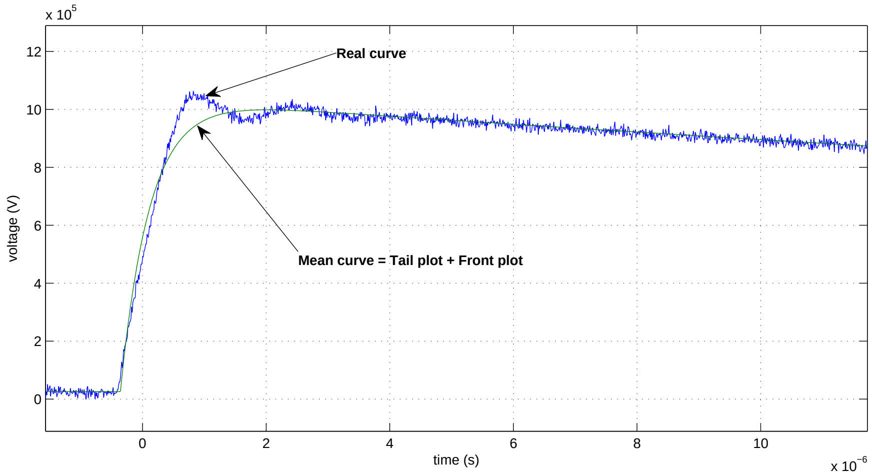
รูปที่ 3.6: รูปแสดงวิธีการเลือกจุดสำหรับหาค่าเริ่มต้น β เพื่อการประดิษฐ์หน้าคลื่น



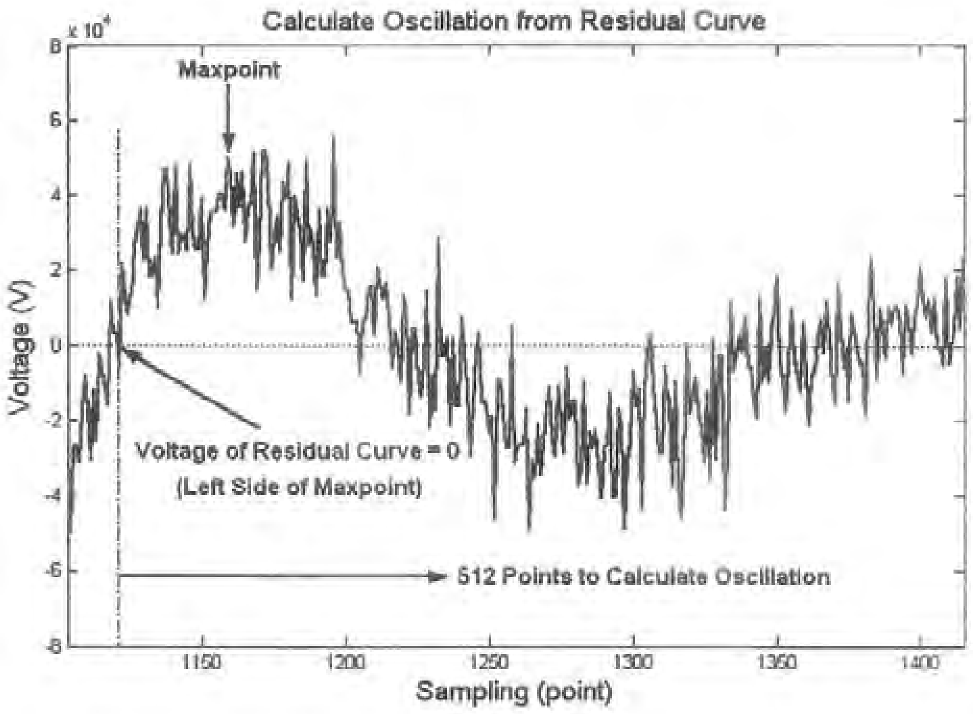
รูปที่ 3.7: รูปคลื่นแสดงนิยามของ *รูปคลื่นตกค้างส่วนหาง*, หางคลื่น และ รูปคลื่นจริง (รูปคลื่นกรณีที่ 9)



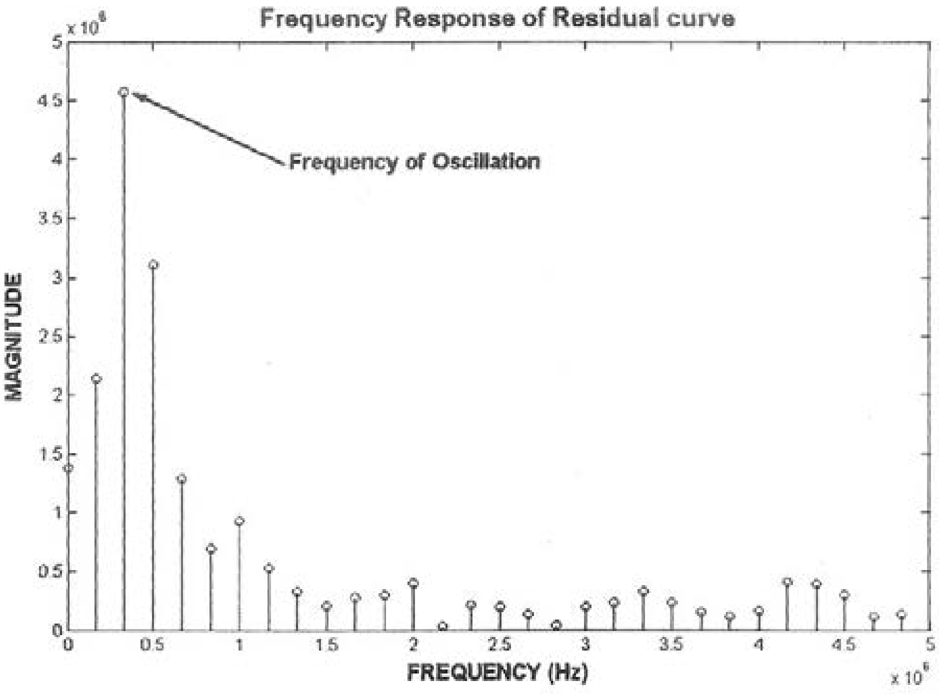
รูปที่ 3.8: รูปคลื่นแสดงการสร้างส่วนหน้าคลื่น (รูปคลื่นกรณีที่ 9)



รูปที่ 3.9: รูปคลื่นสมบูรณ์ที่ได้จากการรวมส่วนหางคลื่น และส่วนหน้าคลื่นเข้าด้วยกันแล้ว (รูปคลื่นกรณีที่ 9)



รูปที่ 3.10: รูปคลื่นแสดงการวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้างส่วนหางเพื่อคำนวณความถี่การแกว่ง



รูปที่ 3.11: รูปคลื่นแสดงความถี่ขนาดใหญ่ที่สุดที่ได้จากการใช้ FFT (Fast Fourrier Transform)

3.4 รูปคลื่นตกค้างส่วนหาง (Residual curve of real curve and tail plot)

สำหรับการจำแนกว่า รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มใด จะใช้รูปคลื่นจริงหรือรูปคลื่นที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้น จำเป็นจะต้องตรวจสอบ **ความถี่การแกว่งบริเวณยอดคลื่น** ตามข้อแนะนำของ IEC1083-2 เสียก่อน ในการนี้จะใช้ **รูปคลื่นส่วนหาง (Tail plot)** เข้ามาวิเคราะห์

ตามปรกตินิยามรูปคลื่นตกค้าง (Residual curve) ใน IEC60060-1 (2010) จะหมายถึง รูปคลื่นผลต่าง ระหว่างรูปคลื่นจริง กับ รูปคลื่นสมบูรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น แต่ในกรณีนี้จะใช้เพียงแค่ส่วนหางคลื่นที่ประดิษฐ์ได้ และเรียก **รูปคลื่นผลต่างระหว่าง รูปคลื่นจริง กับ รูปคลื่นส่วนหางว่า รูปคลื่นตกค้างส่วนหาง (Resisual curve of real curve and tail plot)** (ดังรูปที่ 3.7) จากวิธีของ นพดล โคตรพันธ์ [14] จะเริ่มด้วยการสืบไปทางซ้ายของ รูปคลื่นตกค้างส่วนหาง จากยอดคลื่นเพื่อหาจุดที่มีแรงดันเป็น 0 นับจากจุดนี้เลือกไปทางขวาจำนวน 512 จุด (รูปที่ 3.10) ใช้คำสั่ง FFT (Fast fourier transform) มาวิเคราะห์ความถี่ **ให้ความถี่ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเป็นความถี่ของยอดคลื่นรูปทดสอบ** ดังรูปที่ 3.11

3.5 เกณฑ์ที่ใช้อ้างอิงกรณีทดสอบกับหม้อแปลง

ในกรณีของการทดสอบกับโปรแกรม TDG มาตรฐาน IEC1083-2 ได้กำหนดขอบเขตดังที่ได้แสดงไว้แล้วในตารางที่ 2.2 ดังนั้นผลของการประเมินที่ได้จะไม่กำหนดเกณฑ์อื่นใดเป็นพิเศษ คงไว้เพียงแค่เกณฑ์ตามมาตรฐานเท่านั้น ในขณะที่การทดสอบกับหม้อแปลง จะต้องมีการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญเปรียบเทียบกับการประเมินที่ได้จากซอฟท์แวร์ ค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะเป็นพารามิเตอร์ของรูปคลื่นเป็นหลัก ซึ่งสามารถกำหนดเป็นเกณฑ์ได้ดังนี้

$$\text{error} = \frac{|\text{value} - \text{true}|}{\text{true}} \times 100 \tag{3.18}$$

โดยที่

error: ค่าความผิดพลาดคิดเป็นร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของผลต่างจากค่าที่ทดสอบได้กับค่าจากผู้เชี่ยวชาญ
value: ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยซอฟท์แวร์
true: ค่าที่ประเมินได้จากผู้เชี่ยวชาญ

ถ้าหากกรรมวิธีใดสามารถให้ค่า error ได้น้อยกว่า ให้ถือว่ากรรมวิธีนั้นๆ ประเมินพารามิเตอร์ที่กำหนดได้ดีกว่าอีกกรรมวิธี

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในการวิจัยนี้ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการทดลองกับโปรแกรมทดสอบ TDG ตามมาตรฐาน IEC1083-2 เพื่อทดสอบการทำงานของซอฟท์แวร์ และ ส่วนของการทดสอบกับหม้อแปลงซึ่งเป็นการทดสอบจริง (ข้อมูลจริง) โดยเกณฑ์ในการตัดสินความถูกต้องของพารามิเตอร์ จะอ้างอิงจากผู้เชี่ยวชาญ

4.1 การทดสอบขั้นตอนวิธีบนแบบจำลองของเลขชี้กำลัง

ขั้นตอนดังกล่าวนี้สร้างขึ้นเพื่อทดสอบความสามารถและสมรรถนะเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ของวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน เพื่อใช้ประกอบการหาค่าเริ่มต้นสำหรับใช้กับการประเมินรูปคลื่นดลฟ้าผ่าต่อไป

4.1.1 การทดลองกับฟังก์ชันเลขชี้กำลังเดี่ยว

ใช้รูปแบบของสมการเป็น

$$y(t) = Ae^{\alpha t} \tag{4.1}$$

เมื่อตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ A และ α ถ้าหากทราบค่าของทั้ง 2 ตัวแปรก่อนแล้วจำลองผลเพื่อหาผลลัพธ์กลับ จะมีประเด็นที่สรุปได้ดังนี้

1. การค่าเริ่มต้นดังที่เสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งมีการใช้ระเบียบวิธีการค่าเหมาะสมสุดแบบเชิงเส้นก่อนนั้น สามารถให้ค่าที่ถูกต้องก่อนนำไปประมวลผลได้จริง ในการทดลองจะใช้ค่าดังกล่าวแทนลงในจุดที่ทำการเลือกมา (ดังบทที่ 3) แล้วหาความแปรปรวนจากสมการที่เสนอไว้ในบทที่ 3 สำหรับการหาความแปรปรวนเริ่มต้น
2. ผลที่ได้ถูกต้องถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง

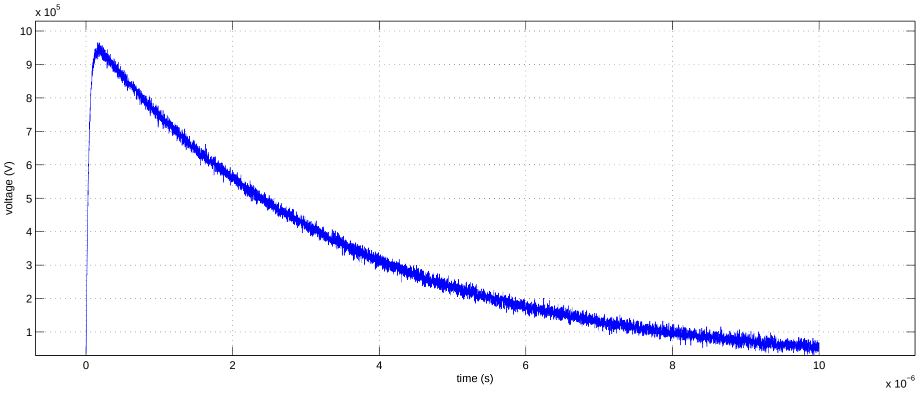
ค่าที่ใช้ในกระบวนการคือ $A = \pi$ และ $\alpha = -\log e$ ซึ่งมีค่าไม่มาก

4.1.2 การทดลองกับฟังก์ชันเลขชี้กำลังคู่

สำหรับค่าเริ่มต้นที่เสนอไว้ดังบทที่ 3 คือการแบ่งงานออกเป็น 2 ขั้นตอนนั้น สามารถหาค่าของ α ได้แม่นยำ ใกล้เคียงกับค่าจริงที่สมมุติขึ้น โดยในการทดลองนี้ใช้รูปแบบสมการคือ

$$y(t) = A\left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right) \tag{4.2}$$

ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสมการ 2.50 โดยการประมาณว่าเมื่อเวลาผ่านไปจะเหลือเพียงพจน์หน้าตามสมการ 3.3 เมื่อทำการประมาณ ผลลัพธ์ถูกต้องทศนิยม 2 ตำแหน่งโดยใช้ค่าเริ่มต้นของ x และ P ดังเสนอไว้ในบทที่ 3 ทุกประการ รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของรูปคลื่นที่ใช้ในการทดสอบขั้นตอนวิธีที่ใช้กับตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน โดยในรูปคลื่นดังกล่าว มีจุดข้อมูลหน้าคลื่นอยู่เพียงประมาณ 167



รูปที่ 4.1: รูปคลื่นดลฟ้าผ่าที่ใช้ทดสอบกรรมวิธี

จุด ผลปรากฏว่าวิธีที่เสนอไว้ในบทที่ 3 กับหน้าคลื่น สามารถประเมินได้อย่างแม่นยำเช่นเดียวกับที่ได้ประเมินกับหลังคลื่น

4.2 ผลการดำเนินการบนโปรแกรมทดสอบ TDG

การทดลองจะทำบนรูปคลื่นกรณีที่ 1,3,4,6,8,9 ซึ่งเป็นรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม และรูปคลื่นที่ 5,10 เป็นรูปคลื่นสวิตชิ่ง โดย 1,5 เป็นกรณีไร้การแกว่งและการรบกวน 3,4 เป็นกรณีที่มีการแกว่ง แต่ไร้การรบกวน ในขณะที่รูปคลื่น 6,8,9 และ 10 เป็นกรณีที่มีการรบกวน แต่รูปคลื่นทั้งหมดเป็นรูปคลื่นทดลอง สำหรับกรณีที่ 11,13,14 เป็นรูปคลื่นทดสอบจริงภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด รายละเอียดการจำแนกจะอยู่ในตารางที่ 2.1 ในแต่ละกรณีจะแสดงตัวอย่างผลการดำเนินการรูปคลื่นไว้ 6 กรณีโดยจะกำหนดรหัสย่อในตารางดังนี้

A - XY - N

โดยที่

A	คือ	เลขอ้างอิงกรณี
X	คือ	ระยะเลื่อนตามแกน x
Y	คือ	ระยะเลื่อนตามแกน y
N	คือ	การรบกวน กำหนดเป็น %

เช่น รูปคลื่นกรณีที่ 11 ระยะเลื่อนตามแกน x เป็น 1 หน่วย แกน y 2 หน่วย การรบกวนไม่เกิน 5% จะสามารถเขียนได้ดังนี้

11 - 12 - 5

หากการรบกวนไม่ได้กำหนดหรือกำหนดไม่ได้ จะละ N ไว้

A - XY

เมื่อซอฟท์แวร์รับข้อมูลเข้ามา จะมีการจำแนกชนิดของรูปคลื่นก่อน จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการประดิษฐ์รูปคลื่น ตามแผนผังในรูปที่ 4.2 โดยเริ่มจากการประดิษฐ์ส่วนหลังคลื่นก่อน แล้วจึงอาศัยรูปคลื่นตกค้างส่วนหางวิเคราะห์ความถี่บริเวณยอด จากนั้นจึงจำแนกตามขนาดของความถี่ สร้างรูปคลื่นโดยอาศัยความรู้บทที่ 2 และ 3 จึงได้ผลลัพธ์ ในการทำงานของซอฟท์แวร์ จะโหลดไฟล์ของรูปคลื่นสกุล .dat เข้าสู่หน้าต่างงานของแมทแลป (Workspace) เป็นลักษณะแถวลำดับของข้อมูลแรงดัน และแถวลำดับของข้อมูลเวลา ในการประมวลผลข้อมูลทั้ง 2 ชุดดังกล่าวจะสัมพันธ์กันตั้งแต่เริ่มในช่วงพรีทริก 10% จนกระทั่งถึงช่วงลดลงของแรงดัน จำนวนจุดทั้งหมดมี 10,000 จุด เท่ากันทั้งสองแถวลำดับข้อมูล แต่ส่วนของพรีทริกจะมีจำนวนประมาณ 900 จุด บริเวณหน้าคลื่นสำหรับรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มไร้การแกว่งจะมีอยู่ไม่เกิน 200 จุด (ประมาณ 197 จุด) สำหรับรูปคลื่นที่มีการแกว่งจะอยู่ที่ประมาณ 127 จุดเท่านั้น การเลือกจุดสำหรับประดิษฐ์หางคลื่น จะกระทำตั้งแต่ปลายสุดของแถวลำดับของข้อมูล แล้วเลือกมาจำนวน 20 จุด ที่ห่างเป็นระยะเท่าๆ กัน แต่ไม่รวมไปถึงบริเวณยอดคลื่น (เพราะเป็นบริเวณซึ่งมีการแกว่ง ค่าของ α ที่ได้อาจไม่แม่นยำ) โดยในแต่ละช่วงของจุดจะทำการเฉลี่ยจุดรอบๆ ที่ติดกัน เพื่อลดผลของการรบกวน (ในกรณีรูปคลื่นที่ 6, 8, 9 และ 10 ซึ่งเป็นรูปคลื่นที่มีการรบกวนทั้งสิ้น) จากนั้นใช้วิธีดังที่แสดงในบทที่ 3 เพื่อค่าเริ่มต้น ความห่างของจุดข้อมูลอาจมีผลต่อแนวโน้มของความเป็นเลขชี้กำลัง ถ้ายิ่งห่าง แนวโน้มจะชัดเจนยิ่งขึ้น กรรมวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทในส่วนของการประดิษฐ์หางคลื่นสามารถเริ่มต้นด้วยวิธีที่เสนอในบทที่ 3 ได้เลยเช่นเดียวกับวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน โดยที่ความแปรปรวนนั้นสำหรับวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทอาจใช้ข้อสมมุติฐานของ Pérez et al. [12] ได้ โดยไม่ต้องทำการหาค่าเหมาะสมสุดเชิงเส้นก่อนดังวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานเลย

กรณีหน้าคลื่นนั้น เป็นประเด็นที่มีปัญหามากที่สุดสำหรับตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน ด้วยเหตุที่จำนวนจุดข้อมูลมีเพียง 127 - 197 จุดเท่านั้น อีกทั้งค่าที่บริเวณใกล้ยอดก็ประกอบด้วยการแกว่ง การหาค่าเริ่มต้นให้แม่นยำสามารถทำได้ยากลำบากกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทมาก เพราะเพียงการเลือกจุด และคำนวณค่าของ β โดยอาศัยข้อมูลของ α ที่ทราบจากขั้นตอนการประดิษฐ์หางคลื่นนั้น ไม่เพียงพอสำหรับกรณีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานดังนั้น ขั้นตอนปฏิบัติจริงจะใช้ตัวกรองคาลมานขยาย (ตามแนวทางในงานของ Pérez [12]) ช่วยในการเริ่มต้นค่าของตัวแปรสถานะที่เป็นไปได้ว่าจะเป็นผลเฉลย จากนั้นจึงนำค่าที่คำนวณได้ดังกล่าวแทนลงในสมการที่ 2.50 สำหรับ

ค่าขอบเขต	V_p(MV)	$T_1(\mu s)$	$T_2(\mu s)$	f_0(kHz)	$\tau(\mu s)$
	1.04 - 1.06	0.81 - 0.87	57.5 - 62.5	-	-

รหัสย่อ	Unscented kalman filter					Levenberg - Marquardt method				
	V_p	T_1	T_2	f_0	τ	V_p	T_1	T_2	f_0	τ
01-00	1.05	0.841	60.013	-	-	1.049	0.841	60.01	-	-
01-12	1.051	0.843	60.2	-	-	1.051	0.84	60.238	-	-
01-20	1.051	0.819	60.267	-	-	1.05	0.839	60.206	-	-
01-23	1.05	0.841	60.238	-	-	1.05	0.539	60.207	-	-
01-30	1.05	0.82	59.797	-	-	1.05	0.84	60.121	-	-
01-32	1.05	0.845	59.997	-	-	1.05	0.841	60.108	-	-

ตารางที่ 4.1: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 1 (รูปคลื่นเรียบฟ้าผ่าเต็ม ไร้การแกว่ง)

กรณีที่ใช้รูปคลื่นจริงพิจารณา หรือสมการที่ 3.2 สำหรับกรณีใช้รูปคลื่นเฉลี่ย (Mean curve) พิจารณา

4.2.1 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 1

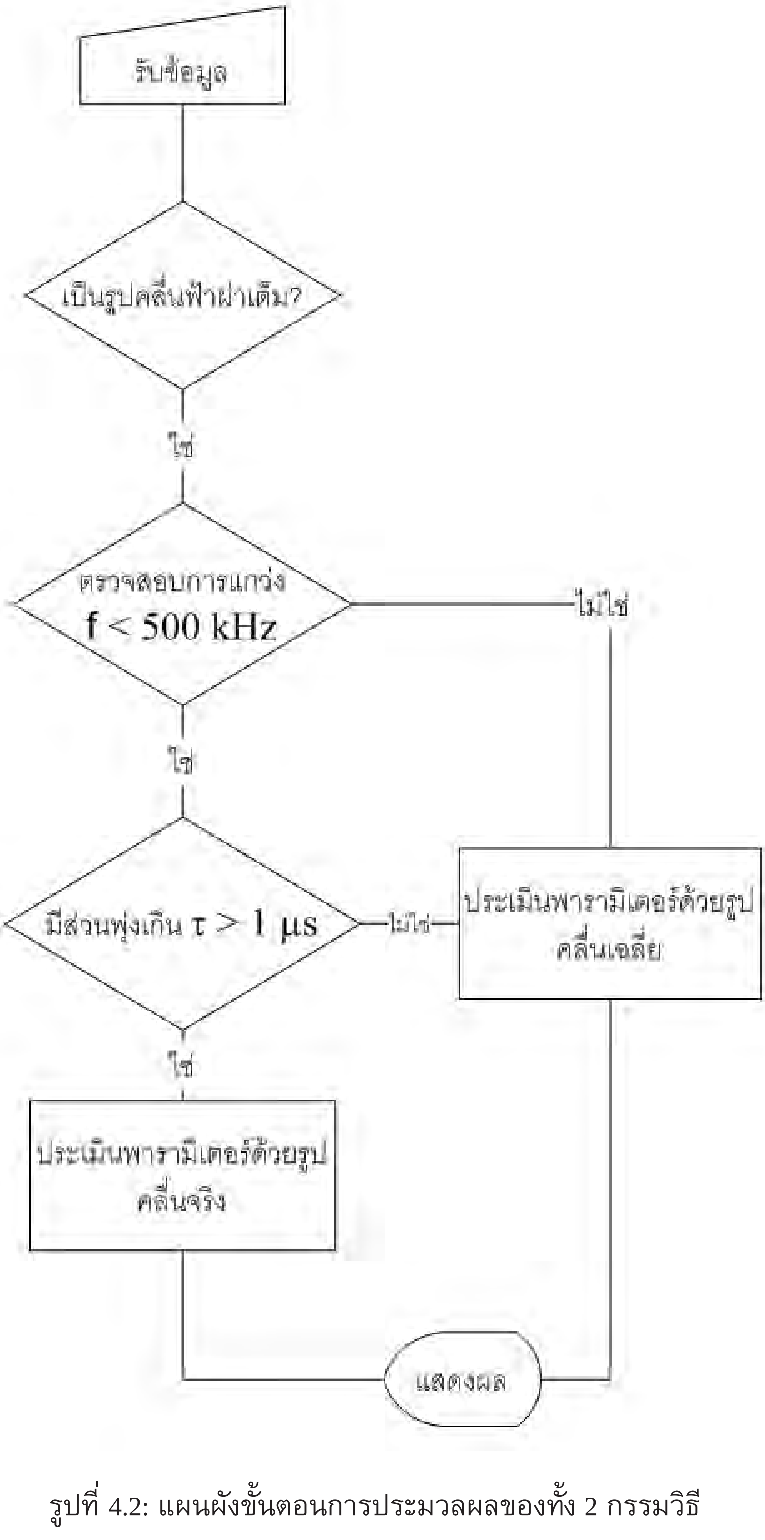
กรณีรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มไร้การแกว่งและการรบกวน รูปคลื่นดังกล่าวถือได้ว่าเป็นรูปคลื่นมาตรฐานที่ตรงตามทฤษฎีทุกประการ เมื่อไร้การแกว่งใดๆ ตามเกณฑ์ของมาตรฐาน IEC1083-2 แนะนำให้ใช้รูปคลื่นจริงพิจารณา เกณฑ์ว่าด้วยการแกว่งและส่วนพุ่งเกินมาตรฐานจึงมิได้กำหนด สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ประเมินได้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

4.2.2 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 3

กรณีรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มมีการแกว่งไม่เกิน 500 kHz ไร้การรบกวน ตามมาตรฐาน IEC1083-2 ให้ใช้รูปคลื่นจริงในการพิจารณา ผลปรากฏว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถดำเนินการได้ทุกรูปคลื่น เช่นเดียวกับตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นสามารถประเมินได้อย่างถูกต้องทุกกรณี ตัวอย่างผลที่สามารถดำเนินการได้แสดงในตารางที่ 4.2

4.2.3 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 4

กรณีรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มไร้การรบกวน ความถี่บริเวณยอดคลื่นมากกว่า 500 kHz มาตรฐาน IEC1083-2 แนะนำให้ใช้รูปคลื่นเฉลี่ย ผลปรากฏว่าทั้ง 2 วิธีให้ค่าพารามิเตอร์อยู่ในเกณฑ์ทุกค่า ยก



รูปที่ 4.2: แผนผังขั้นตอนการประมวลผลของทั้ง 2 กรรมวิธี

ค่าขอบเขต	V_p(MV)	$T_1(\mu s)$	$T_2(\mu s)$	f_0(kHz)	$\tau(\mu s)$
	1.04 - 1.06	1.6 - 1.7	45 - 49	$<$ 500	-

รหัสย่อ	Unscented kalman filter					Levenberg - Marquardt method				
	V_p	T_1	T_2	f_0	τ	V_p	T_1	T_2	f_0	τ
03-00	1.048	1.646	46.781	390.6	-	1.048	1.662	46.768	390.6	-
03-01	1.048	1.644	46.772	390.6	-	1.048	1.659	46.778	390.6	-
03-12	1.05	1.648	46.877	390.6	-	1.05	1.663	46.88	390.6	-
03-23	1.05	1.652	46.791	390.6	-	1.05	1.667	46.805	390.6	-
03-32	1.05	1.655	46.719	390.6	-	1.05	1.671	46.738	390.6	-

ตารางที่ 4.2: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 3 (รูปคลื่นเรียบฟ้าผ่าเต็ม มีการแกว่งน้อยกว่า 500 kHz)

ค่าขอบเขต	V_p(MV)	$T_1(\mu s)$	$T_2(\mu s)$	f_0(kHz)	$\tau(\mu s)$
	0.96 - 0.99	1.0 - 1.1	48 - 52	$>$500	-

รหัสย่อ	Unscented kalman filter					Levenberg - Marquardt method				
	V_p	T_1	T_2	f_0	τ	V_p	T_1	T_2	f_0	τ
04-00	0.97	1.346	50.206	585.9	0.69	0.977	1.064	49.369	585.9	0.63
04-01	0.969	1.475	50.279	585.9	0.7	0.978	1.061	49.361	585.9	0.63
04-12	0.97	1.348	50.372	585.9	0.7	0.978	1.05	49.623	585.9	0.63
04-20	0.971	1.458	50.556	585.9	0.7	0.977	1.053	49.709	585.9	0.65
04-23	0.971	1.343	50.335	585.9	0.7	0.977	1.043	49.699	585.9	0.64
04-32	0.97	1.343	50.298	585.9	0.7	0.975	1.04	49.759	585.9	0.65

ตารางที่ 4.3: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 4 (รูปคลื่นเรียบฟ้าผ่าเต็ม การแกว่งเกิน 500 kHz)

เว้นแต่ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน ให้การประมาณเวลาหน้าคลื่นผิดพลาด ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากทั้ง 2 วิธี พารามิเตอร์เดียวกันจากทั้ง 2 วิธีใกล้เคียงกันและอยู่ในเกณฑ์ยกเว้นพารามิเตอร์เวลาหน้าคลื่นของวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน

4.2.4 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 5

กรณีรูปคลื่นสวิตชิ่ง ไร้การรบกวน ใช้ขั้นตอนวิธีเดียวกับรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มไร้การแกว่ง พารามิเตอร์ทุกตัวที่ได้จาก 2 วิธีนี้ถูกต้องหมดทุกพารามิเตอร์ การเริ่มต้นที่ใช้ในการหาค่าไม่มีปัญหามากนัก สามารถประเมินได้แม่นยำ ตัวอย่างผลของการดำเนินการเป็นไปดังตารางที่ 4.4

ค่าขอบเขต	V_p(MV)	$T_1(\mu s)$	$T_2(\mu s)$	f_0(kHz)	$\tau(\mu s)$
	0.94 - 0.96	240 - 260	2,400 - 2,600	-	-

รหัสย่อ	Unscented kalman filter					Levenberg - Marquardt method				
	V_p	T_1	T_2	f_0	τ	V_p	T_1	T_2	f_0	τ
05-00	0.95	251.5	2493.5	-	-	0.947	250	2505.5	-	-
05-12	0.951	251	2500.5	-	-	0.949	248.5	2509	-	-
05-13	0.951	251.5	2500.5	-	-	0.949	248.5	2509	-	-
05-23	0.951	251	2498.5	-	-	0.948	249	2506.5	-	-
05-32	0.95	251	2496.5	-	-	0.947	250.5	2506	-	-

ตารางที่ 4.4: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 5 (รูปคลื่นเรียบสวิตชิ่ง)

ค่าขอบเขต	V_p(MV)	$T_1(\mu s)$	$T_2(\mu s)$	f_0(kHz)	$\tau(\mu s)$
	1.04 - 1.06	0.81 - 0.87	57.5 - 62.5	-	-

รหัสย่อ	Unscented kalman filter					Levenberg - Marquardt method				
	V_p	T_1	T_2	f_0	τ	V_p	T_1	T_2	f_0	τ
06-00	1.054	0.851	59.115	-	-	1.048	0.835	60.264	-	-
06-00-5	1.061	0.874	57.737	-	-	1.049	0.836	60.25	-	-
06-12	1.055	0.853	59.362	-	-	1.05	0.837	60.252	-	-
06-23	1.052	0.856	59.734	-	-	1.05	0.842	60.488	-	-
06-32-5	1.055	0.856	59.364	-	-	1.05	0.838	60.22	-	-

ตารางที่ 4.5: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 6 (รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม ไร้การแกว่ง แต่มีการรบกวน, * แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ตรงกับขอบเขตที่กำหนด)

4.2.5 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 6

กรณีรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มไร้การแกว่ง แต่มีการรบกวน กรณีนี้จะคล้ายคลึงกับกรณีที่ 1 แต่จะมีการรบกวนปนเข้ามาด้วย ค่าขอบเขตที่กำหนดยังคงเดิม เมื่อทำการทดลองกับกรรมวิธีทั้ง 2 แล้วพบว่า พารามิเตอร์ที่คำนวณได้ทุกค่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดทุกกรณีตัวอย่าง แต่ในบางกรณีนั้นตัวกรองอันเซนท์เท็ทไม่สามารถประมวลผลได้ โดยกรณีที่ดำเนินการไม่ได้มักจะเกิดขึ้นกับรูปคลื่นที่มีการรบกวนน้อยกว่า 5% ของแรงดันค่ายอดซึ่งมีการเลื่อนแกน ตัวอย่างของการดำเนินการแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ค่าขอบเขต	V_p(MV)	$T_1(\mu s)$	$T_2(\mu s)$	f_0(kHz)	$\tau(\mu s)$
	1.04 - 1.06	1.6 - 1.7	45 - 49	$<$ 500	-

รหัสย่อ	Unscented kalman filter					Levenberg - Marquardt method				
	V_p	T_1	T_2	f_0	τ	V_p	T_1	T_2	f_0	τ
08-00	1.051	1.668	45.409	390.6	-	1.052	1.689	46.603	390.6	-
08-12	1.056	1.851	46.477	390.6	-	1.055	1.679	46.597	390.6	-
08-03-5*	1.03*	1.611	45.515	-*	0.46*	1.052	1.688	46.606	390.6	-
08-32	1.056	1.671	46.434	390.6	-	1.055	1.678	46.583	390.6	-

ตารางที่ 4.6: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 8 (รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม มีการแกว่งน้อยกว่า 500 kHz มีการรบกวน)

4.2.6 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 8

รูปคลื่นฟ้าผ่าชนิดมีการแกว่งบริเวณยอดน้อยกว่า 500 kHz และมีการรบกวนปนเข้ามาในรูปคลื่นด้วย สืบเนื่องจากรูปคลื่นกรณีที่ 3 รูปคลื่นกรณีที่ 8 นี้มีส่วนของการแกว่งเช่นกัน ดังนั้นการประเมินพารามิเตอร์ของตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานจะมีปัญหาได้ง่าย ดังในตารางที่ 4.6 กรณีซึ่งการรบกวนไม่เกิน 5% และมีการเลื่อนไปแกน y หรือแกนแรงดันไป 3 หน่วย จะให้การประเมินพารามิเตอร์ที่ผิดพลาด โดยบริเวณหลังคลื่นจะประเมินได้ไม่แม่นยำทำให้พารามิเตอร์ที่ต้องใช้กับบริเวณหน้าคลื่นไม่แม่นยำไปด้วย ()

4.2.7 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 9

รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม ซึ่งมีการแกว่งมากกว่า 500 kHz คล้ายคลึงกับกรณีที่ 4 แต่มีการรบกวน มาตรฐานยังคงแนะนำให้ใช้รูปคลื่นเฉลี่ยในการคำนวณหาพารามิเตอร์รูปคลื่นฟ้าผ่า จากการดำเนินการพบว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถประเมินรูปคลื่นได้ถูกต้องอยู่ในขอบเขต แต่ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานจะให้ค่าพารามิเตอร์หน้าคลื่นผิดพลาดไป ในกรณีที่การรบกวนกำหนดให้มีขนาด 5% ของแรงดันค่ายอด ตัวกรองอันเซนท์เท็ทจะไม่สามารถประมวลผลได้ โดยเมื่อดำเนินการไปประมาณ 95 รอบเมทริกซ์ความแปรปรวนจะไม่นิยามบวก ตัวอย่างของผลการดำเนินการแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

4.2.8 การทดลองกับรูปคลื่น TDG ชนิดที่ 10

รูปคลื่นสวิตชิ่งที่มีการรบกวน กรณีรูปคลื่นชนิดนี้การประเมินพารามิเตอร์ทุกค่าของทั้ง 2 วิธีให้ผลถูกต้องทั้งคู่ กล่าวคืออยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด แม้การรบกวนจะถูกกำหนดให้มีขนาด 5% ของ

ค่าขอบเขต	V_p(MV)	$T_1(\mu s)$	$T_2(\mu s)$	f_0(kHz)	$\tau(\mu s)$
	0.96 - 0.99	1.0 - 1.1	48 - 52	>500	-

รหัสย่อ	Unscented kalman filter					Levenberg - Marquardt method				
	V_p	T_1	T_2	f_0	τ	V_p	T_1	T_2	f_0	τ
09-01	0.973	1.388*	49.801	585.9	0.52	0.976	1.072	49.677	585.9	0.52
09-13	0.973	1.356*	50.053	585.9	0.66	0.976	1.016	49.754	585.9	0.65
09-21	0.97	1.615*	44.854	585.9	0.53	0.976	1.072	49.672	585.9	0.52
09-23	0.974	1.359*	49.784	585.9	0.65	0.976	1.017	49.755	585.9	0.65
09-31	0.972	1.387*	49.821	585.9	0.53	0.976	1.071	49.677	585.9	0.52

ตารางที่ 4.7: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 9 (รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม มีการแกว่งเกิน 500 kHz มีการรบกวน)

ค่าขอบเขต	V_p(MV)	$T_1(\mu s)$	$T_2(\mu s)$	f_0(kHz)	$\tau(\mu s)$
	0.94 - 0.96	240 - 260	2,400 - 2,600	-	-

รหัสย่อ	Unscented kalman filter					Levenberg - Marquardt method				
	V_p	T_1	T_2	f_0	τ	V_p	T_1	T_2	f_0	τ
10-00	0.949	247	2502	-	-	0.949	248.5	2499	-	-
10-02-5	0.95	251	2500	-	-	948	249	2506	-	-
10-12	0.949	248	2505.5	-	-	0.948	248	2505.5	-	-
10-12-5	0.951	251.5	2499	-	-	0.948	249	2506.5	-	-
10-23-5	0.951	250	2502	-	-	0.949	249.5	2507.5	-	-
10-32-5	0.95	250.5	2501.5	-	-	0.948	249	2506	-	-

ตารางที่ 4.8: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ชนิดที่ 10 (รูปคลื่นสวิตชิ่ง มีการรบกวน)

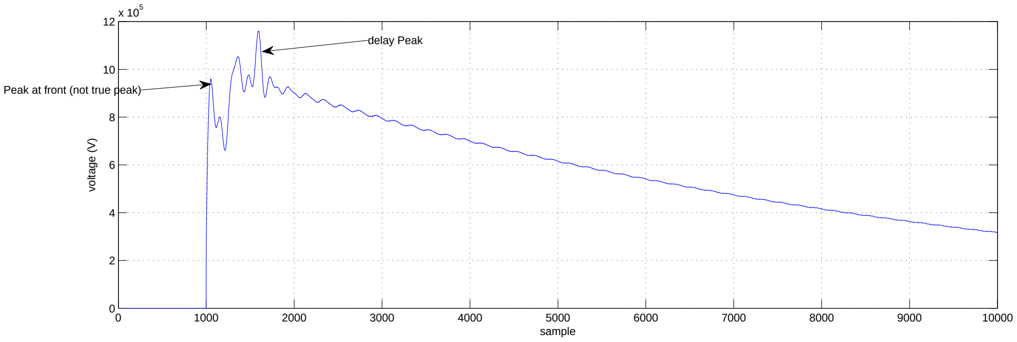
ค่ายอด แต่การประดิษฐ์รูปคลื่นของตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานยังคงให้ผลดี รูปคลื่นซ้อนทับสนิทกับรูปคลื่นจริง ให้ค่าพารามิเตอร์ถูกต้อง ตัวอย่างของค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.8 ข้อสังเกตคือ หากรูปคลื่นปราศจากการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกิน ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานจะมีความแม่นยำ

ที่ผ่านมาทั้งหมดเป็นการเปรียบเทียบ 2 วิธีคือวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท และ ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานโดยใช้รูปคลื่นมาตรฐานทั้ง 8 กรณี เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความเหมาะสม (Validation) ว่าสามารถนำไปประเมินรูปคลื่นได้หรือไม่ และสามารถใช้ได้ในกรณีใดบ้าง พบว่าวิธีเลเวนเบิร์กมาร์ควอร์ทสามารถประเมินได้ทุกกรณีถูกต้อง ตรงตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ในขณะที่วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานจะสามารถทำได้ดีอยู่ 2 เงื่อนไขคือ 1.กรณีรูปคลื่นไร้การแกว่ง ได้แก่ รูปคลื่นสวิตชิ่ง และรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็มไร้การแกว่ง และ 2.กรณีที่การรบกวนไม่สามารถ

กำหนดค่าได้ เท่านั้น ต่อจากนี้จะเป็นการนำวิธีทั้ง 2 มาทดลองกับรูปคลื่นซึ่งได้จากหม้อแปลงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีทั้ง 2 และเพื่อพิจารณาว่า สำหรับการทดสอบกับหม้อแปลงกรรมวิธีใดให้ผลตรงกับค่าที่ประเมินได้จากผู้เชี่ยวชาญมากกว่ากัน โดยมีเกณฑ์ในการเปรียบเทียบดังแสดงไว้ในบทที่ 3 ท้ายบท

4.3 ผลการดำเนินการบนรูปคลื่นจากหม้อแปลง

ในการทดสอบกับรูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงในงานวิจัยนี้ จะใช้รูปคลื่น 4 กรณีที่แตกต่างกัน โดยลักษณะสำคัญร่วมกันประการหนึ่งของรูปคลื่นทั้ง 4 นี้คือ มียอดคลื่นจริงเลื่อนไปขวาของแกนเวลา และมีหน้าคลื่นที่สั้นกว่าปรกติอันเนื่องมาจากมียอดคลื่นซ้อน เกิดขึ้นบริเวณหน้าคลื่น ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นตัวอย่างของรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงรูปหนึ่ง ผลการทดสอบสามารถแสดงเป็นหัวข้อได้ดังนี้

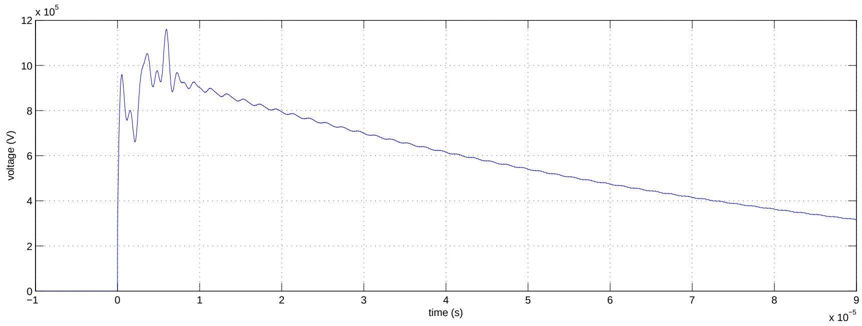


รูปที่ 4.3: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 0.84/60 μs

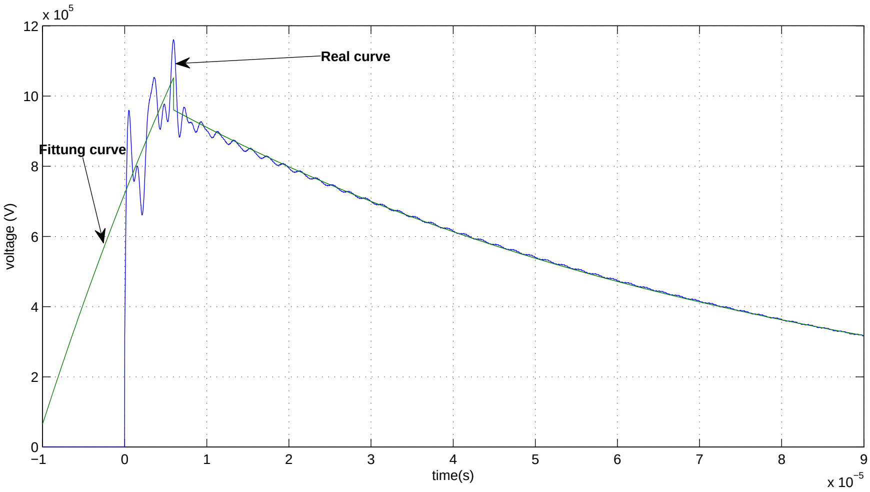
4.3.1 รูปคลื่นจากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 1

ในกรณีที่ 1 นี้ จะทำการประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นของกรณีที่แรงดันทดสอบมีเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นเป็น 0.84/60.01 μs พร้อมทั้งแสดงผลของรูปคลื่นที่ได้ประเมิน และค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้ รวมไปถึงค่าความผิดพลาด ของพารามิเตอร์ รูปคลื่นที่ใช้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.4

ผลการประเมินรูปคลื่นสำหรับกรณีที่ 1 พบว่า วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท สามารถประเมินค่าได้ แต่ไม่ตรงตามที่ประเมินโดยผู้ทดสอบ ในขณะที่วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานไม่สามารถประเมินได้เลย จากผลที่ได้นี้จะนำเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นมาวิเคราะห์ด้วยเกณฑ์สำหรับทดสอบหม้อแปลงที่แสดงไว้ในบทที่ 3 โดยรูปคลื่นที่ประเมินได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.3.1 และสำหรับภาพขยายบริเวณยอดคลื่น แสดงไว้ดังรูปที่ 4.6 ส่วนตารางสรุปผลแสดงไว้ในตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.4: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 0.84/60.01 μs



รูปที่ 4.5: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 0.84/60 μs และรูปคลื่นที่ประเมินได้โดยวิธี LM

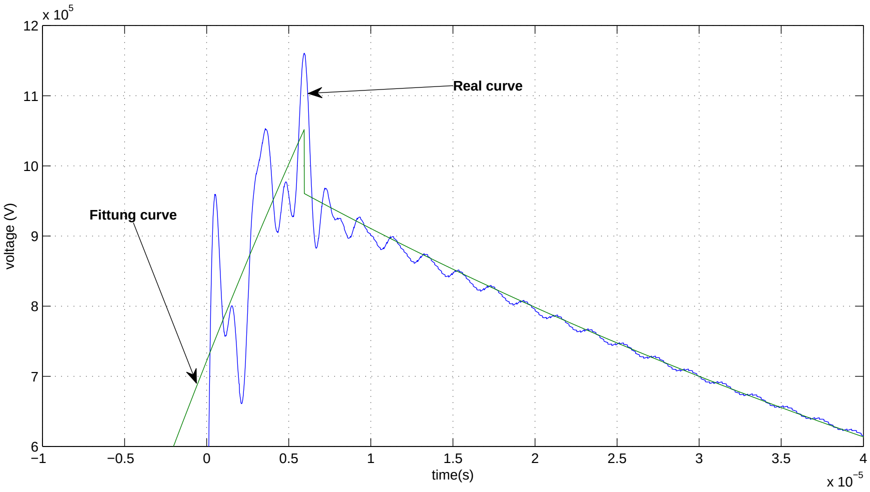
ความผิดพลาดของหน้าคลื่น

$$\text{error} = \frac{|19.541 - 0.84|}{0.84} \times 100 = 2226.31\% \tag{4.3}$$

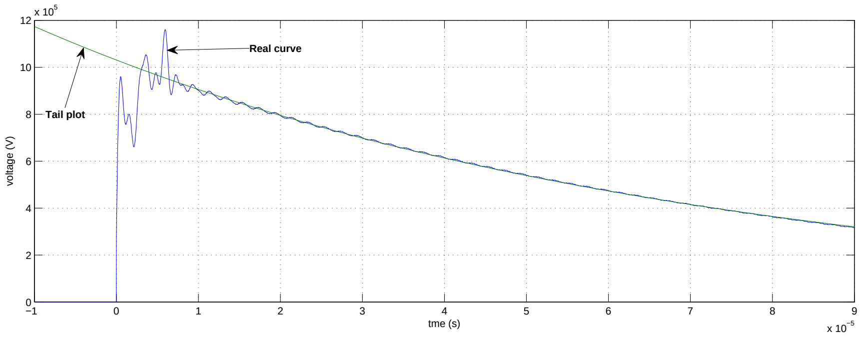
ความผิดพลาดของหลังคลื่น

$$\text{error} = \frac{|56.767 - 60|}{60} \times 100 = 5.39\% \tag{4.4}$$

จากผลที่ได้ เวลาหลังคลื่นมีความผิดพลาดน้อยที่สุด และพารามิเตอร์ที่ผิดพลาดมากที่สุดคือเวลาหน้าคลื่น เพราะบริเวณหน้าคลื่นที่ประมาณได้มีความผิดพลาดสูง



รูปที่ 4.6: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 0.84/60.01 μs บริเวณค่ายอด



รูปที่ 4.7: รูปหลังคลื่นที่ได้จากตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน

4.3.2 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 2

ในกรณีที่ 2 สำหรับการทดสอบรูปคลื่นจากหม้อแปลงนั้น จะดำเนินการกับรูปคลื่นที่มีอัตราส่วนหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.65/46.77 μs ซึ่งรูปคลื่นดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 รูปคลื่นที่ประดิษฐ์ได้โดยสมบูรณ์จากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทแสดงไว้ดังรูปที่ 4.3.2 และสำหรับในรูปที่ 4.10 จะเป็นรูปคลื่นจากกรรมวิธีเดียวกันนี้ที่ขยายบริเวณส่วนยอด **ความผิดพลาดของหน้าคลื่น**

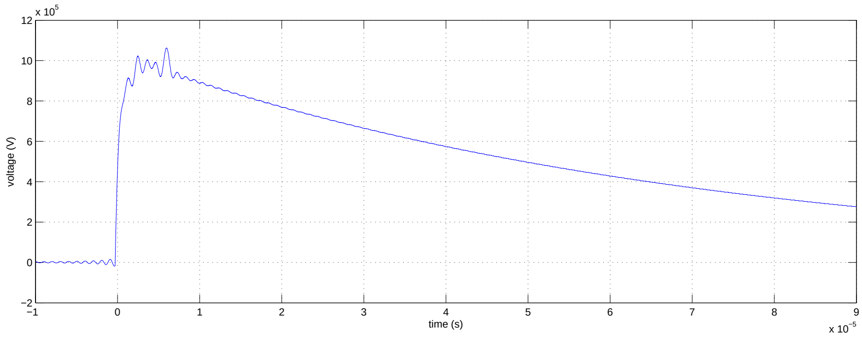
$$\text{error} = \frac{|3.176 - 1.65|}{1.65} \times 100 = 92.48\% \tag{4.5}$$

ความผิดพลาดของหลังคลื่น

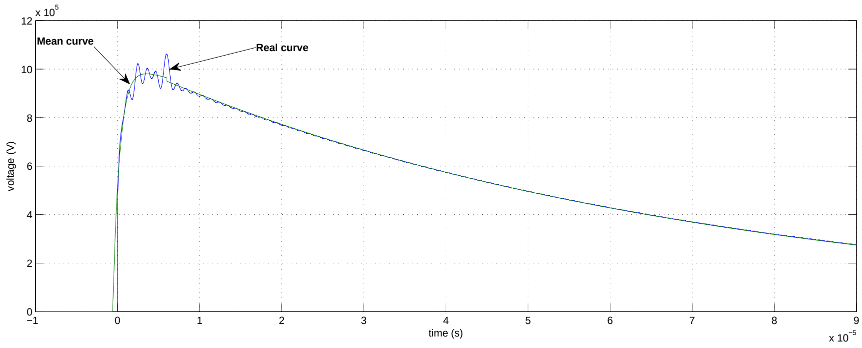
$$\text{error} = \frac{|46.524 - 46.77|}{46.77} \times 100 = 0.526\% \tag{4.6}$$

	V_p	T_1	T_2
Unscented kalman filter	-	-	-
Levenberg - Marquardt	1.16	19.541	56.767

ตารางที่ 4.9: ตารางแสดงผลการประเมินพารามิเตอร์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่ได้จากหม้อแปลงกรณีทดลองทดลองที่ 1



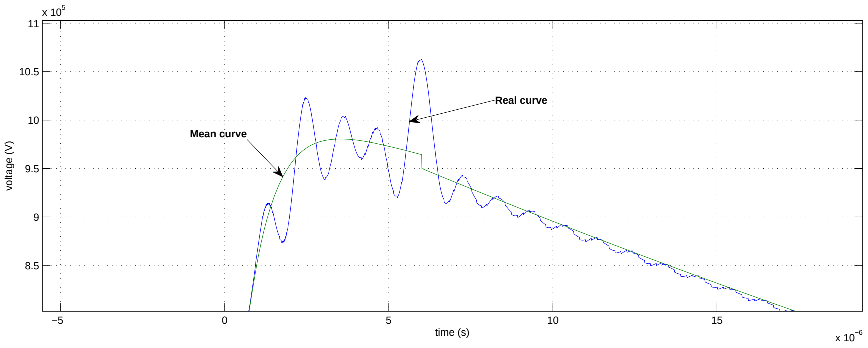
รูปที่ 4.8: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.65/46.77 μs



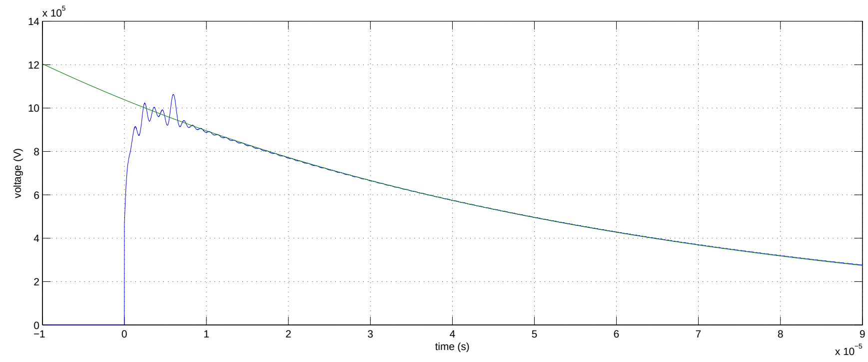
รูปที่ 4.9: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.65/46.77 μs และรูปคลื่นที่ประเมินได้โดยวิธี LM

	V_p (MV)	T_1 (μs)	T_2 (μs)
Unscented kalman filter	-	-	-
Levenberg - Marquardt	1.06	3.176	46.524

ตารางที่ 4.10: ตารางแสดงผลการประเมินรูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงกรณีการทดลองที่ 2 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถประเมินได้ทุกพารามิเตอร์



รูปที่ 4.10: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.65/46.77 μs บริเวณค่ายอด



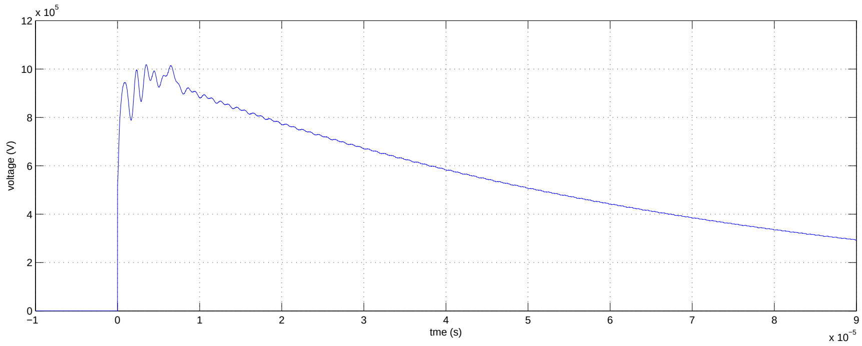
รูปที่ 4.11: รูปแสดงหลังคลื่นที่ประดิษฐ์ได้จากตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน

ผลการประเมินพารามิเตอร์จากทั้ง 2 วิธีพบว่า วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถประเมินได้ทุกกรณี แต่พารามิเตอร์จากบริเวณหน้าคลื่นมีความบิดเบี้ยวมากกว่าบริเวณหลังคลื่น ในขณะที่วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน สามารถประดิษฐ์รูปคลื่นบริเวณหลังคลื่นได้เท่านั้น แต่หน้าคลื่นไม่สามารถสร้างรูปคลื่นประดิษฐ์ได้ จึงทำให้ไม่สามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ เนื่องจากพารามิเตอร์ทุกตัวต้องอาศัยจุดเริ่มต้นเสมือน (O_1) เป็นหลัก และเวลาหน้าคลื่นต้องอาศัยเวลายกตัว (t_r) ซึ่งหลังคลื่นที่ประดิษฐ์ได้ด้วยกรรมวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานเป็นดังรูปที่ 4.11 และตารางสรุปผลเป็นดังตารางที่ 4.10

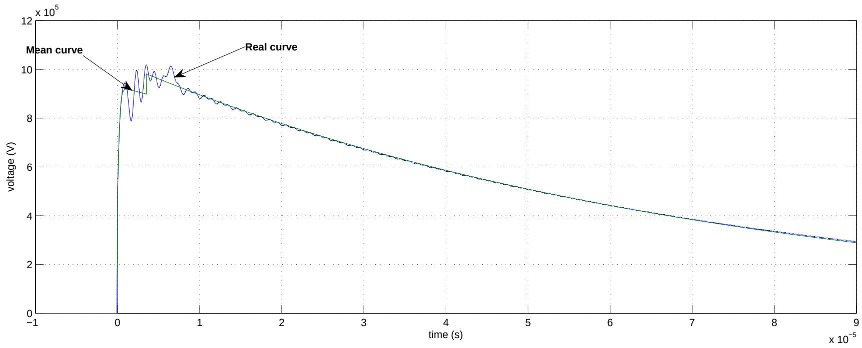
4.3.3 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 3

สำหรับกรณีที่ 3 นี้ จะเป็นรูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง ซึ่งในกรณีผู้เชี่ยวชาญประเมินให้รูปคลื่นมีอัตราส่วนหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.05/50 μs ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นที่นำมาทดสอบ แสดง

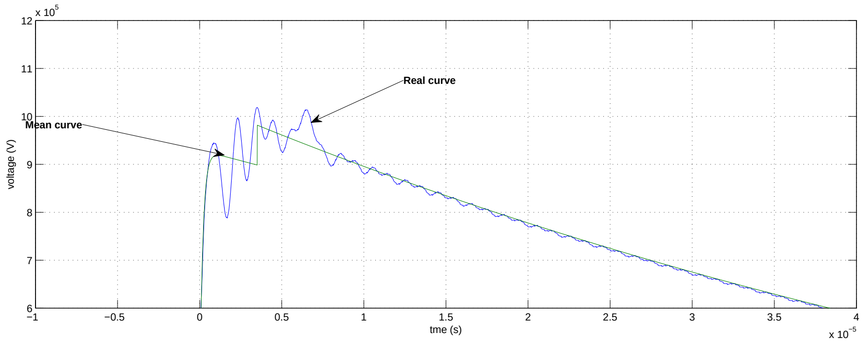
ได้ดังรูปที่ 4.12 ผลการประเมินพารามิเตอร์ของคลื่นกรณีดังกล่าวนี้ (ตามตารางที่ 4.11)



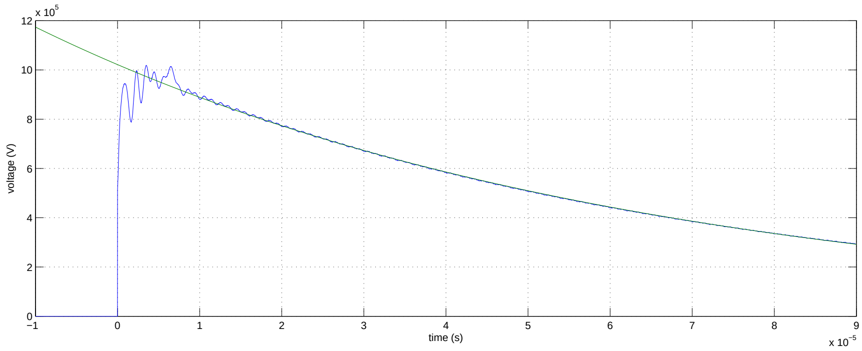
รูปที่ 4.12: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.05/50 μs



รูปที่ 4.13: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.05/50 μs และรูปคลื่นที่ประเมินได้โดยวิธี LM



รูปที่ 4.14: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.05/50 μs บริเวณค่ายอด



รูปที่ 4.15: รูปแสดงหลังคลื่นที่ประดิษฐ์ได้จากตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน

	V_p(MV)	T_1 (μs)	T_2 (μs)
Unscented kalman filter	-	-	-
Levenberg - Marquardt	0.992	2.601	49.093

ตารางที่ 4.11: ตารางแสดงการผลการประเมินรูปคลื่นจากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 3

พบว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถประเมินได้ทุกพารามิเตอร์ โดยพารามิเตอร์ที่ผิดพลาดมากที่สุดคือ เวลาหน้าคลื่น (T_1) ซึ่งเกิดจากบริเวณหน้าคลื่นมีความผิดเพี้ยนมาก ในขณะที่ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานจะประเมินได้เฉพาะหลังคลื่น โดยรูปคลื่นที่ประดิษฐ์ได้จากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทในส่วนของรูปคลื่นสมบูรณ์และภาพขยายบริเวณยอดคลื่นแสดงไว้ในรูปที่ 4.3.2 และ 4.14 ตามลำดับ และสำหรับรูปคลื่นประดิษฐ์บริเวณหลังคลื่นของตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ผลสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ความผิดพลาดของหน้าคลื่น

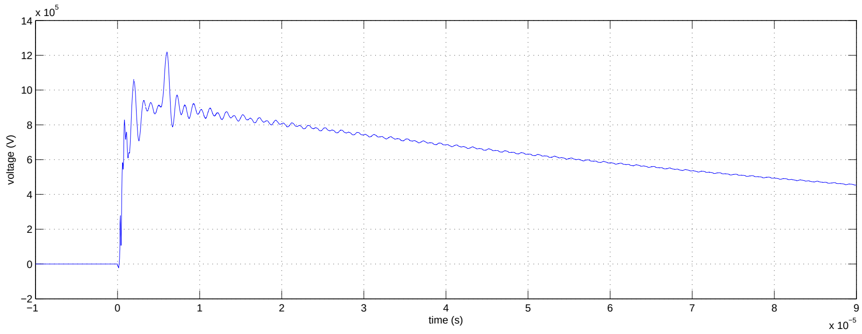
$$\text{error} = \frac{|2.601 - 1.05|}{1.05} \times 100 = 147.71\% \tag{4.7}$$

ความผิดพลาดของหลังคลื่น

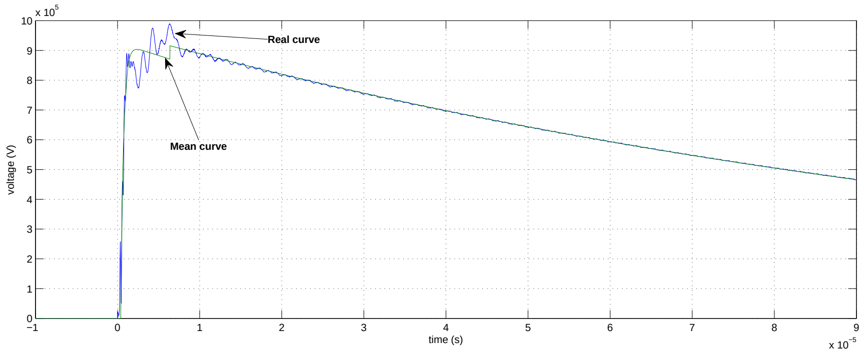
$$\text{error} = \frac{|49.093 - 50|}{50} \times 100 = 1.814\% \tag{4.8}$$

4.3.4 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 4

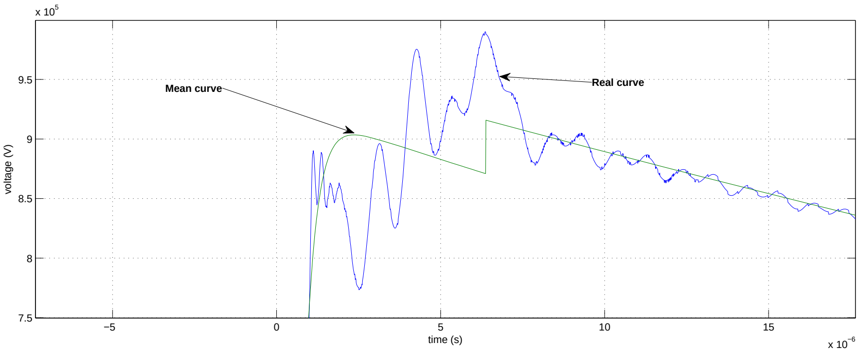
การทดลองซอฟท์แวร์สำหรับประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงนี้ เป็นกรณีสุดท้ายซึ่งรูปคลื่นที่ได้จะมีอัตราส่วนหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.13/86.5 μs ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.16 และรูปคลื่นที่ประดิษฐ์ได้ด้วยวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3.4 **ความผิดพลาดของหน้าคลื่น**



รูปที่ 4.16: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.13/86.5 μs

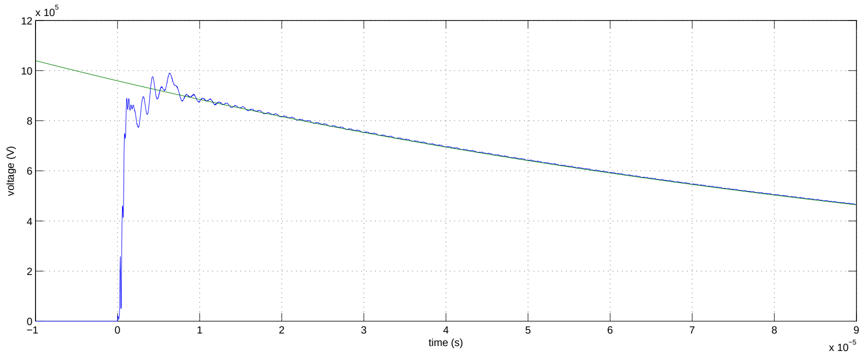


รูปที่ 4.17: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.05/50 μs และรูปคลื่นที่ประเมินได้โดยวิธี LM



รูปที่ 4.18: รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง มีอัตราส่วนเวลาหน้าคลื่น/หลังคลื่นเป็น 1.05/50 μs บริเวณค่ายอด

$$\text{error} = \frac{1.898 - 1.13|}{1.13} \times 100 = 98.102\% \tag{4.9}$$



รูปที่ 4.19: รูปแสดงหลังคลื่นที่ประดิษฐ์ได้จากตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน

	V_p (MV)	T_1 (μs)	T_2 (μs)
Unscented kalman filter	-	-	-
Levenberg - Marquardt	0.988	1.898	82.816

ตารางที่ 4.12: ตารางแสดงการประเมินพารามิเตอร์ที่ได้จากหม้อแปลงกรณีทดลองที่ 4

ความผิดพลาดของหลังคลื่น

$$\text{error} = \frac{|82.816 - 86.5|}{86.5} \times 100 = 4.26\% \tag{4.10}$$

ผลจากการทดลองตามตารางที่ 4.12 พบว่า วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถประเมินได้เวลาหลังคลื่นแม่นยำ มีความผิดพลาดเล็กน้อย แต่เวลาหน้าคลื่นมีความผิดพลาดเกือบเท่าตัว เนื่องด้วยผลของความเพี้ยนบริเวณหน้าคลื่นที่มาก ในขณะที่ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานสามารถประเมินได้เฉพาะบริเวณหลังคลื่นเท่านั้น พารามิเตอร์เสมือนอย่าง จุดเริ่มต้นเสมือน จึงไม่สามารถหาได้ ทำให้พารามิเตอร์อย่างอื่นไม่สามารถหาได้ด้วยเช่นกัน Yan Zhao et. al. [5] ได้แสดงข้อสนเทศเกี่ยวกับความผิดพลาดไว้ว่า หากแบบจำลองที่ใช้ในการประเมินมีความผิดพลาด ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานจะได้รับผลกระทบมาก ซึ่งในกรณีการทดลองกับหม้อแปลงนี้ หากพิจารณาให้ดีจะพบว่า การแกว่งบริเวณยอดคลื่นและหน้าคลื่นตามปรกติไม่ถือเป็นการรบกวน และไม่ควรถือว่ามีการกระจายแบบเกาส์ ดังนั้นเมื่อตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน ไม่ได้พิจารณาความเพี้ยนดังกล่าวเป็นการรบกวน มันจะถือว่าเป็น **ข้อมูลของระบบ** แต่แบบจำลองที่ใช้ตามทฤษฎีเป็นสมการเลขชี้กำลังคู่ ซึ่งไม่มีการแกว่ง ตัวกรองอันเซนท์เท็ทจึง “มองว่า” เป็นความผิดพลาดของแบบจำลอง

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการทดสอบรูปคลื่นอยู่ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการทดสอบบนโปรแกรม TDG ซึ่งเป็นโปรแกรมกำเนิดรูปคลื่นตามมาตรฐาน แนวทางนำเสนอจะพิจารณาเรื่องของเวลาที่ใช้พร้อมทั้ง ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ขนาดของตัวแปรหรือหน่วยความจำที่กรรมวิธีทั้ง 2 ต้องใช้ จำนวนชนิดของรูปคลื่นที่วิธีทั้ง 2 ประเมินพารามิเตอร์ผ่านตามเกณฑ์ รวมถึงการสรุปข้อจำกัดที่เป็นไปได้ของแต่ละวิธี ในกรณีที่กรรมวิธีใด ไม่สามารถประเมินพารามิเตอร์จากรูปคลื่นทดสอบได้ และขั้นตอนที่ดำเนินการกับรูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลง จะพิจารณาถึงความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ประเมินได้ โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ รวมถึงสรุปข้อจำกัดที่อาจเป็นไปได้สำหรับการทดลองบนรูปคลื่นจากหม้อแปลง

5.1 สรุปผลการดำเนินการบนโปรแกรม TDG

เป็นการสรุปผลที่ได้จากขั้นตอนของการประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่นทดสอบที่ได้จากโปรแกรม TDG โดยแยกเป็นประเด็นย่อยๆ ดังต่อไปนี้

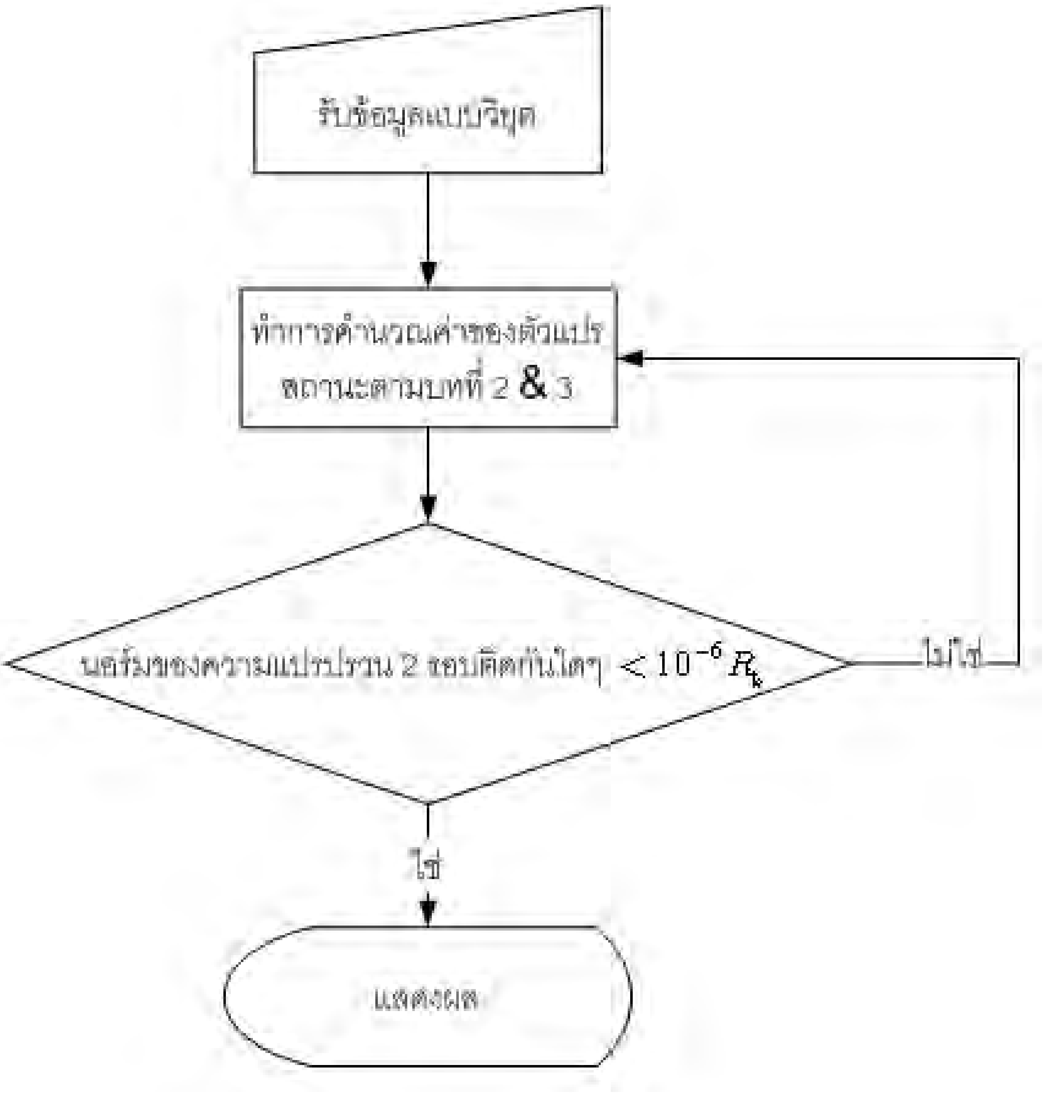
5.1.1 เวลาที่ใช้ในการประมวลผล

วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทอาศัยการสร้างเมทริกซ์จาโคเบียนเพื่อการปรับปรุงค่าตัวแปร x ให้เข้าสู่คำตอบโดยต้องการเพียงค่าเริ่มต้น และฟังก์ชัน (แบบจำลอง) ที่ใช้จะขึ้นกับจำนวนรอบที่วิธีนี้ต้องดำเนินการ โดยค่าเริ่มต้น เป็นปัจจัยสำคัญอันหนึ่งที่มีผล หากเริ่มต้นได้ใกล้กับคำตอบ จำนวนรอบจะน้อย ส่งผลให้เวลาที่ใช้น้อยตามไปด้วย ดังแผนผัง 5.2 แต่หากค่าเริ่มต้นอยู่ไกลจากคำตอบ จำนวนรอบจะมากโดยมีเกณฑ์ตรวจสอบ สำหรับหยุดดำเนินการคือค่าของ λ จะต้องไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด ($\lambda \notin [10^{-20}, 10^{20}]$) หากค่าเริ่มต้นอยู่ห่างจากคำตอบมาก ค่า λ นี้จะต้องปรับปรุงบ่อยครั้งมากขึ้น นอกจากนี้การสร้างเมทริกซ์จาโคเบียนเพื่อใช้ในการปรับปรุงค่าของ $x^{(k)}$ จะต้องมีการคำนวณใหม่ ซึ่งส่วนของการคำนวณจาโคเบียนนี้เอง เป็นอีกปัจจัยที่ทำให้วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทจะต้องใช้เวลามากกว่าขั้นตอนอื่นๆ ซึ่งอยู่ในกรรมวิธี แผนผังแสดงการหยุดทำงานและเงื่อนไขที่ใช้ปรับปรุงค่าเป็นดังรูปที่ 5.2

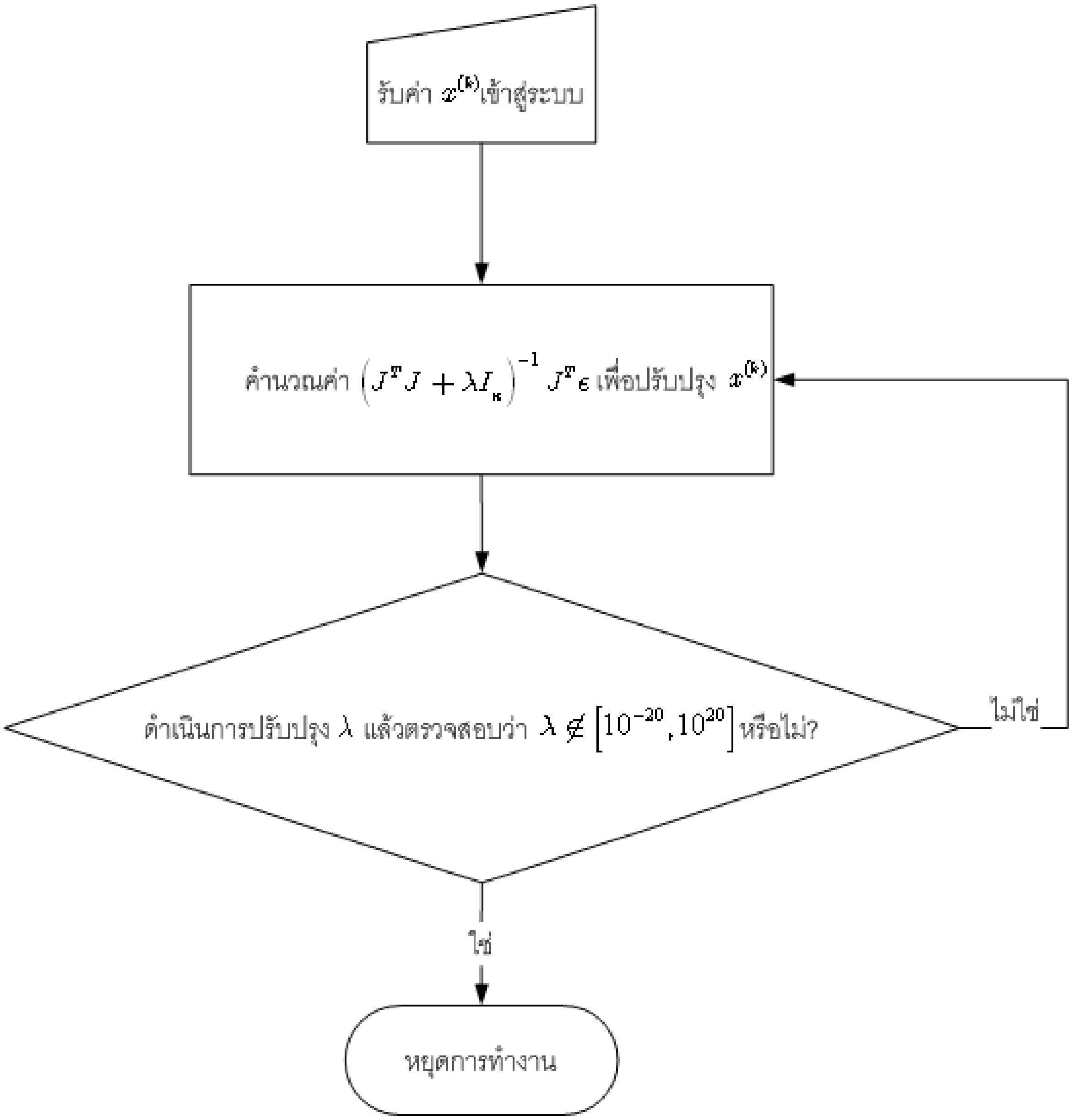
วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน อาศัยการแปลงอันเซนท์เท็ทและการเลื่อนจุดซิกม่าเพื่อนำไปสู่การปรับปรุงตัวแปรสถานะ $\hat{x}$ ซึ่งการแปลงอันเซนท์เท็ท จะต้องอาศัยการหารากที่สองของเมทริกซ์ความแปรปรวน ($\sqrt{P}$) และในการวนรอบ 1 รอบจะต้องคำนวณถึง 3 ครั้ง ซึ่งทำให้ต้องใช้เวลา

มาก และการเลื่อนจุดซิกม่าซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ร่วมกับการเลือกจุดซิกม่า เพื่อให้เกิดความแม่นยำของผลการทดลองนั้น ต้องอาศัยเวลาที่เทียบเท่ากับการเลือกจุดซิกม่าอีกครั้ง เพียงแต่ในขั้นนี้ไม่มีการคำนวณรากที่ 2 ของความแปรปรวน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงเกณฑ์การลู่เข้าสู่ผลเฉลยตามรูปที่ 5.1 แล้วนั้น ตัวกรองอันเซนท์เท็ทมีอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบช้ากว่ากรณีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท

ดังนั้นในส่วนของการใช้เวลาในการประมวลผล ตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานใช้เวลามากกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท



รูปที่ 5.1: รูปแสดงเกณฑ์การหยุดทำงานของวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมาน



รูปที่ 5.2: รูปแสดงเกณฑ์การหยุดทำงานของวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท

5.1.2 ค่าเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการ

วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถใช้ค่าเริ่มต้นที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ได้โดยไม่มีปัญหา คำตอบที่ได้จากการดำเนินการสามารถให้ค่าของพารามิเตอร์ของรูปคลื่นฟ้าผ่า ได้ตรงตามเกณฑ์ทุกกรณีของโปรแกรม TDG ถึงแม้ว่าสมการที่ใช้ในการประดิษฐ์รูปคลื่นอาจมีข้อแตกต่างในบางกรณีของโปรแกรม TDG อาทิเช่นรูปคลื่น TDG กรณีที่ 4 (LIFA) มีการใช้สมการที่ 3.2 สำหรับประดิษฐ์หน้าคลื่นนั้น วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถประเมินได้ถูกต้องตามเกณฑ์

วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานสามารถใช้ค่าเริ่มต้นดังที่เสนอไว้ในบทที่ 3 ได้แต่เพียงเฉพาะขั้นตอนการประดิษฐ์หางคลื่นซึ่งประกอบด้วยจุดข้อมูลประมาณ 8,000 จุดเท่านั้น แต่ในการประดิษฐ์หน้าคลื่นจำเป็นต้องมีกรรมวิธีอย่างอื่นเพิ่มเติมก่อน ในงานวิจัยนี้อาศัยตัวกรองคาลมานขยายตามแนวทางของ Pérez et al. [12] เป็นกรรมวิธีในการหาค่าเริ่มต้นเพื่อใช้ในการคำนวณ แต่ถึงกระนั้นการประเมินพารามิเตอร์ของรูปคลื่น ก็ยังไม่สามารถทำได้ทุกกรณีดังเช่น วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท

5.1.3 ความถูกต้องของคำตอบ

ในที่นี้หมายถึงพารามิเตอร์ของรูปคลื่นฟ้าผ่าที่ประเมินได้ สำหรับวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถประเมินรูปคลื่นได้ถูกต้องทุกประเภทของโปรแกรม TDG แม้เป็นรูปคลื่นที่มีการรบกวนไม่เกิน 5% ของแรงดันค่ายอด หรือรูปคลื่นที่มีการแกว่งไม่เกิน 500 kHz วิธีดังกล่าวสามารถประเมินพารามิเตอร์รูปคลื่นได้ตรงตามมาตรฐาน ในขณะที่วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานนั้น จะประเมินพารามิเตอร์รูปคลื่นฟ้าผ่าได้ดีเฉพาะกรณีซึ่ง การแกว่งมีความถี่มากกว่า 500 kHz, การรบกวนไม่สามารถกำหนดค่าได้หรือ รูปคลื่นเรียบไร้การรบกวนเท่านั้น ส่วนรูปคลื่นที่มีขนาดการรบกวนไม่เกิน 5% ของค่ายอด วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทสามารถทำได้ **เป็นบางรูปคลื่นเท่านั้น**

โดยสรุปจากการทดสอบซอฟท์แวร์กับรูปคลื่นทดสอบที่กำเนิดจากโปรแกรม TDG พบว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทสามารถประเมินพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้องด้วยเวลาที่น้อยกว่า ค่าเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกับคำตอบน้อยกว่าวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานมาก โดยเฉพาะเรื่องของเวลาวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานจะใช้เวลาประมาณ 3-5 วินาทีในขณะที่วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทใช้เวลาโดยประมาณเพียง 1 วินาทีเท่านั้น และสำหรับค่าเริ่มต้น วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานต้องอาศัยกรรมวิธีอื่นช่วยในการหาค่าเริ่มต้นก่อน ในกรณีที่ขั้นตอนที่ดำเนินการ (เช่น ขั้นตอนการประดิษฐ์หน้าคลื่น เป็นต้น) มีจำนวนจุดสำหรับคำนวณน้อย การเริ่มต้นโดยวิธีในบทที่ 3 ไม่เพียงพอต่อการดำเนินการ

5.2 สรุปผลการดำเนินการบนรูปคลื่นฟ้าผ่าที่ได้จากหม้อแปลง

รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงในงานวิจัยนี้ เป็นรูปคลื่นที่มีความผิดปกติบริเวณหน้าคลื่นและยอดคลื่นมาก โดยลักษณะของยอดคลื่นจะเลื่อนไปทางขวาของแกนเวลา (เมื่อเปรียบเทียบกับรูปคลื่น

ตามมาตรฐาน) และเสมือนมียอดคลื่นซ้อนบริเวณหน้าคลื่น ปัญหาสำคัญสำหรับขั้นตอนดำเนินการของทั้ง 2 กรรมวิธีคือ **การแบ่งงานเป็น 2 ขั้นตอน** คือ การประดิษฐ์ส่วนหางคลื่นก่อน แล้วนำค่าที่ได้มาประดิษฐ์หน้าคลื่น วิธีดังกล่าวนี้จะได้ผลดี **ก็ต่อเมื่อการรบกวนบริเวณยอดคลื่นและหน้าคลื่นมีขนาดไม่มาก** แต่ถึงกระนั้นวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทยังสามารถประเมินรูปคลื่นได้ แม้ค่าที่ได้จะมีความผิดพลาดในบางพารามิเตอร์ ดังนั้นหากเปลี่ยนขั้นตอนวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทอาจจะสามารถประมวลผลได้ สำหรับวิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานนั้น เห็นได้ค่อนข้างชัดเจนว่ายังเป็นวิธีที่มีอุปสรรคอยู่ในเรื่องของค่าเริ่มต้น การหาค่ารากที่สองของเมทริกซ์ความแปรปรวน ($\sqrt{P}$) เป็นจุดอ่อนของวิธีดังกล่าวนี้ กล่าวคือนอร์มของเมทริกซ์จะลดลงเรื่อยๆ หากว่าเมื่อใดที่ ค่าลักษณะเฉพาะค่าใดค่าหนึ่งเป็นลบ จะส่งผลให้กระบวนการหยุดลงแม้ว่านอร์มของความแปรปรวน 2 รอบติดใดๆ ยังไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนด

5.3 วิเคราะห์ผลที่ได้

สำหรับกรรมวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท การหาค่าเหมาะสมที่สุดจะอาศัยแบบจำลองเป็นหลักและข้อมูลที่รับเข้ามาในระบบเพื่อปรับปรุงค่านั้น จะทำหน้าที่ปรับรูปโค้งให้เหมาะต่อแบบจำลอง จึงเป็นวิธีที่มักจะหาค่าที่เหมาะสมสุดได้เสมอ สำหรับในกรณีการปรับรูปโค้งเพื่อประดิษฐ์รูปคลื่นดลฟ้าผ่า กรรมวิธีนี้สามารถทำได้ดีทุกกรณี แม้แต่กับรูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงก็สามารถประดิษฐ์รูปคลื่นได้ แม้พารามิเตอร์จะไม่ถูกต้องในบริเวณหน้าคลื่นก็ตาม

ในกรณีของตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานจะประสบปัญหาเรื่องเมทริกซ์ความแปรปรวนไม่นิยามบวกบ่อยครั้ง เมื่อพิจารณาผลการทดลองย่อยๆ จะสรุปได้เป็นประเด็นดังต่อไปนี้

- การเริ่มต้นความแปรปรวนนั้น หากค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะ (x_0) มีค่าน้อย แต่มีความถูกต้องสูง (โดยอาศัยการหาค่าเหมาะสมสุดเชิงเส้นก่อน) จะต้องเพิ่มค่าของความแปรปรวนขึ้นมาอยู่ในระดับไม่เกิน 10^2 เสียก่อนจึง จะประมวลผลได้ เนื่องด้วยถ้าความแปรปรวนมีค่าน้อยเกินไป จะเกิดสภาวะสูญเสียความแม่นยำ (Loss of precision) แต่ถ้าหากว่ามีค่ามากเกินไป จะเป็นการแสดงว่า **ไม่เชื่อ** ในค่าเริ่มต้น ซึ่งไม่ถูกต้องเพราะในกรณีนี้ได้กำหนดว่า ค่าเริ่มต้นถูกต้อง

- หากค่าเริ่มต้นไม่ถูกต้อง ย่อมส่งผลต่อคำตอบที่ได้รวมไปถึงการลู่เข้าสู่คำตอบที่ถูกต้อง เพราะเมื่อพิจารณาตามสมการ

$$\tilde{x}^{(i)} = \alpha x^{(i)} + (1-\alpha)x^{(0)} \tag{5.1}$$

  แสดงว่าจุดซิกม่าทุกรอบที่แปลง จะขึ้นกับ $x^{(0)}$ ซึ่งคือตัวแปรสถานะของรอบก่อนหน้า นั่นแสดงว่าทุกรอบที่ผ่านไป กรรมวิธีนี้จะ **เชื่อ** ในค่าที่ได้จากรอบก่อนหน้าเป็นหลัก

การหารากที่ 2 ของความแปรปรวนเป็นจุดอ่อนของกรรมวิธีนี้ด้วยเหตุที่ว่า ปัจจัยที่ทำให้ความแปรปรวนไม่นิยามบวกก่อนที่จะมีขนาดเล็กๆ เกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ทั้งแบบจำลองที่ไม่ถูกต้อง

การรบกวนไม่เป็นแบบเกาส์อย่างสมบูรณ์ รวมไปถึงค่าเริ่มต้นไม่ใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้อง (ซึ่งผู้ทำการทดลองไม่อาจทราบได้ล่วงหน้าทุกกรณี)

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. มาตรฐานที่กำหนดขึ้น (IEC1083-2) และงานของ Pérez et al. [11],[12] ยังเป็นกระบวนการที่จำกัดอยู่แต่เพียงเฉพาะรูปคลื่นทดสอบจากสายเคเบิลเท่านั้น ยังไม่ครอบคลุมถึงกรณีของหม้อแปลงซึ่งมีลักษณะรูปคลื่นที่บิดเบี้ยวมากกว่าได้ จึงอาจจะต้องมีการกำหนดมาตรฐานสำหรับรูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงเป็นพิเศษ
2. กระบวนการที่แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน แม้จะมีความสะดวกในการเริ่มต้นค่าพารามิเตอร์ แต่ก็ยังเป็นจุดอ่อนในกรณีที่หน้าคลื่นมีสัณฐานผิดธรรมดา ควรมีการปรับปรุงเรื่องขั้นตอนการดำเนินการนี้
3. ไม่ควรประยุกต์ใช้วิธีตัวกรองอันเซนท์เท็ทคาลมานกับการปรับเส้นโค้ง ซึ่งไม่สามารถหาค่าเริ่มต้นได้อย่างแม่นยำ

รายการอ้างอิง

1. IEC60060-1. International standard, High voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements. 2010-09
2. IEC60060-2. International standard, High voltage test techniques - Part 2: Mearsuring systems. 2010-11
3. IEC1083-2 (1996). International standard, Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms. 1996-07
4. K. Hackemack, P. Werle, E. Gockenbach, H. Borsi. A New Proposal for the Evaluation of Lightning Impulses. Proceedings of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 21-26, 2000
5. Yan Zhao, She-sheng Gao, Jing Zhang, and Qiao-nan Sun. Robust Predictive Augmented Unscented Kalman Filter. International Journal of Control, Automation, and Systems (2014), pp.996 - 1004
6. Brede A. P. Werle P. Gockenbach E., Borsi H. A New method of determining the mean curve of lightning impulses according to IEC 60060-1. International symposium on high voltage engineering 467 August 1999, p.74-77
7. Simon J. Julier, Jeffrey K. Uhlmann. Unscented filtering and nonlinear estimation. Proceedings of the IEEE, Vol.92, No.3, March 2004
8. Simon J. Julier. The scaled unscented transformation. Prceeding of the American control conference Anchorage, AK, May 8-10, 2002
9. Lubin chang, et. al. Transformed unscented kalman filter. IEEE transactions on automatic control, Vol 58, No. 1, jan 2013
10. T. R. McComb, J.E. Lagnese. Calculating the parameters of full lightning impulses using model-based curve fitting. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, October 1991

11. J. Pérez, J. Martínez. Digital recorded lightning impulse with overshoot parameter evaluation by using the kalman filtering method. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No.4, October 1998

12. J. Pérez, J. Martínez. Kalman filter algorithm for digitally recorded lightning impulse parameter evaluation. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, October 1996

13. D. Simon. Optimal state estimation kalman, H_∞, and nonlinear approaches. John Wiley & Sons Publication, 2006

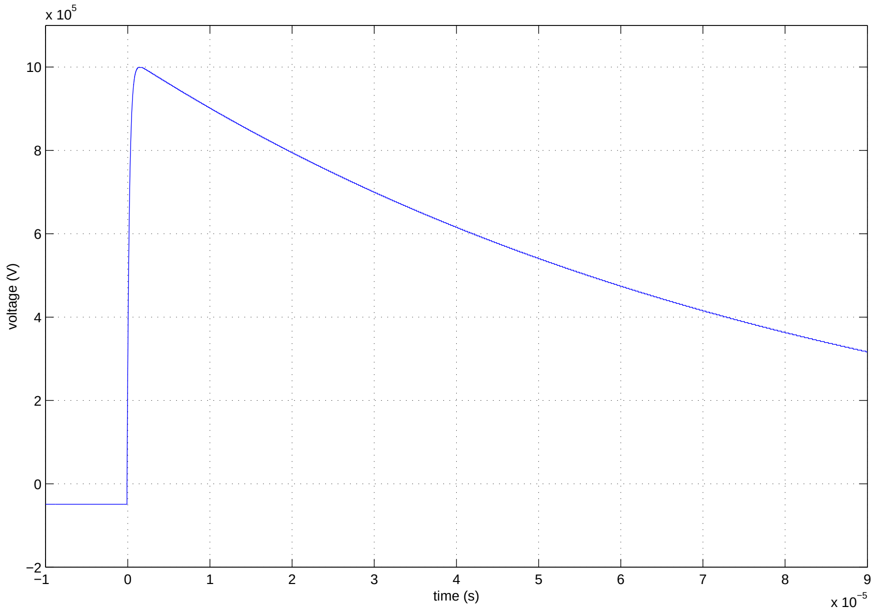
14. นพดล โคตรพันธ์. การศึกษาเชิงเปรียบเทียบการประเมินค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยวิธีตัวกรองคาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548

ภาคผนวก

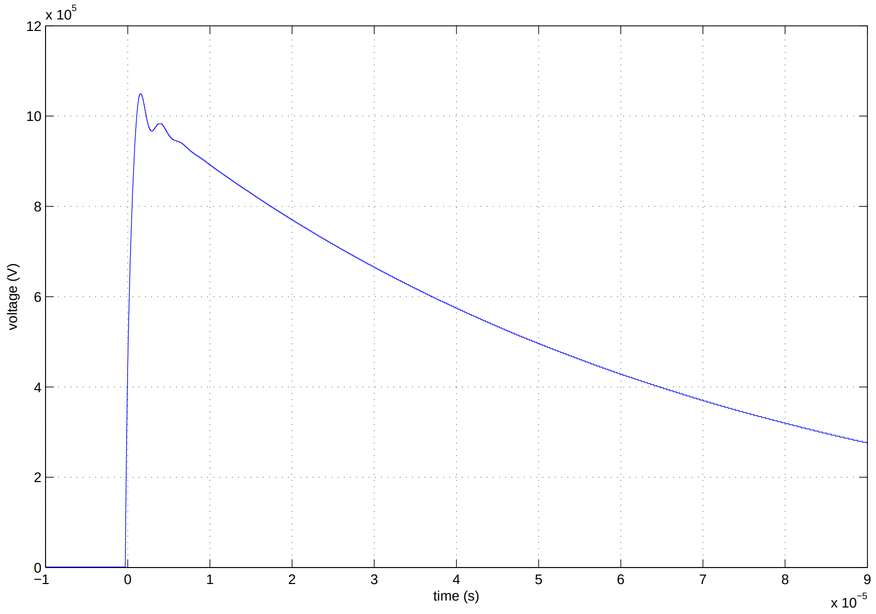
ภาคผนวก ก

รูปคลื่นดลที่เกิดจากโปรแกรมทดสอบ TDG

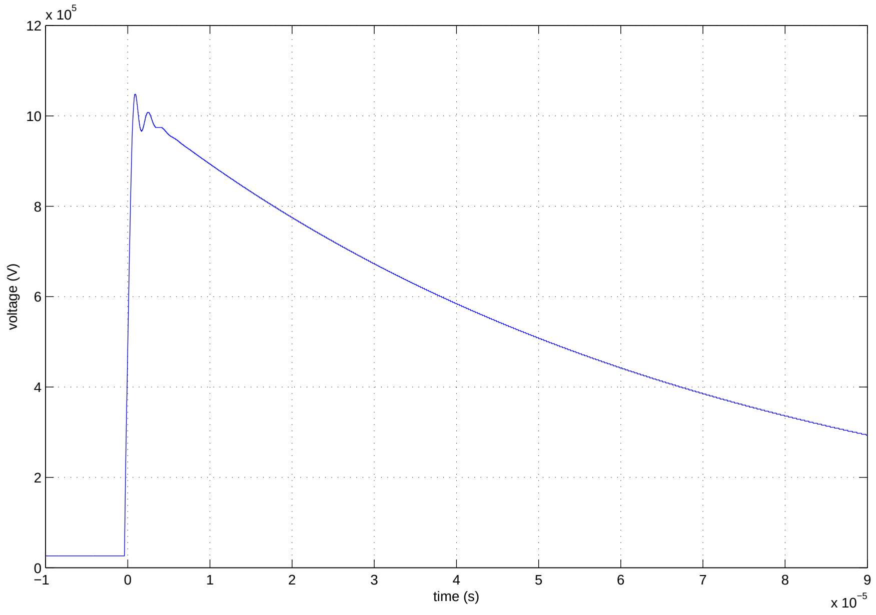
รูปคลื่นที่กำเนิดจากโปรแกรม TDG ซึ่งเป็นส่วนแนบท้ายของมาตรฐาน IEC1083-2



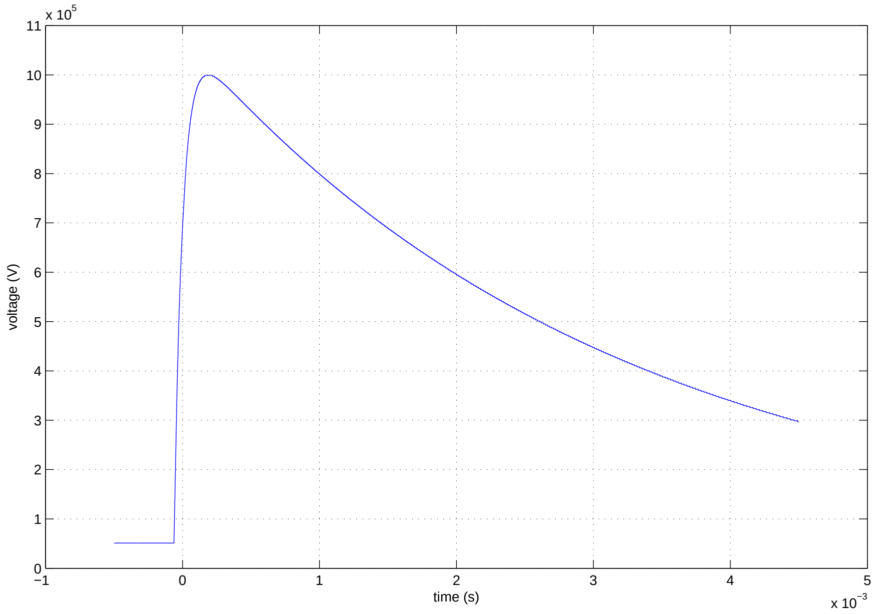
รูปที่ ก.1: รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 1 (LI)



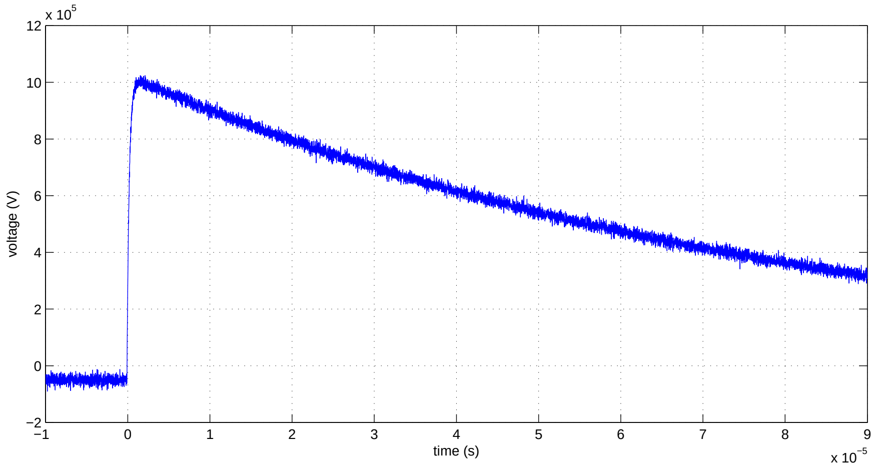
รูปที่ ก.2: รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 3 (LISL)



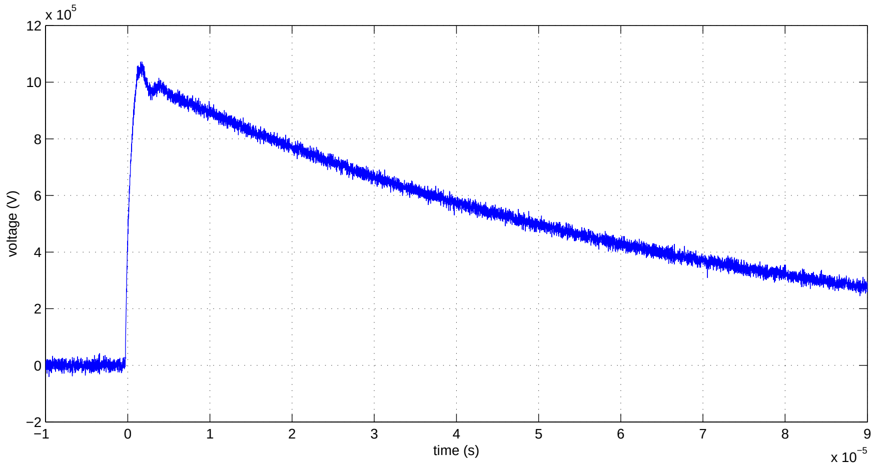
รูปที่ ก.3: รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 4 (LIFA)



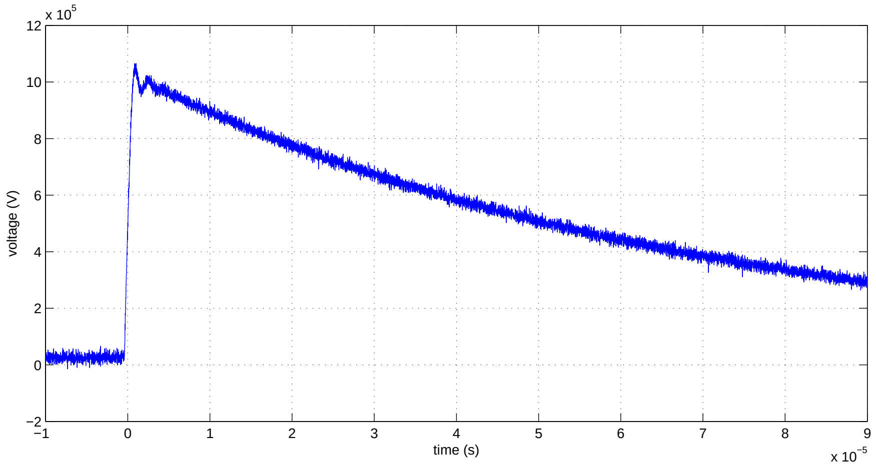
รูปที่ ก.4: รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 5 (SI)



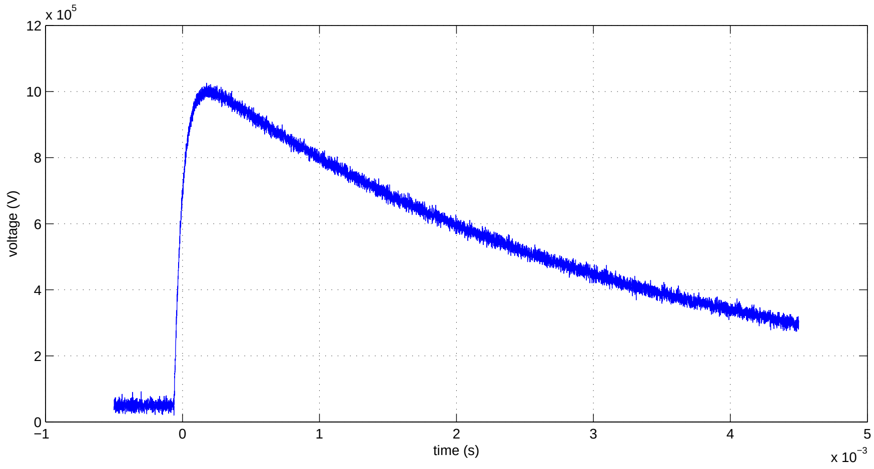
รูปที่ ก.5: รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 6 (LI with noise)



รูปที่ ก.6: รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 8 (LISL with noise)



รูปที่ ก.7: รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 9 (LIFA with noise)



รูปที่ ก.8: รูปคลื่นมาตรฐานจากโปรแกรม TDG กรณีที่ 10 (SI with noise)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกพล สุริยานุภาพ เกิดเมื่อวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ.2527 กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2550 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2553