

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบการประเมินค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
โดยวิธีตัวกรองกาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์



นายนพดล โคตรพันธ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

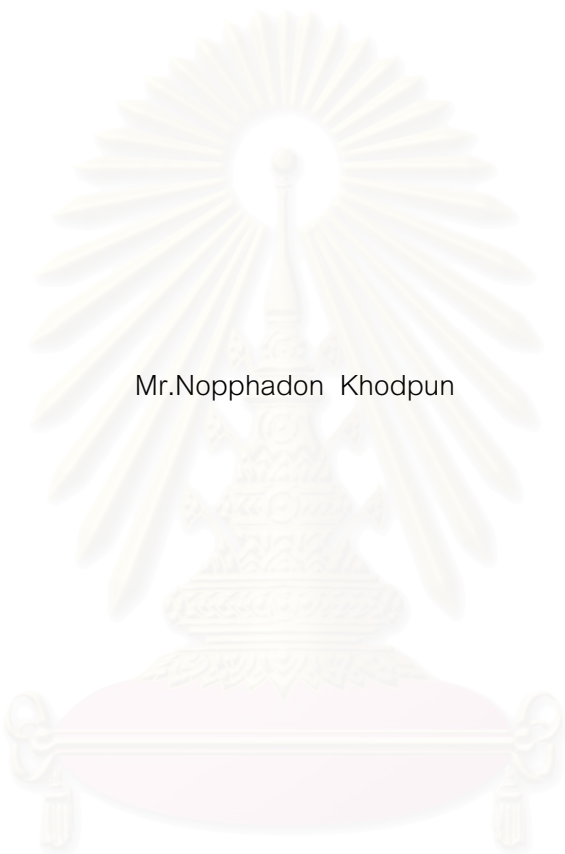
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2962-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARATIVE STUDY ON THE EVALUATION OF IMPULSE VOLTAGE PARAMETER
BY THE KALMAN FILTER METHOD AND THE LEVENBERG-MARQUADT METHOD



Mr.Nopphadon Khodpun

สถาบันวิทยบริการ
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 2005

ISBN 974-53-2962-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบการประเมินค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดัน
อิมพัลส์ โดยวิธีตัวกรองกาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

โดย

นายนพดล โครตรพันธ์

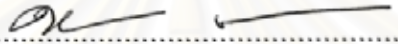
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

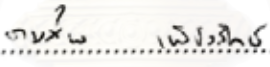
อาจารย์ที่ปรึกษา

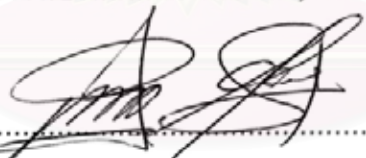
อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รัตสีวิจิตรประภา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวันยศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัช)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รัตสีวิจิตรประภา)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพงษ์ ไชวฑูรกิจ)

นพดล โศทรพันธ์ : การศึกษาเชิงเปรียบเทียบการประเมินค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยวิธีตัวกรองคาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์.

(COMPARATIVE STUDY ON THE EVALUATION OF IMPULSE VOLTAGE PARAMETER BY THE KALMAN FILTER METHOD AND THE LEVENBERG-MARQUADT METHOD)

อ.ที่ปรึกษา : ดร.วีระพันธ์ รังสีจิตรประภา, 112 หน้า. ISBN 974-53-2962-2.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเปรียบเทียบการประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยวิธีตัวกรองคาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ใช้รูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรม TDG ตามมาตรฐาน IEC 1083-2 จำนวน 14 กรณี เฉพาะส่วนที่เป็นแรงดัน เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบ การประดิษฐ์รูปคลื่นเฉลี่ย ใช้วิธีแบ่งรูปคลื่นออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนหน้าคลื่นและส่วนหลังคลื่น สำหรับรูปคลื่นเต็ม ส่วนรูปคลื่นสับหน้าคลื่นจะทำการตั้งพารามิเตอร์ของรูปคลื่นจำลองในส่วนหลังคลื่นให้คงที่ โดยมีค่า $\alpha=1/(68.5 \mu\text{s})$ และในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอวิธีการหาค่าเริ่มต้นเพื่อใช้ประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่แตกต่างไปจากงานวิจัยที่ผ่านมา

ผลการศึกษากับรูปคลื่นอ้างอิงพบว่า วิธีการหาค่าเริ่มต้นที่นำเสนอ ทำให้ได้ผลลัพธ์ของวิธีตัวกรองคาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด โดยวิธีตัวกรองคาลมานได้ค่าพารามิเตอร์ที่มีความเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยขอบเขตมาตรฐานในแต่ละกรณี ต่ำกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ แต่วิธีตัวกรองคาลมานใช้เวลาในการคำนวณรูปคลื่นสับนานกว่า และการเลือกวิธีการที่นำมาใช้ ควรพิจารณาจากจำนวนจุดข้อมูล กล่าวคือ วิธีตัวกรองคาลมานมีความเหมาะสมกับจำนวนจุดข้อมูลมาก ขณะที่วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์เป็นไปในทางกลับกัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2548.....

4570366821 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: KALMAN FILTER / LEVENBERG-MARQUADT / LIGHTNING IMPULSE
PARAMETER / TDG / INITIAL VALUE

NOPPHADON KHODPUN : COMPARATIVE STUDY ON THE EVALUATION OF
IMPULSE VOLTAGE PARAMETER BY THE KALMAN FILTER METHOD AND
THE LEVENBERG-MARQUADT METHOD. THESIS ADVISOR : WEERAPUN
RUNGSEEVIJITPRAPA, DR.-Ing , 112 pp. ISBN 974-53-2962-2.

Comparative study on the evaluation of impulse voltage parameter by the Kalman filter method and the Levenberg-Marquadt method has been studied in this thesis. All the impulse voltage waveforms, i.e. 14 cases, described as TDG program in IEC standard 61083-2, were used as references. All cases of impulse fullwave voltage are divided into two parts, e.g. front and tail, and evaluated for the mean curve. In spite of the chopped wave voltage, the tail mean curve are fixed with the α of $1/(68.5 \mu\text{S})$. The initial parameters, used to find out the mean curve and differed from any previous works, are present.

The studies with reference voltages are found that using these initial parameters can get the parameter evaluation results taken from both Kalman filter and Levenberg-Marquadt method for all the reference impulse voltage waveforms. The Kalman filter method can provide less deviation from the mean value of each tolerance. However, the Kalman filter method spent larger evaluation time for chopped voltage. The selection method should be considered on the number of data, because the Kalman filter method is appropriate with the large data whereas the Levenberg-Marquadt method is vice versa.

Department.....Electical Engineering.....Student's signature.....*N. Khodpun*
Field of study.....Electical Engineering.....Advisor's signature.....*W. Rungseevijitprapa*
Academic year2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรพงษ์ โขวิฑูรกิจ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ที่กรุณาให้ทุนการศึกษา ในระหว่างศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่เริ่มศึกษาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ท้ายนี้ ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง ที่คอยให้กำลังใจตลอดมา และขอขอบพระคุณทุก ๆ ท่านที่มีส่วนร่วมในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์นี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

๗

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1.บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของปัญหา.....	1
1.2 มาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้	2
1.3 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต.....	2
1.3.1 วิธีการ Polynomial Curve Fitting	2
1.3.2 วิธีการ Cubic Spline Interpolation	4
1.3.3 วิธีการ Radial Basis Neural Network Function Approximation ..	4
1.3.4 วิธีการของ Prony	5
1.3.5 วิธีการ Genetic Algorithm.....	6
1.3.6 วิธีการใช้ K-Factor	7
1.3.7 วิธีเลขเวกเตอร์-มาร์คควอดท์.....	8
1.3.8 วิธีตัวกรองคาลมาน	10
1.4 การศึกษาวิจัยครั้งนี้.....	12
1.5 วัตถุประสงค์.....	12
1.6 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์	12
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
2.รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน	14
2.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	14
2.2 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน	16
2.2.1 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ไม่มีภาวะรบกวน	17
2.2.1.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 ...	17

บทที่	หน้า
2.2.1.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 ...	18
2.2.1.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง ตามมาตรฐาน IEC 60060-1.....	20
2.2.2 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เมื่อมีภาวะรบกวน	20
2.2.3 โปรแกรมมาตรฐาน TDG	21
2.3 วิธีการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในงานวิจัยครั้งนี้.....	31
2.3.1 วิธีตัวกรองกาลมาน.....	31
2.3.2 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์	38
3.การเปรียบเทียบวิธีตัวกรองกาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์.	41
3.1 หลักเกณฑ์ในการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์รูปคลื่น.....	41
3.2 รูปแบบข้อมูลเข้า	41
3.3 การจำแนกรูปคลื่น	43
3.4 การหาค่าเริ่มต้นเพื่อคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ย.....	45
3.5 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	47
3.5.1 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม.....	47
3.5.2 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ	49
3.6 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง	49
3.7 การวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้าง	50
4.ผลการทดสอบ โปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยวิธีตัวกรองกาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ กับรูปคลื่นอ้างอิง TDG	55
4.1 โปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	55
4.2 การทดสอบ โปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กับรูปคลื่นอ้างอิง TDG	58
5.วิเคราะห์ สรุปผลและข้อเสนอแนะ	75
5.1 วิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์	76
5.2 วิเคราะห์ผลคำตอบในแต่ละวิธีการ	78
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก	86
ก.รูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมคำนวณค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	87

บทที่

หน้า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 112



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงขอบเขตค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG	22
4.1 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1.....	60
4.2 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 2.....	61
4.3 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 3.....	62
4.4 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 4.....	63
4.5 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5.....	64
4.6 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6.....	65
4.7 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 7.....	66
4.8 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8.....	67
4.9 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 9.....	68
4.10 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 10.....	69
4.11 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11.....	70
4.12 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 12.....	71
4.13 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13.....	72
4.14 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14.....	73
4.15 แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	74
5.1 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ME และ RMSE ในแต่ละกรณีของรูปคลื่นอ้างอิง.....	79
5.2 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยผลคำตอบในแต่ละวิธีการ ตามกรณีของรูปคลื่นอ้างอิง	80
5.3 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดจากค่ากลางขอบเขตมาตรฐาน ในแต่ละกรณี.....	81

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงการใช้วิธีการ Polynomial Curve Fitting ดีกรี 9 กับรูปคลื่นอ้างอิง TDG9	3
1.2 แสดงการใช้วิธีการ Cubic Spline กับรูปคลื่น TDG9 (100 จุดบริเวณค่ายอด).....	3
1.3 วิธีการใช้อุนุกรมเกาส์เซียน (n=8) กับรูปคลื่น TDG9	4
1.4 Prony's Method กับรูปคลื่น TDG9	5
1.5 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ (9 ตัวแปร) กับรูปคลื่น TDG9	9
1.6 ผลคำตอบของวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ (9 ตัวแปร) กับรูปคลื่น TDG9	9
1.7 วิธีตัวกรองคาล์มาน กับรูปคลื่น TDG9	11
2.1 แสดงวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	14
2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ U(t) จากวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	15
2.3 แสดงพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มตามมาตรฐาน IEC 60060-1	17
2.4 แสดงพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หน้าคลื่น	18
2.5 แสดงพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หลังคลื่น	19
2.6 แสดงพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง	20
2.7 แสดงพารามิเตอร์ของการรบกวนรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	21
2.8 แสดงจุดเริ่มต้นจริงของรูปคลื่นจากโปรแกรม TDG ในกรณีที่ 1	23
2.9 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 1	24
2.10 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 2	24
2.11 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 3	25
2.12 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 4	25
2.13 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 5	26
2.14 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 6	26
2.15 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 7	27
2.16 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 8	27
2.17 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 9	28
2.18 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 10	28
2.19 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 11	29
2.20 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 12	29
2.21 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 13	30

รูปที่	หน้า
2.22 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 14	30
2.23 แสดงขั้นตอนในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยวิธีตัวกรองกาลมาน	37
2.24 แสดงขั้นตอนในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์	39
3.1 แสดงอัลกอริทึมของโปรแกรมวิเคราะห์พารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	42
3.2 แสดงช่วงเวลาระหว่างค่าแรงดัน 60% กรณีรูปคลื่นฟ้าผ่าสับ (รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 2)	43
3.3 แสดงช่วงเวลาระหว่างค่าแรงดัน 60% กรณีรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม (รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1)	44
3.4 แสดงช่วงเวลาระหว่างค่าแรงดัน 60% กรณีรูปคลื่นสวิตชิง (รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5)	44
3.5 แสดงการเลือกจุดของส่วนหลังคลื่นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มจำนวน n จุด	45
3.6 แสดงการเลือกจุดของส่วนหน้าคลื่นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มจำนวน n จุด	46
3.7 แสดงการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มส่วนหางคลื่น (รูปคลื่นกรณีที่ 8)	48
3.8 แสดงการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มส่วนหน้าคลื่น (รูปคลื่นกรณีที่ 8)	48
3.9 แสดงผลรวมของการประดิษฐ์ส่วนหลังคลื่นและหน้าคลื่น (รูปคลื่นกรณีที่ 8)	49
3.10 แสดงการสมมติค่ายอดเพื่อหาค่าเริ่มต้นของรูปคลื่นฟ้าผ่าสับ (รูปคลื่นกรณีที่ 8)	50
3.11 แสดงรูปคลื่นตกค้างจากผลต่างของรูปคลื่นจริงและรูปคลื่นเฉลี่ย (รูปคลื่นกรณีที่ 8)	51
3.12 แสดงค่ายอดของรูปคลื่นตกค้าง (รูปคลื่นกรณีที่ 8)	51
3.13 แสดงการประดิษฐ์ส่วนหลังคลื่นเพื่อวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้าง (รูปคลื่นกรณีที่ 8)	52
3.14 แสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อคำนวณความถี่ของการแกว่ง (รูปคลื่นกรณีที่ 8)	53
3.15 แสดงขนาดของความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (รูปคลื่นกรณีที่ 8)	53
3.16 แสดงการคำนวณเวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน (รูปคลื่นกรณีที่ 8)	54
4.1 การเริ่มต้นโปรแกรม โดยการเปิดไฟล์ “IMPULSE_EVALUATION_PARAMETER.fig” ...	55
4.2 หน้าต่างโปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	56
4.3 เลือกเปิดไฟล์ข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์	56
4.4 แสดงผลการอ่านไฟล์ข้อมูลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	57
4.5 แสดงผลการคำนวณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	58
5.1 แสดงกระบวนการในการคำนวณพารามิเตอร์รูปคลื่นกรณีที่ 11	75
5.2 แสดงกระบวนการคำนวณโดยอัลกอริทึมของวิธีตัวกรองกาลมาน	76
5.3 แสดงกระบวนการคำนวณโดยอัลกอริทึมของวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์	77
ก.1 ผลของวิธีตัวกรองกาลมานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1	87

บทที่ 1

บทนำ

การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องนำไปติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงสูงกลางแจ้ง จำเป็นต้องผ่านการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าแบบต่าง ๆ เพื่อให้อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน IEC 60060-1 [1], IEC 60060-2 [2] โดยได้กำหนดชนิดและขนาดแรงดันต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบตามระดับการฉนวนหรือระดับแรงดันทำงานสูงสุดของอุปกรณ์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์มีการกำหนดเป็น

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse Voltage)
2. แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (Switching Impulse Voltage)

ในปัจจุบัน ได้มีการนำออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัลมาใช้ในการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ทดสอบ เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์คุณลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ได้แก่ ค่ายอด (Peak Value), เวลาค้น (Front Time) , เวลาถึงกึ่งยอด (Time to Half) และเวลาถึงตอนลับ (Chopping Time) ให้มีความแม่นยำ, ถูกต้องและรวดเร็วกว่าการใช้ออสซิลโลสโคปแบบอนาล็อก

1.1 ที่มาของปัญหา

ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไม่มีภาวะรบกวน หรือเป็นรูปคลื่นเรียบ การนำออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัลมาใช้ในการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ มีความแม่นยำ ถูกต้องและรวดเร็วกว่าการใช้ออสซิลโลสโคปแบบอนาล็อก แต่หากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยภาวะรบกวน (Perturbation) ได้แก่ การแกว่ง (Oscillation), ส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) และสัญญาณรบกวน (Noise) เกิดขึ้นกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แล้ว การหาค่าพารามิเตอร์คุณลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ จะมีความยุ่งยากและซับซ้อนยิ่งขึ้น ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เมื่อเกิดภาวะรบกวนต่างๆ หลายวิธีการด้วยกันและได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน เพื่อความสะดวก รวดเร็ว และสามารถคำนวณค่าซ้ำได้อย่างถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับการวัดด้วยผู้ทดสอบเช่นในอดีต โดยมีหลักการคือใช้คอมพิวเตอร์ประดิษฐ์รูปคลื่นจำลองเพื่อใช้เป็นตัวแทนรูปคลื่นจริง ซึ่งรูปคลื่นจำลองที่ประดิษฐ์ขึ้นจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมการคณิตศาสตร์และวิธีการที่ใช้ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการในการประดิษฐ์รูปคลื่นจำลองระหว่าง วิธีตัวกรองกาลมาน ซึ่งเป็นกรรมวิธีแบบเชิงเส้น และวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ซึ่งเป็นกรรมวิธีแบบไม่เชิงเส้น เพื่อศึกษาถึงความถูกต้องแม่นยำในการประมาณรูปคลื่นจำลอง ที่เข้าใกล้รูปคลื่นจริงมากที่สุด ระหว่าง

2 วิธีการนี้ และได้เป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ต่อไป

1.2 มาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

การเปรียบเทียบผลการประดิษฐ์รูปคลื่นจำลองเพื่อใช้เป็นตัวแทนของรูปคลื่นจริง ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นั้น มาตรฐาน IEC 60060-1, IEC 60060-2 และ IEC 61083-2 [3] กำหนดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อ้างอิงที่สร้างจากโปรแกรม TDG (Test Data Generator) จำนวน 14 รูปคลื่น และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แต่ละรูปคลื่นไว้ โดยผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์จากวิธีการต่าง ๆ ควรอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

1.3 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต

การประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งได้มีการศึกษาวิจัยมานานแล้วจากอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยมีการกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 60060-1, IEC 60060-2 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง IEC 61083-2 เป็นมาตรฐานอ้างอิงสำหรับผู้ศึกษาวิจัยในเรื่องการประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งให้มีความเข้าใจถูกต้องเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน

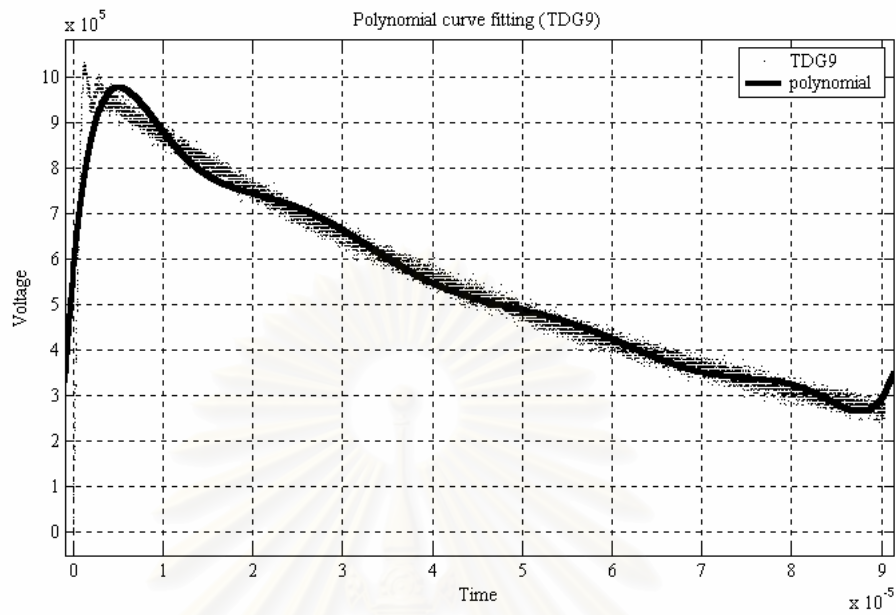
เมื่อมีการกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-1 และมาตรฐาน IEC 61083-2 ขึ้นแล้ว ได้มีกลุ่มนักวิจัยได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ เพื่อค้นหาเทคโนโลยีวิธีการและสมการแบบจำลองใหม่ ๆ ในการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ให้มีความถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยสามารถจำแนกวิธีการและสมการแบบจำลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1.3.1 วิธีการ Polynomial Curve Fitting [4]

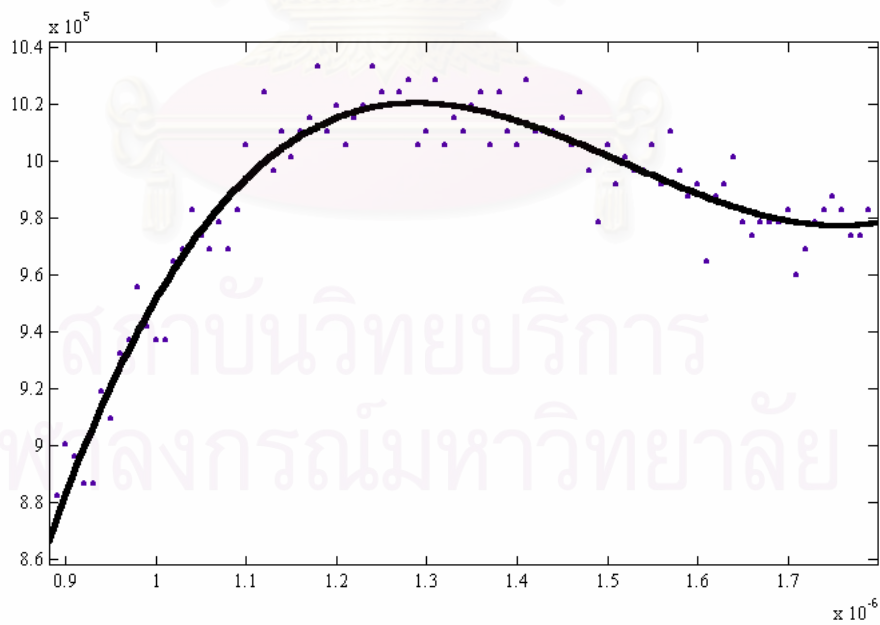
วิธีการ Polynomial Curve Fitting เป็นการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมในสมการพหุนาม โดยใช้สมการ

$$p(x) = p_1x^n + p_2x^{(n-1)} + \dots + p_nx + p_{(n+1)} \quad (1.1)$$

วิธีการนี้ สามารถใช้ประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง และรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ไม่มีการแกว่งเท่านั้น และไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ส่วนพุ่งเกินของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ โดย รูปที่ 1.1 แสดงการใช้วิธีการ Polynomial Curve Fitting กับรูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 9 โดยใช้สมการพหุนามกำลัง 9 แสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีการแกว่ง



รูปที่ 1.1 แสดงการใช้วิธีการ Polynomial Curve Fitting อันดับ 9 กับรูปคลื่นอ้างอิง TDG9



รูปที่ 1.2 แสดงการใช้วิธีการ Cubic Spline กับรูปคลื่น TDG9 (100 จุดบริเวณค่ายอด)

1.3.2 วิธีการ Cubic Spline Interpolation [5]

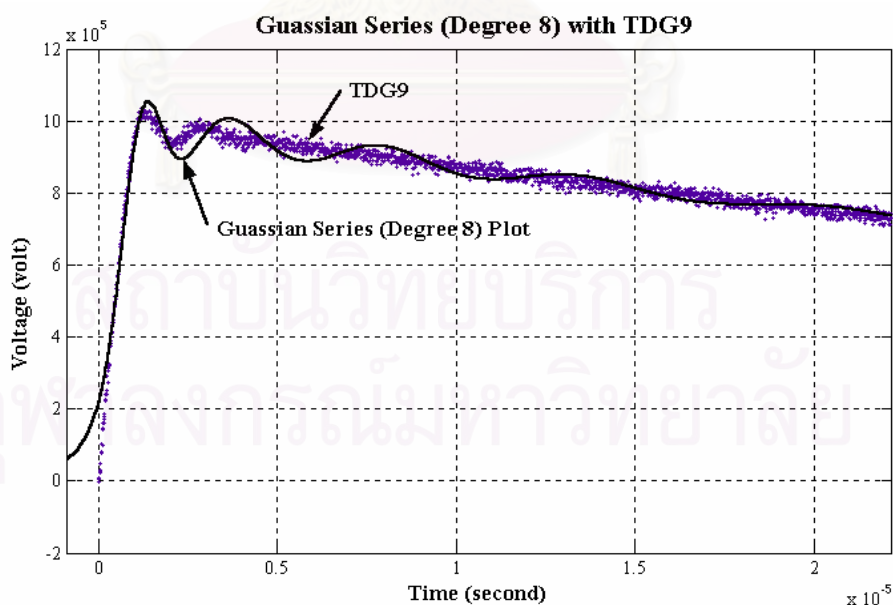
วิธีการ Cubic Spline Interpolation เป็นวิธีการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยใช้สมการ (1.1) หากแต่วิธีการนี้ใช้การแบ่งรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ออกเป็นช่วง ๆ แล้วใช้การหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม ในแต่ละช่วงนั้น

ในรูปที่ 1.2 เป็นการแบ่งรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อิมพัลส์ ออกเป็น 100 ส่วน (จากจุดข้อมูลทั้งสิ้น 10,000 จุด) แสดงจุดบริเวณค่ายอดจำนวน 100 จุด โดยใช้การประมาณด้วยสมการพหุนามกำลัง 3 (cubic) แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถใช้ประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ทุกรูปแบบ แต่ค่ายอดในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 1.015 MV ผิดพลาดไปจากค่าที่มาตรฐานกำหนด (0.96-0.99 MV) และจากการประดิษฐ์รูปคลื่นใช้สมการพหุนาม จึงไม่สามารถวิเคราะห์การแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินได้

1.3.3 วิธีการ Radial Basis Neural Network Function Approximation [4]

วิธีการ Radial Basis Neural Network Function Approximation เป็นวิธีการที่ใช้อนุกรมเกาส์เซียน (Series of Gaussian) เป็นฐานหลัก (Basis) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$M(t) = A_1 e^{-\left(\frac{t-a_1}{b_1}\right)^2} + A_2 e^{-\left(\frac{t-a_2}{b_2}\right)^2} + \dots + A_n e^{-\left(\frac{t-a_n}{b_n}\right)^2} \quad (1.2)$$



รูปที่ 1.3 วิธีการใช้อนุกรมเกาส์เซียน (n=8) กับรูปคลื่น_TDG9

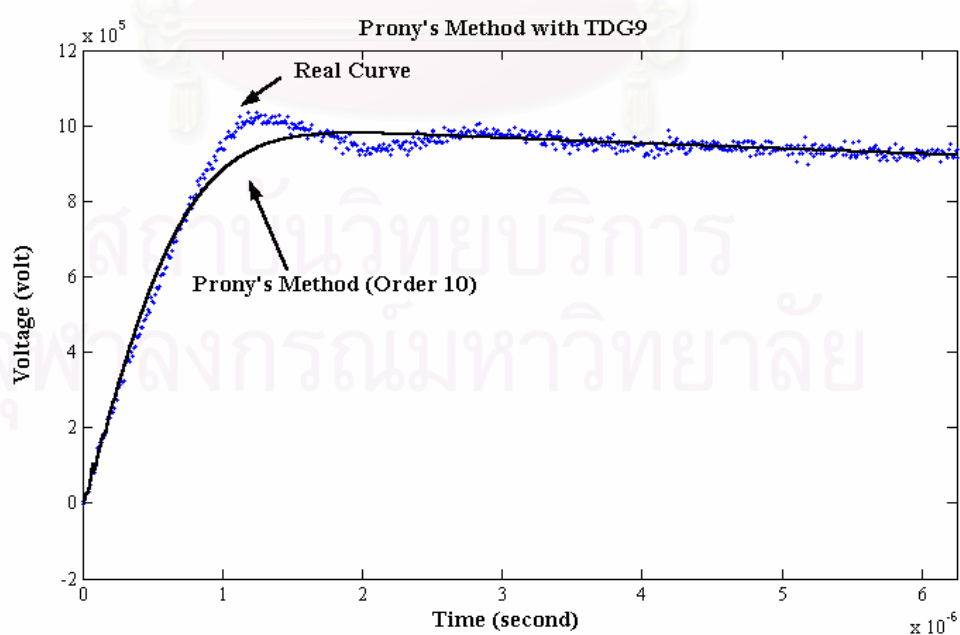
ในการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของอนุกรมเกาส์เซียน วิธีการนี้สามารถใช้ประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ ดังรูปที่ 1.3 เป็นการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยอนุกรมเกาส์เซียน กำลัง 8 รูปคลื่นอ้างอิง กรณีที่ 9 (TDG9) แต่ได้ค่ายอดในกรณีนี้ 1.015 MV ผิดพลาดไปจากค่าที่มาตรฐานกำหนด (0.96-0.99 MV) และไม่สามารถวิเคราะห์การแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินจากรูปคลื่นประดิษฐ์ได้

1.3.4 วิธีการของ Prony [4]

วิธีการ Prony เป็นกระบวนการออกแบบตัวกรอง IIR (Infinite Impulse Response) ใช้การแปลงแซด (Z-Transform) จากสัญญาณเข้า เช่น สัญญาณแรงดันอิมพัลส์ $V(t)$ แล้วหาสัมประสิทธิ์ของเศษส่วนในสมการ

$$V(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{a(1) + a(2)z^{-1} + \dots + a(m+1)z^{-m}} \quad (1.3)$$

โดย $V(z)$ คือสัญญาณเข้าที่ทำการแปลงเข้าสู่ระนาบแซด (Z-Plane) เมื่อแปลงสัญญาณกลับมายังโดเมนเวลา (Time-Domain) $V(t)$ จะกลายเป็นสัญญาณที่ผ่านการกรองแล้ว



รูปที่ 1.4 Prony's Method กับรูปคลื่นTDG9

W. C. Boaventura [6] นำวิธีการของ Prony มาใช้ในการหาค่ายอดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อ้างอิง (TDG) กรณีที่ 14 ได้ผลถูกต้องตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยใช้สมการ

$$V_n = \sum_{m=1}^N A_m e^{s_m n t}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, 2N \quad (1.4)$$

โดยที่ A_m, s_m = ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ เป็นจำนวนเชิงซ้อน

วิธีการนี้จะทำการประดิษฐ์หาค่าคลื่นของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ จากรูปคลื่นจริงออกมาก่อน แล้วจึงนำส่วนหน้าคลื่นมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Prony เพิ่มลำดับ n ไปเรื่อย ๆ ถ้าค่ายอดของรูปคลื่น $(V(n+1) - V(n))$ ลดลงแสดงว่าอนุกรมนี้ลู่เข้า และจะหยุดการคำนวณเมื่อ $(V(n+1) - V(n))$ มีค่าน้อยกว่าที่กำหนด (ประมาณ 1% ของค่ายอด)

รูปที่ 1.4 ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ทำการทดสอบวิธีการ Prony กับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อ้างอิงกรณีที่ 9 พบว่า ได้ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ 0.98 MV เวลาหน้าคลื่น 1.25 μ s เวลาถึงกึ่งค่ายอด 49 μ s ซึ่งเวลาหน้าคลื่นในกรณีนี้ไม่ตรงการเกณฑ์มาตรฐาน (1.0-1.1 μ s)

1.3.5 วิธีการ Genetic Algorithm

วิธีการใช้ Genetic Algorithm ในการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ จะใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม โดยใช้สมการ

$$u(t) = (A_1 e^{-\alpha_1 t} - A_2 e^{-\alpha_2 t}) + A_3 (1 - e^{-\alpha_3 t}) \cos(\omega t + \phi) \lambda(t_d) \quad (1.5)$$

วิธีการนี้ใช้กรรมวิธีแบบสุ่ม (Random) ในการเลือกค่าตัวแปรจากขอบเขตตัวแปรที่เป็นไปได้ จากข้อมูลดิบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่เข้ามา (การเลือกตัวแปรสามารถเลือกโดยผู้ทดลองได้) เมื่อเปลี่ยนตัวแปรแล้วจะทำการเปรียบเทียบกับรูปคลื่นเดิม (ค่าเริ่มต้น) ใช้เกณฑ์ค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Error) เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบ จากสมการ

$$\text{Fitness} = \frac{F}{\sum \sqrt{[f(t) - O(t)]^2}} \quad (1.6)$$

เมื่อ $f(t)$ คือ ข้อมูลดิบ
 $O(t)$ คือ รูปคลื่นจำลอง
 F คือ ตัวประกอบการคูณ

ดังนั้น วิธีการนี้ จะมีข้อดี คือ ไม่ต้องหาอนุพันธ์ของตัวแปรในแต่ละตัวแปร และการเลือกโดยบุคคลจะมีความยืดหยุ่นมากกว่า การเลือกแบบอัตโนมัติ ข้อด้อยของวิธีการนี้คือ ผู้ทดลองจำเป็นต้องมีความรู้ ความชำนาญในการเลือกตัวแปรเพื่อจำลองรูปคลื่น

K.C.P.Wong [7] นำวิธีการนี้มาใช้ประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยใช้สมการ

$$u(t) = (A_1 e^{-\alpha_1 t} - A_2 e^{-\alpha_2 t}) \quad (1.7)$$

ทดสอบกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่มีการแกว่งและไม่มีแกว่ง ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากรูปคลื่นเฉลี่ยบริเวณยอดคลื่นลากผ่านการแกว่งอย่างชัดเจน

1.3.6 วิธีการใช้ K – Factor

วิธีการใช้ K – Factor เกิดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อทดสอบเบรกคาวน์ของฉนวนแข็ง โดยใช้การเปลี่ยนความถี่ของการแกว่งที่อยู่บนรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า พบว่าเมื่อความถี่การแกว่งมีค่าความถี่สูง ฉนวนจะเบรกคาวน์ที่แรงดันใกล้เคียงกับแรงดันเฉลี่ย (เมื่อนำส่วนของการแกว่งออกไปแล้ว) และเมื่อความถี่ของการแกว่งมีค่าความถี่ต่ำ ฉนวนจะเบรกคาวน์ที่แรงดันใกล้เคียงกับแรงดันของรูปคลื่นจริงที่วัดได้ จึงได้มีการนำเสนอ ค่า K – Factor ขึ้นมาใหม่ โดยค่า K จะขึ้นอยู่กับความถี่การแกว่งที่อยู่บนรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า

โดยค่า K หาได้จากสมการ

$$K = \frac{\log f_2 - \log f}{\log f_2 - \log f_1} \quad (1.8)$$

โดยที่ $f_1 = 300 \text{ kHz}$,

$f_2 = 1600 \text{ kHz}$

$f = \text{ความถี่การแกว่งจริง}$

จากนั้นนำค่า K ที่ได้มาคำนวณค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ตามสมการ

$$U_{\text{test}} = K \cdot U_{\text{peak}} + (1 - K) \cdot U_{\text{peak (meancurve)}} \quad (1.9)$$

K. Hackemack [8] [9] เสนอแนะวิธีการนี้ขึ้นมาโดยขัดแย้งกับมาตรฐาน เพื่อเป็นข้อมูลในการปรับแก้ไขมาตรฐานในอนาคต และได้มีการทดสอบค่ายอดของวิธีการนี้กับโปรแกรมมาตรฐาน TDG ในรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าในกรณี 8, 9, 11, 13, 14 ปรากฏว่ารูปคลื่นในกรณี 8 และ 11 ได้ค่ายอดตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนรูปคลื่นในกรณี 9, 13 และ 14 ได้ค่ายอดไม่ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน

1.3.7 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ (Levenberg-Marquadt Method) [10]

วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ เป็นวิธีการหาค่าฟังก์ชันที่ต้องการโดยกรรมวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้น มีการพัฒนามาจากวิธีการของเกาส์-นิวตัน (Guass-Newton Method) เพื่อหาค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดจากสมการไม่เป็นเชิงเส้นทั่วไปคือ

$$y(x) = f(x, \beta) + \varepsilon \quad (1.10)$$

เมื่อ	y	คือ ตัวแปรตาม มีมิติเป็น $(n \times 1)$
	f	คือ ฟังก์ชันของ x และ β
	x	คือ ตัวแปรต้น มีมิติเป็น $(n \times m)$
	β	คือ สัมประสิทธิ์ตัวแปร มีมิติเป็น $(m \times 1)$
	ε	คือ ฟังก์ชันค่าผิดพลาด มีมิติเป็น $(n \times 1)$

ค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดของสมการ (1.10) มีค่าเท่ากับ

$$\text{minimize}[S] = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \beta_i))^2 \quad (1.11)$$

Arne P. Brede [11] ได้นำวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ มาประยุกต์กับรูปคลื่นแรงดันอินิมพัลส์ฟ้าผ่า ใช้ฟังก์ชันของตัวแปรต้น เป็นสมการแบบจำลองรูปคลื่นแรงดันอินิมพัลส์เปรียบเทียบกับทั้งหมด 4 สมการได้แก่

$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1.12)$$

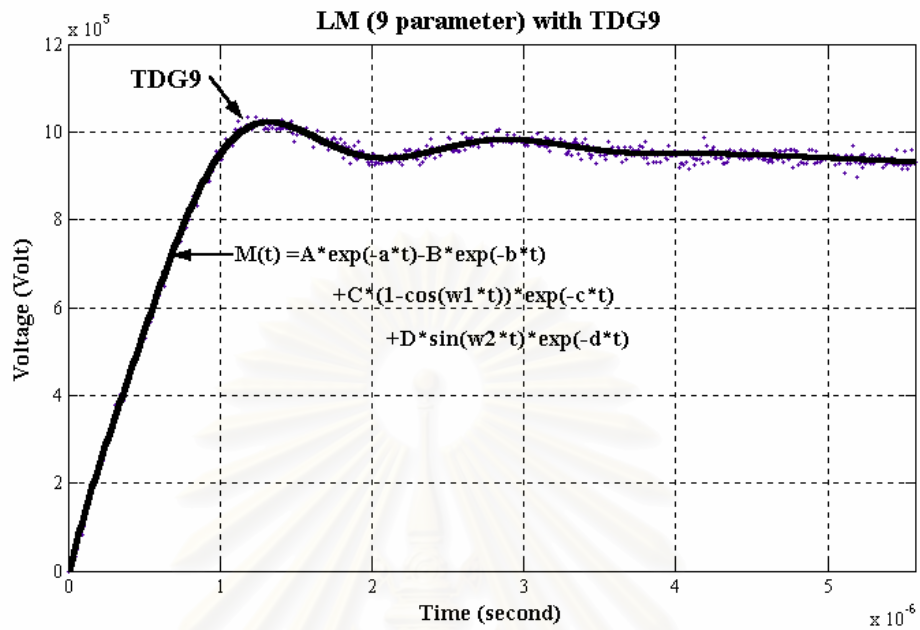
$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + B(1 - \cos(\omega t))e^{-\gamma t} \quad (1.13)$$

$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + C \sin(\phi t)e^{-\delta t} \quad (1.14)$$

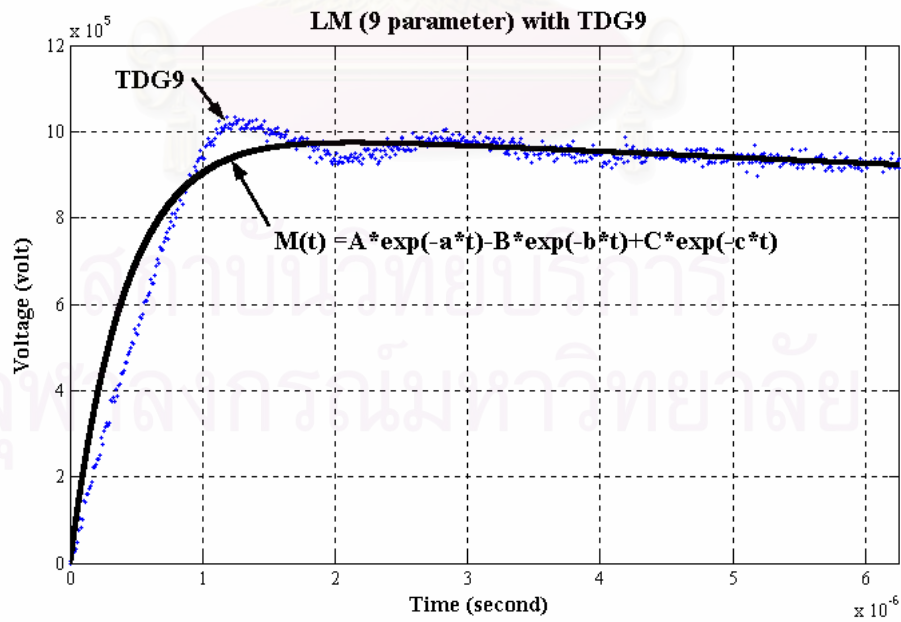
$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + B(1 - \cos(\omega t))e^{-\gamma t} + C \sin(\phi t)e^{-\delta t} \quad (1.15)$$

เมื่อนำสมการแบบจำลองมาทดสอบกับรูปคลื่นแรงดันอินิมพัลส์อ้างอิงจากโปรแกรม TDG ในกรณีที่ 13 และ 14 พบว่าสมการ (1.15) มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด โดยเปรียบเทียบจากค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้าง และสมการ (1.14), (1.13) และ (1.12) มีค่าผิดพลาดมากขึ้นตามลำดับ

รูปที่ 1.5 ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ทำการทดสอบวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ โดยใช้สมการ (1.15) กับรูปคลื่นแรงดันอินิมพัลส์อ้างอิงกรณีที่ 9 ได้รูปคลื่นที่มีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้างต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ ที่ผ่านมา และได้ความถี่การแกว่ง 2 ความถี่ ซึ่งการแกว่งที่มีขนาดใหญ่ที่สุด มีความถี่ 575 kHz (มากกว่า 500 kHz ตามเกณฑ์กำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-1)



รูปที่ 1.5 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ (9 ตัวแปร) กับรูปคลื่น TDG9



รูปที่ 1.6 ผลคำตอบของวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ (9 ตัวแปร) กับรูปคลื่น TDG9

ดังนั้นจะใช้รูปคลื่นเฉลี่ย (ที่นำการแกว่งออกไปแล้ว) ในการหาค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ได้ผลดังรูปที่ 1.6 และค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ได้แก่ ค่ายอด ($V_{\text{peak}} = 0.97 \text{ MV}$, เวลาหน้าคลื่น ($T_1 = 1.22 \mu\text{s}$) และเวลาถึงกึ่งค่ายอด ($T_2 = 50 \mu\text{s}$) ซึ่งพบว่าเวลาหน้าคลื่นไม่ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน ($1.0\text{-}1.1 \mu\text{s}$)

1.3.8 วิธีตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter Method)

วิธีตัวกรองคาลมานเป็นวิธีการกรองแบบดิจิทัล เพื่อประมาณค่าตัวแปรสถานะ (State Vector) จากสมการสถานะ ทั้งในกรณีต่อเนื่องทางเวลา (Continuous Time) และไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete Time) และเป็นกรรมวิธีแบบเชิงเส้นจากสมการสถานะที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(n+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(n) + \mathbf{B}u(n) \\ y(n) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(n) + \mathbf{D}u(n) \end{aligned} \quad (1.16)$$

เมื่อ $y(n)$ คือ ข้อมูลที่วัดค่าได้
 $\mathbf{x}(n+1), \mathbf{x}(n)$ คือ ตัวแปรสถานะ
 $u(n)$ คือ เวกเตอร์อินพุท ที่เวลา n
 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ คือ ค่าคงที่ของสมการสถานะ

เมื่อผ่านกระบวนการของวิธีตัวกรองคาลมานแล้ว ค่าการประมาณของตัวแปรที่ต้องการ จะอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น คือ

$$\hat{y}(n) = \mathbf{G}_1 \hat{\mathbf{x}}(n) + \mathbf{G}_2 y(n) \quad (1.17)$$

เมื่อ $\hat{y}(n)$ คือ การประมาณค่าข้อมูลเข้าที่ดีที่สุด ที่เวลา n
 $\hat{\mathbf{x}}(n)$ คือ การประมาณค่าตัวแปรสถานะที่ดีที่สุด ที่เวลา n
 $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$ คือ ค่าคงที่ของสมการ

J. Perez, J. Matinez [12] [13] นำวิธีตัวกรองคาลมานมาประยุกต์ใช้กับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยใช้สมการแบบจำลองของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เป็น

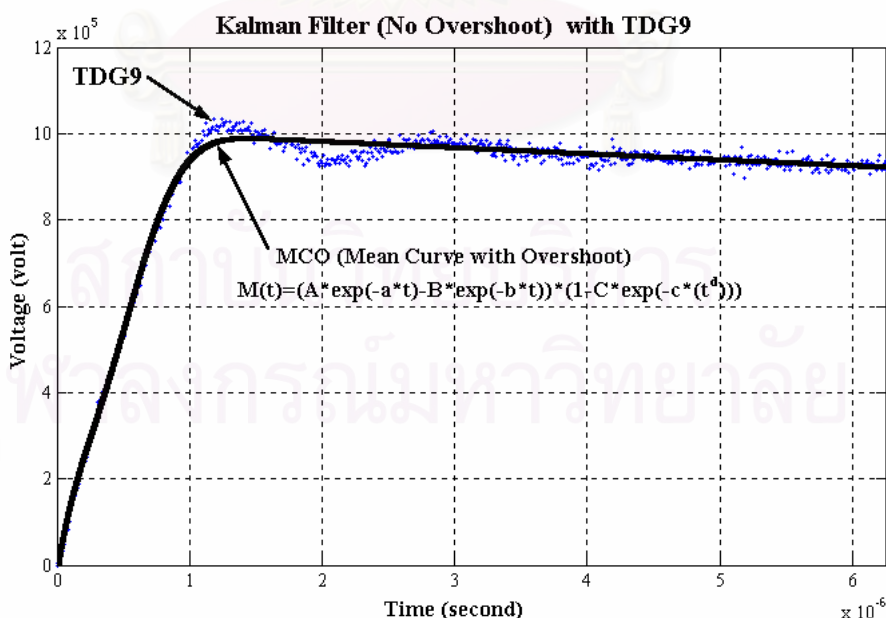
$$M(t) = A_0 (e^{-a(t+t_0)} - B e^{-b(t+t_0)}) (1 - B_1 e^{-c(t+t_0)})^d \quad (1.18)$$

วิธีการนี้จะเริ่มประดิษฐ์หากลืนแรงดันอิมพัลส์ โดยสมการเอกซ์โปเนนเชียล

$$M(t) = A_0(e^{-a(t+t_0)}) \quad (1.19)$$

นำค่าที่ได้จากสมการ (1.19) มาทำการประดิษฐ์หน้าคลื่นด้วยสมการ (1.18) และได้มีการเสนอแนะการวิเคราะห์ส่วนพุ่งเกินของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยทำการประดิษฐ์รูปคลื่นจำนวน 2 รูปคลื่นโดยประดิษฐ์รูปคลื่นแรก เรียกว่า MCO (Mean Curve With Overshoot) โดยประมาณ ค่า B ในสมการ (1.18) เป็นค่าลบ และรูปคลื่นสอง เรียกว่า MCWO (Mean Curve Without Overshoot) โดยประมาณ ค่า B ในสมการ (1.18) เป็นค่าบวก โดยใช้เกณฑ์มาตรฐานในการเลือกค่าพารามิเตอร์จากรูปคลื่น MCO หรือ รูปคลื่น MCWO วิธีการนี้ มีการทดสอบกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอ้างอิงจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG ทุกรูปคลื่น พบว่าได้ค่าตรงตามเกณฑ์มาตรฐานเป็นส่วนมาก ยกเว้นรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14 ซึ่งได้ค่ายอด และเวลาหน้าคลื่น ไม่ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน

รูปที่ 1.7 ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ทำการทดสอบวิธีตัวกรองกาลมานกับรูปคลื่นอ้างอิง กรณีที่ 9 โดยใช้สมการที่ (1.18) พบว่าได้ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทั้งหมดตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน ได้แก่ ค่ายอด (V_{peak}) = 0.987 MV, เวลาหน้าคลื่น (T_1) = 1.05 μ s และ เวลาถึงกึ่งค่ายอด (T_2) = 49 μ s



รูปที่ 1.7 วิธีการตัวกรองกาลมาน กับรูปคลื่นTDG9

1.4 การศึกษาวิจัยครั้งนี้

วิธีการทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ในการประดิษฐ์รูปคลื่นจำลองพบว่ามีความแตกต่างกันในวิธีการ สมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ และสิ่งที่สำคัญมากในการวิเคราะห์หาค่าความถี่การแกว่งหรือเวลาเกิดส่วนพุ่งเกิน คือสมการพื้นฐานของแบบจำลองควรเป็นสมการเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเปรียบเทียบ งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่า วิธีการที่มีพื้นฐานมาจากสมการเอกซ์โพเนนเชียล และมีค่าราคากำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้างต่ำที่สุด คือ กรรมวิธีไม่เป็นเชิงเส้น “วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์” โดยใช้สมการที่ (1.15) และวิธีการที่มีการเปรียบเทียบผลกับโปรแกรมมาตรฐาน TDG มากที่สุด และถูกต้องมากที่สุดได้แก่ กรรมวิธีเชิงเส้น “วิธีตัวกรองกาลมาน” งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการทั้งสองวิธีการ โดยใช้ รูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ

1.5 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และรูปคลื่นแรงดัน อิมพัลส์สวิตชิ่งด้วยสมการคณิตศาสตร์แบบต่าง ๆ ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 และมาตรฐาน IEC 61083-2
- 2) ศึกษาเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของสมการคณิตศาสตร์และเทคโนโลยีวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ ที่มีการใช้กับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง ที่ผ่านมาในอดีตจนถึงปัจจุบัน
- 3) พัฒนาโปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ของคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง โดยใช้เทคนิควิธีตัวกรองกาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

1.6 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาวิธีการและสมการคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านมาในอดีต
- 2) ศึกษาเปรียบเทียบวิธีตัวกรองกาลมาน กับวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า
- 3) ทดสอบโปรแกรมที่ได้กับ โปรแกรม TDG ในรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทั้ง 14 รูปคลื่นตามมาตรฐาน IEC 61083-2

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

โปรแกรมสำหรับการคำนวณพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า และแรงดันอิมพัลส์
สวิตชิ่ง เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-1 และ IEC 61083-2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

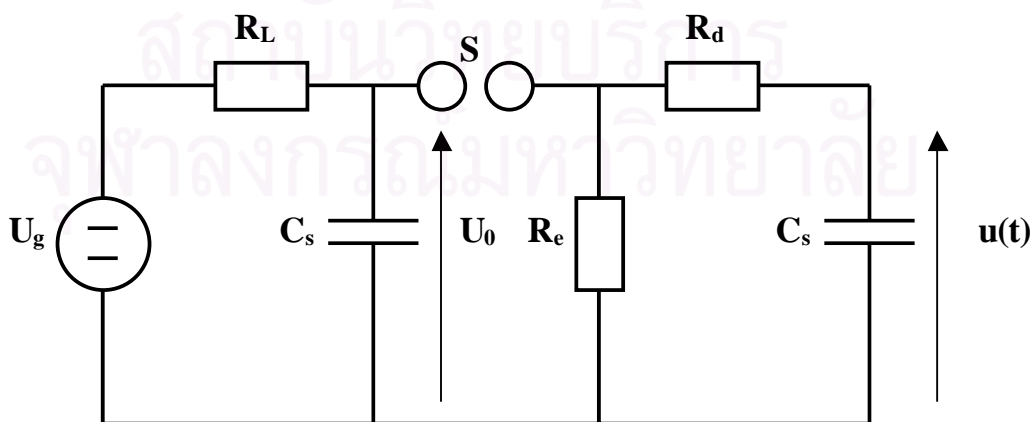
รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน

มาตรฐาน IEC 60060-1 กำหนดรูปลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่สร้างขึ้นจากห้องทดลอง ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- ขนาดแรงดัน หมายถึงค่ายอด (Peak Value) ของรูปคลื่นแรงดัน
- เวลาหน้าคลื่น (Front Time: T_1 , สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า) หรือเวลาถึงค่ายอด (Time to Peak: T_p , สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง) หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มจากศูนย์จนถึงค่ายอด
- เวลาถึงกึ่งค่ายอด (Time to Half-value: T_2) หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนแรงดันลดลงเหลือกึ่งหนึ่งของค่ายอด
- เวลาถึงตอนสับ (Time to Chopping: T_c , สำหรับรูปคลื่นฟ้าผ่าสับ) หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มจากศูนย์จนถึงจุดที่แรงดันลดลงอย่างทันทีทันใด
- ขั้วของแรงดัน

2.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ [14]

แรงดันอิมพัลส์สร้างจากวงจร RC โดยอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ แล้วคายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลา (Time Constant) ให้ได้รูปคลื่นตามต้องการ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

ความหมายของอุปกรณ์ในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

U_g = แรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่าย

U_0 = แรงดันอค์ประจุกระแสตรง

C_s = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

C_b = โหลดตัวเก็บประจุ

R_L = ความต้านทานจำกัดกระแสอค์ประจุ

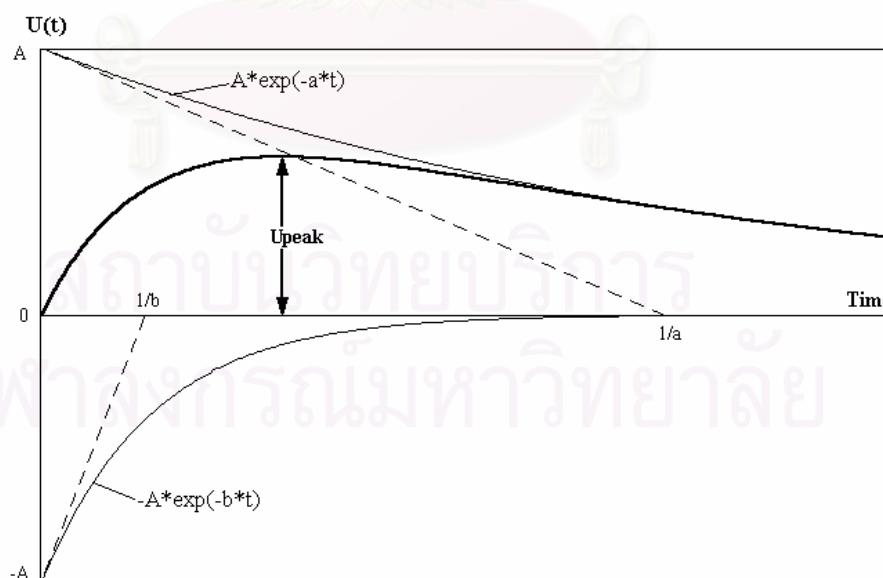
R_d = ความต้านทานหน่วง

R_e = ความต้านทานปล่อยประจุ

$U(t)$ = แรงดันอิมพัลส์ที่แปรตามเวลา

S = สปาร์กแกป

การทำงานของวงจรจะเริ่มจากแรงดันอค์ประจุ U_0 ป้อนแรงดันอค์ประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ผ่านความต้านทาน R_L จนได้แรงดันที่ต้องการ U_0 โดยค่าแรงดัน U_0 นี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของสปาร์กแกป S ที่ปรับค่าได้ เมื่อเกิดการสปาร์กของแกปจะทำให้ตัวเก็บประจุ C_s ถ่ายเทประจุผ่านตัวต้านทาน R_d ไปยังโหลด C_b จนเต็มที่แล้ว C_b จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R_e จนหมดประจุ โดยค่า R_d และ R_e จะมีผลต่อเวลาหน้าคลื่นและเวลาหลังคลื่นตามลำดับ



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ $U(t)$ จากวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ รูปคลื่นแรงดันจากวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ จะได้แรงดันอิมพัลส์ $U(t)$ ที่ได้ เป็นฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล ดังนี้

$$U(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2.1)$$

เมื่อ A, a และ b เป็นค่าคงที่

2.2 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

การหาพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 , IEC 60060-2 และ IEC 61083-2 แบ่งเป็นสามกรณี ได้แก่

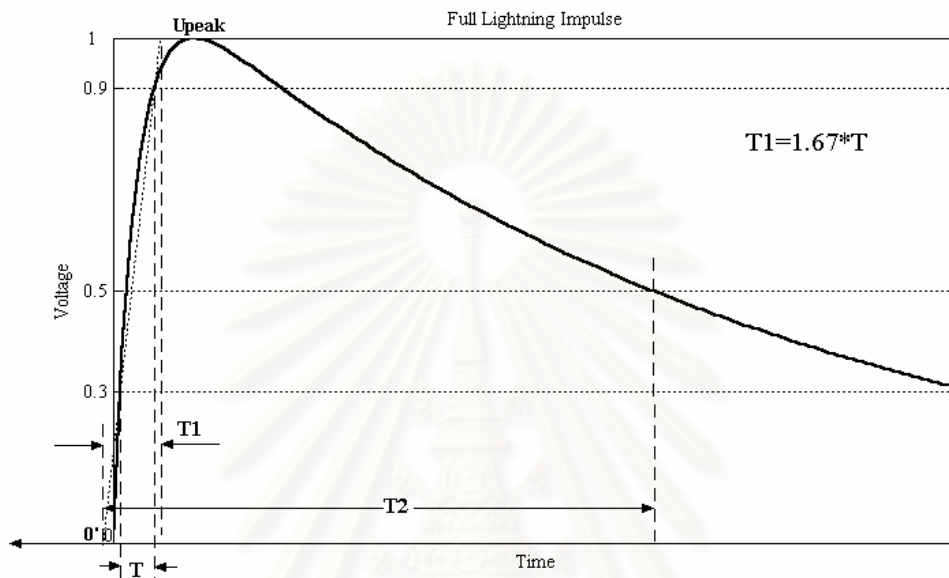
ก) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ไม่มีภาวะรบกวน คือ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม และรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าดับ

ข) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีภาวะรบกวน คือรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีภาวะรบกวนปรากฏอยู่ ได้แก่ การแกว่ง, ส่วนพุ่งเกินหรือสัญญาณรบกวน จะต้องทำการวิเคราะห์ตามหลักเกณฑ์มาตรฐาน มาตรฐาน IEC 60060-1 , IEC 60060-2 และ IEC 61083-2 ต่อไป

ค) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ ซึ่ง ไม่มีการกำหนดการรบกวน ถือเป็นรูปคลื่นเรียบ

2.2.1 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ไม่มีภาวะรบกวน แบ่งออกเป็น

2.2.1.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม ตามมาตรฐาน IEC 60060-1



รูปที่ 2.3 แสดงพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มตามมาตรฐาน IEC 60060-1

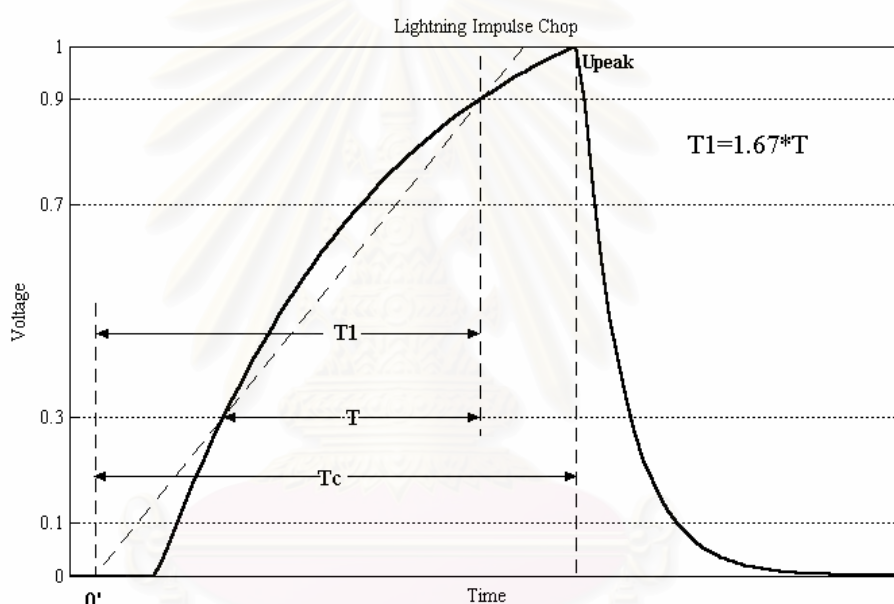
แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม แสดงได้ในรูปที่ 2.3 และค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าคำนวณได้ดังนี้

- ก) ค่ายอด (Peak Value) คือ ค่ายอดจริงของรูปคลื่นแรงดัน
- ข) เวลาหน้าคลื่น (Front Time) = $1.67 * T$ โดยที่ T เป็นผลต่างของเวลาที่ขนาดแรงดันมีค่าเท่ากับ 30% ของค่ายอด กับเวลาที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 90% ของค่ายอด ทั้งนี้ สมมติว่าจุดเริ่มต้นเป็นจุดที่แรงดันมีค่าเป็นศูนย์ โดยคำนวณจากเส้นตรงที่ลากผ่านจุดสองจุดนี้ มาตัดกับแกนเวลา จะได้จุดเริ่มต้นเสมือน (Virtual Origin, 0')
- ค) เวลาถึงกึ่งค่ายอด (Time to Half Value) คือ เวลาจากจุดเริ่มต้นเสมือน ผ่านค่ายอด ถึงจุดที่แรงดันมีขนาดเป็น 50% ของค่ายอด

2.2.1.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับตามมาตรฐาน IEC 60060-1

รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ เกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบ และการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปไม่ได้ จึงเกิดการสปาร์กผ่าน เกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรคดาวน์เฉาะทะลุ ทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ มี 2 แบบ คือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หน้าคลื่น และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หลังคลื่น

(ก) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หน้าคลื่น

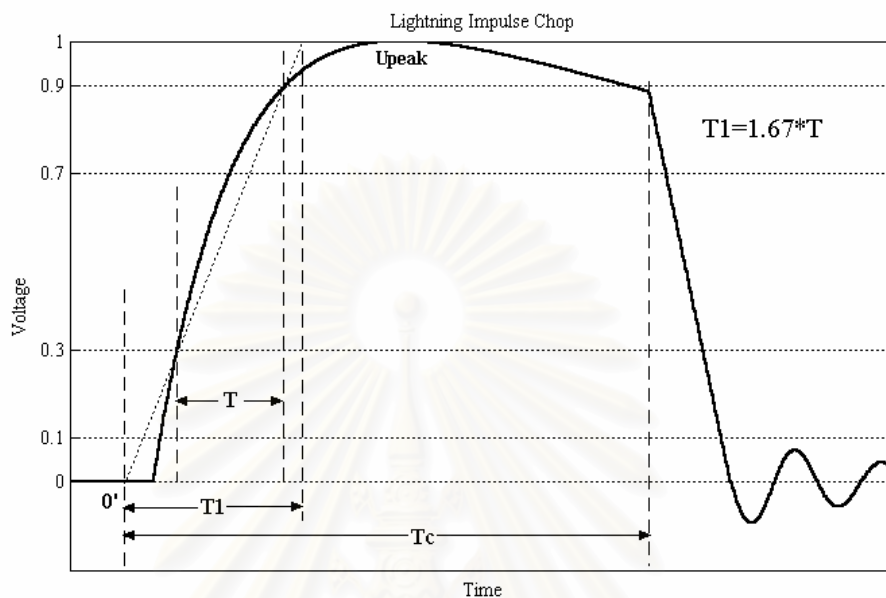


รูปที่ 2.4 แสดงพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หน้าคลื่น

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หน้าคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หน้าคลื่น คำนวณได้ดังนี้

- ค่ายอด (Peak Value) คือ ค่ายอดของรูปคลื่นสับ
- เวลาหน้าคลื่น (Front Time) คำนวณเช่นเดียวกับคลื่นเต็ม
- เวลาถึงตอนสับ (Time to Chopping) คือ ช่วงเวลาจากจุดเริ่มต้นเสมือน ถึงเวลาที่เริ่มเกิดเบรคดาวน์ (แรงดันตกลงมาทันทีทันใด)

(ข) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หลังคลื่น

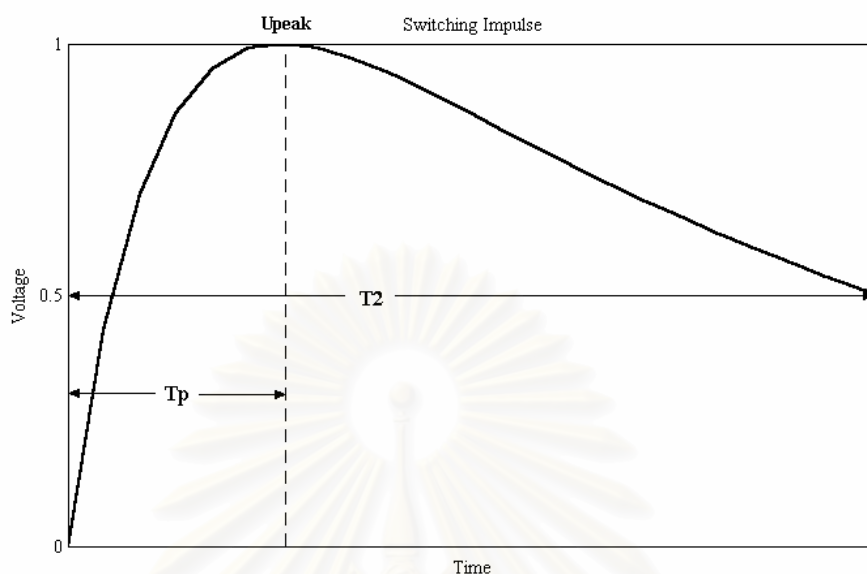


รูปที่ 2.5 แสดงพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หลังคลื่น

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หลังคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 พารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หลังคลื่น คำนวณได้ดังนี้

- ก) ค่ายอด (Peak Value) คือ ค่ายอดของรูปคลื่นสับ
- ข) เวลาหน้าคลื่น (Front Time) คำนวณเช่นเดียวกับคลื่นเต็ม
- ค) เวลาถึงตอนสับ (Time to Chopping) คือ ช่วงเวลาจากจุดเริ่มต้นเสมือน ถึงเวลาที่เริ่มเกิดเบรกคาวน์ (แรงดันตกลงมาทันทีทันใด)

2.2.1.3 แรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งเต็มตามมาตรฐาน IEC 60060-1



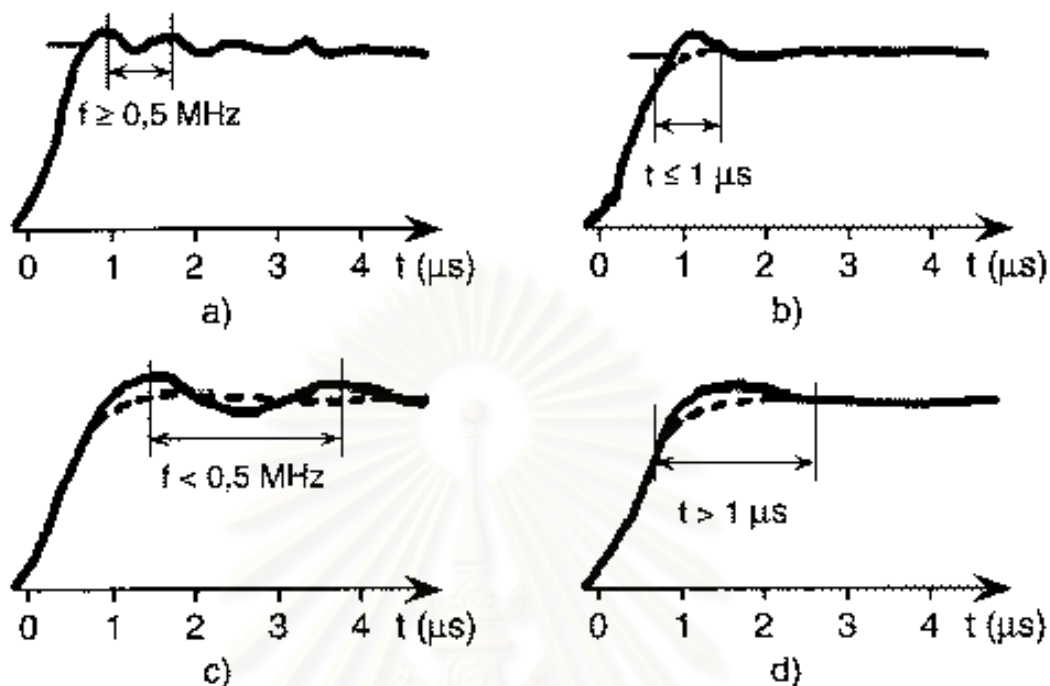
รูปที่ 2.6 แสดงพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งเต็ม

แรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งเต็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง คำนวณได้ดังนี้

- ก) ค่ายอด (Peak Value) คือ ค่ายอดจริงของรูปคลื่นแรงดัน
- ข) เวลาถึงค่ายอด (Time to Peak) คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเวลาเริ่มต้นจริง กับจุดเวลาค่ายอด
- ค) เวลาถึงกึ่งค่ายอด (Time to Half Value) คือ ช่วงเวลาจากจุดเริ่มต้นจริง ผ่านค่ายอด จนถึงจุดที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 50% ของค่ายอด

2.2.2 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเมื่อมีภาวะรบกวนตามมาตรฐาน IEC 61083-2 โดยโปรแกรมสำเร็จรูป TDG ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.3 มีการกำหนดเกณฑ์การรบกวนไว้ดังนี้

- ก) สัญญาณรบกวน (Noise) น้อยกว่า 1% ของค่ายอดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
- ข) ความถี่หลักของการแกว่งบนรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า มากกว่า 500 kHz
- ค) ผลรวมของการแกว่งและส่วนฟูงเกินน้อยกว่า 5% ของค่ายอดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
- ง) เวลาที่เกิดส่วนฟูงเกิน น้อยกว่า 1 μ s



รูปที่ 2.7 แสดงพารามิเตอร์ของการรบกวนรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า

หากรูปคลื่นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ให้คำนวณค่าพารามิเตอร์จากรูปคลื่นเฉลี่ย (กรณี (a) , (b))

หากรูปคลื่นไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ให้คำนวณค่าพารามิเตอร์จากรูปคลื่นจริง (กรณี (c) , (d))

2.2.3 โปรแกรมมาตรฐาน TDG (Test Data Generator)

โปรแกรมมาตรฐาน TDG เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีมาพร้อมกับมาตรฐาน IEC 61083-2 ทำหน้าที่สร้างรูปคลื่นอิมพัลส์อ้างอิง เพื่อไปทดสอบอัลกอริทึมที่ใช้วิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในห้องทดลองต่างๆ โดยลักษณะของโปรแกรม TDG ทำงานบนระบบปฏิบัติการดอส (DOS) มีรูปคลื่นอ้างอิงทั้งหมดทั้งหมด 15 กรณี ประกอบด้วย รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าเต็ม, รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าสับ, รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งเต็ม และรูปคลื่นอิมพัลส์ กระแส สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ จะพิจารณาเฉพาะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 14 กรณี ซึ่งมีขอบเขตของ ค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม TDG ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงขอบเขตค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG

รูปคลื่น / กรณี	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้าคลื่น / เวลาถึงค่ายอด (μ s)	เวลาถึงกึ่งค่ายอด / เวลาถึงตอนลับ (μ s)	ขนาดส่วนพุ่งเกิน / ความถี่การ แกว่ง/ เวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน (%ค่ายอด) / kHz / (μ s)
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	-
LIFCO / 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	-

- รูปคลื่นในกรณี 1, 2, 3, 4, 5 เป็นรูปคลื่นที่ไม่มีภาวะรบกวนหรือรูปคลื่นเรียบ
- รูปคลื่นในกรณี 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 เป็นรูปคลื่นที่มีภาวะรบกวน
- ความหมายของตัวย่อ

LI	ย่อมาจาก	Lightning Impulse
LIC	ย่อมาจาก	Lightning Impulse, Chopped
LIFO	ย่อมาจาก	Lightning Impulse with Front Oscillations
LIFCO	ย่อมาจาก	Lightning Impulse with Front Oscillations, Chopped
LILO	ย่อมาจาก	Lightning Impulse with Long Duration Overshoot
LISO	ย่อมาจาก	Lightning Impulse with Short Duration Overshoot
LISL	ย่อมาจาก	Lightning Impulse with Slow Oscillation

LIFA	ย่อมาจาก	Lightning Impulse with Fast Oscillation
SI	ย่อมาจาก	Switching Impulse

f = ความถี่ออสซิลเลชัน

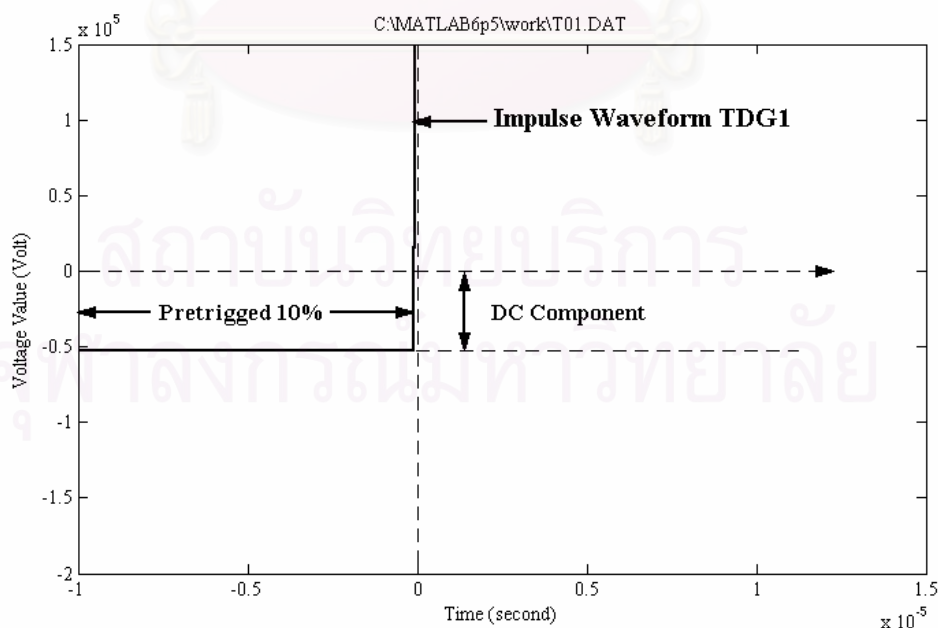
A = ขนาดของความถี่ออสซิลเลชันที่ค่ายอดแรก

τ = ช่วงเวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน

β = ขนาดของส่วนพุ่งเกิน

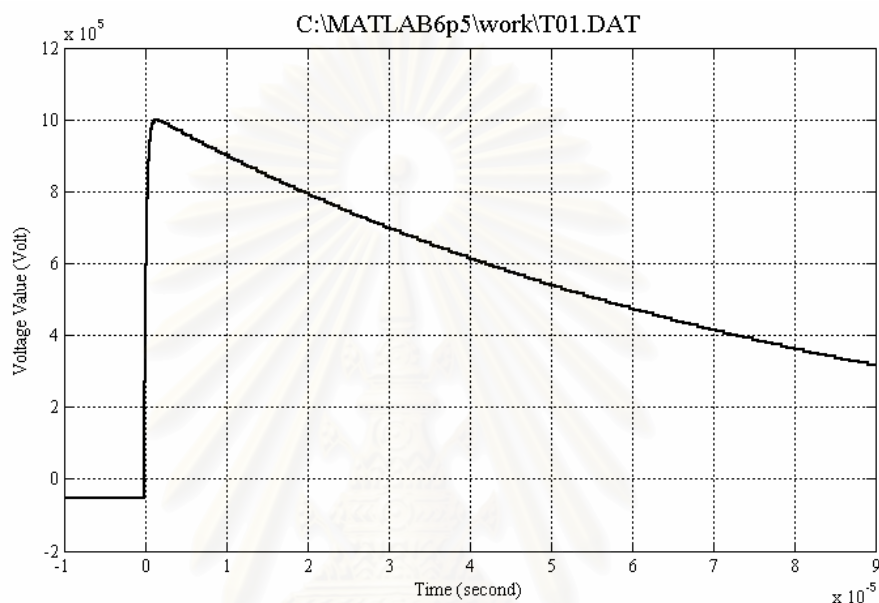
ขนาดของการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินของอิมพัลส์กรณีสี่ 4, 9, 13, 14 อยู่นอกเกณฑ์ 5% ของค่ายอดแรงดัน จึงทำให้อิมพัลส์เหล่านี้ ไม่ใช่อิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานตามที่กำหนดใน IEC 61083-2

รูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรม TDG จะมีส่วนประกอบไฟตรง (DC Component) และจำนวนจุดข้อมูลพริทริก ในที่นี้ใช้ค่าประมาณ 10% หรือประมาณ 1,000 จุดข้อมูล เป็นผลให้รูปคลื่นมีจุดเริ่มต้นของรูปคลื่นจริง มีความคลาดเคลื่อน จากจุดกำเนิด ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงรูปคลื่นจากโปรแกรม TDG ในกรณีที่ 1 บริเวณจุดเริ่มต้นของรูปคลื่น

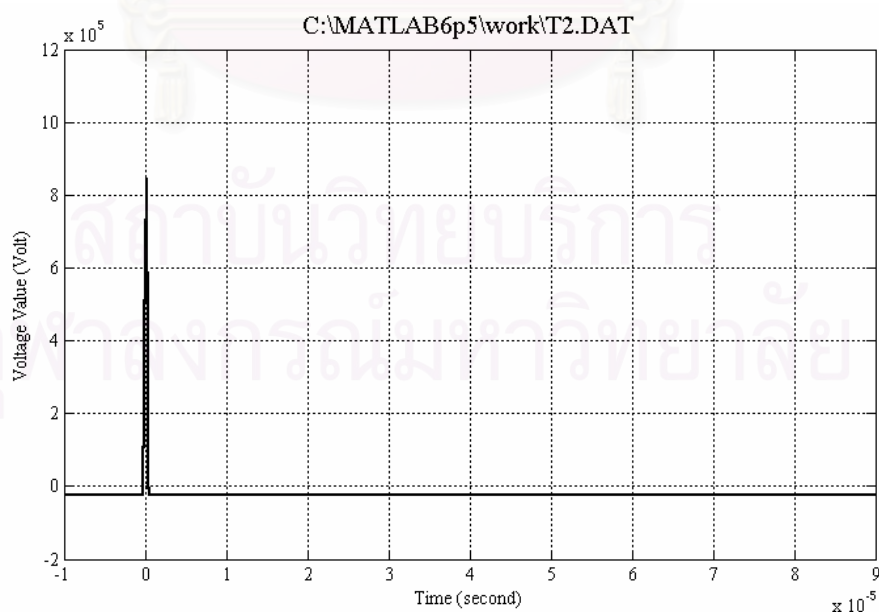


รูปที่ 2.8 แสดงจุดเริ่มต้นจริงของรูปคลื่นจากโปรแกรม TDG ในกรณีที่ 1

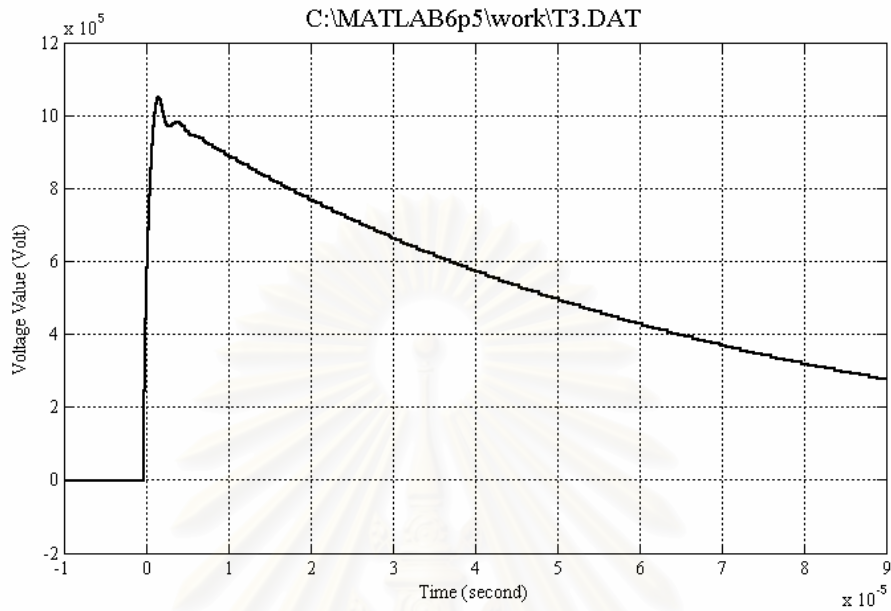
การใช้โปรแกรมมาตรฐาน TDG เพื่อสร้างรูปคลื่นอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 61083-2 สามารถจัดเก็บข้อมูลรูปคลื่นอ้างอิงในรูปของ ไฟล์ *.DAT ให้ผู้ใช้สามารถนำข้อมูลจากไฟล์ดังกล่าวมาใช้เพื่อทดสอบอัลกอริทึมของโปรแกรมได้ โดยรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG จะแสดงไว้ ณ ที่นี้ เฉพาะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 14 รูปคลื่น ดังนี้



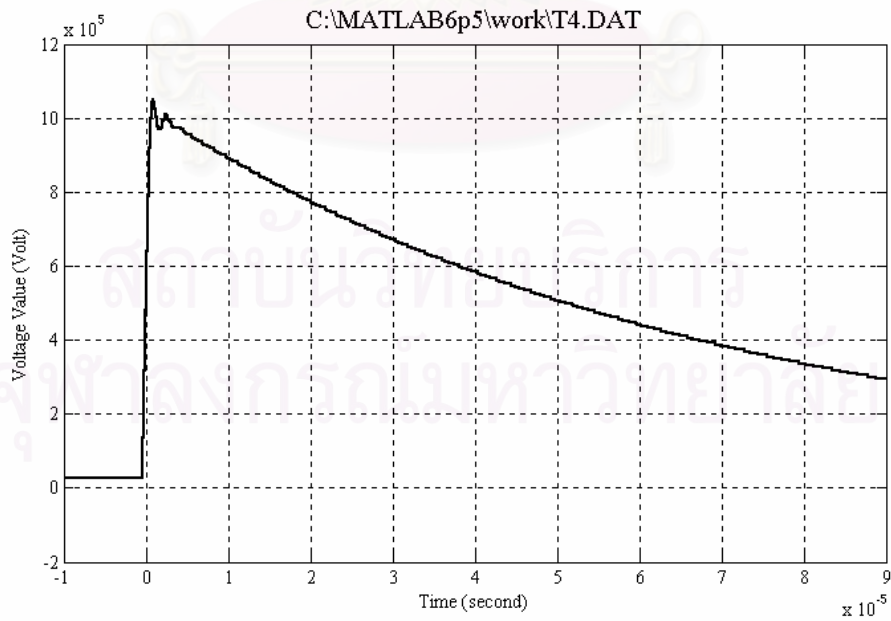
รูปที่ 2.9 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 1 (LI)



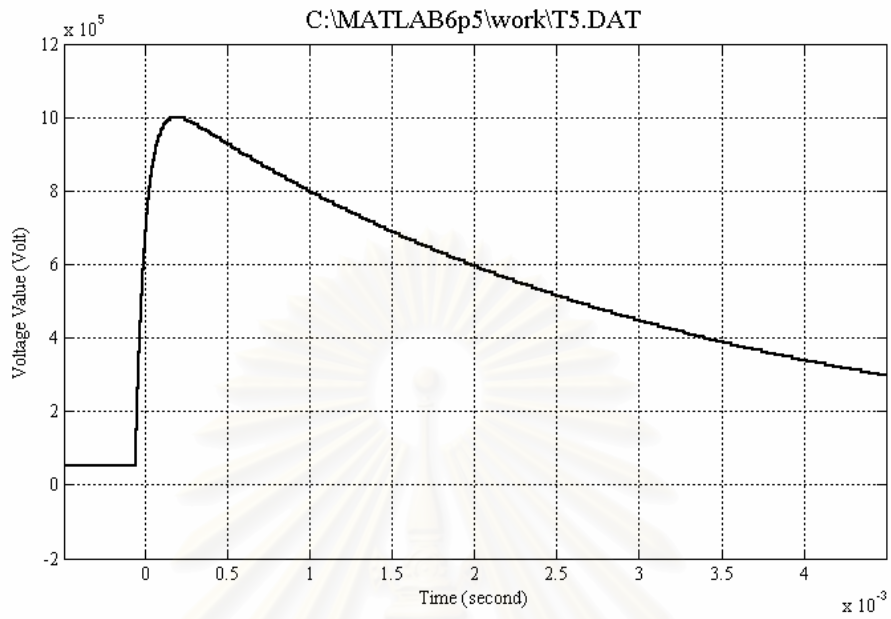
รูปที่ 2.10 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 2 (LIC)



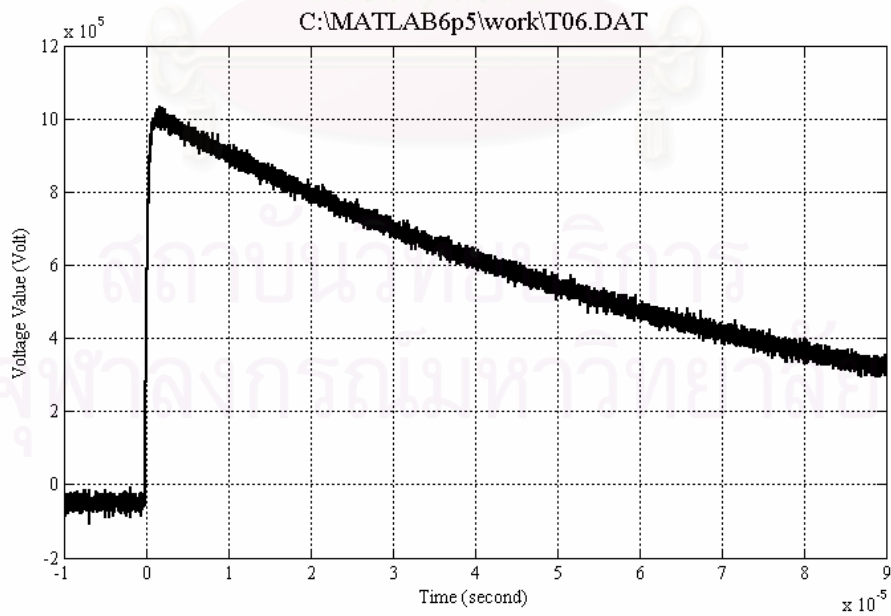
รูปที่ 2.11 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 3 (LISL)



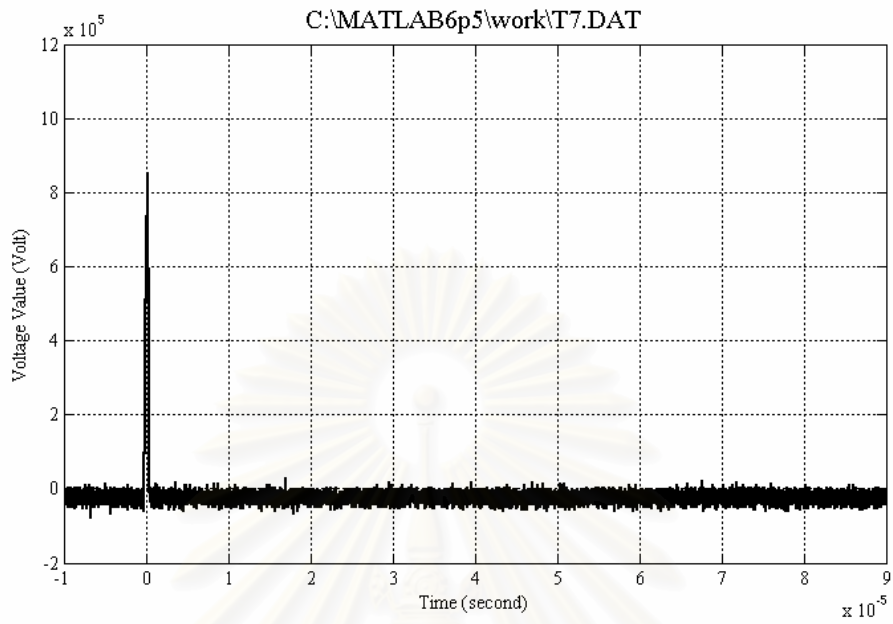
รูปที่ 2.12 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 4 (LIFA)



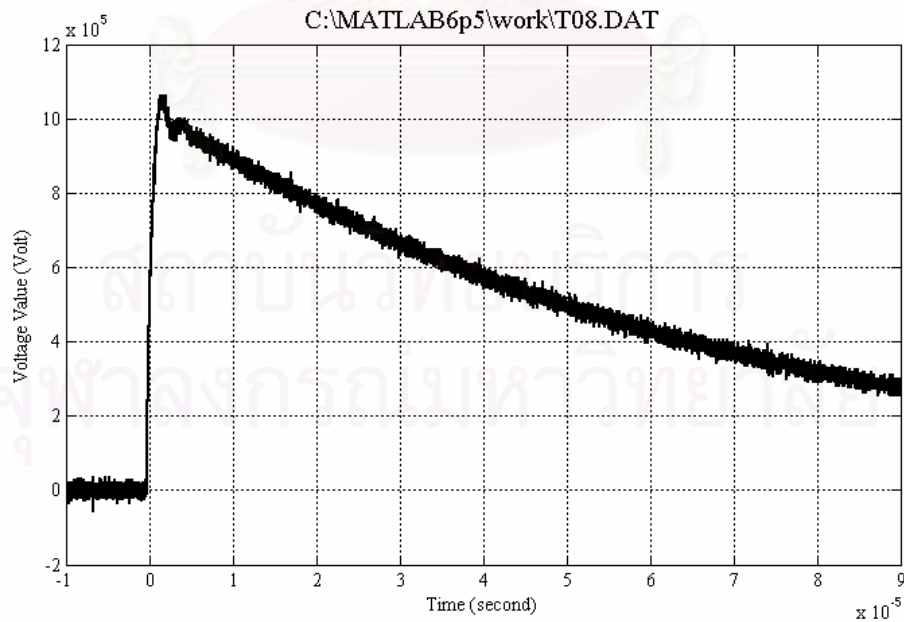
รูปที่ 2.13 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 5 (SI)



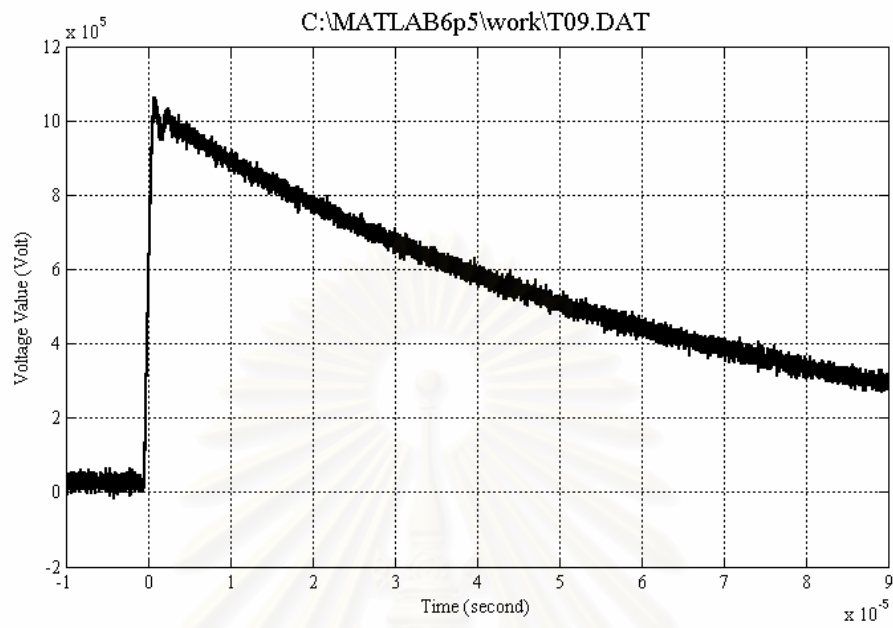
รูปที่ 2.14 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 6 (LI)



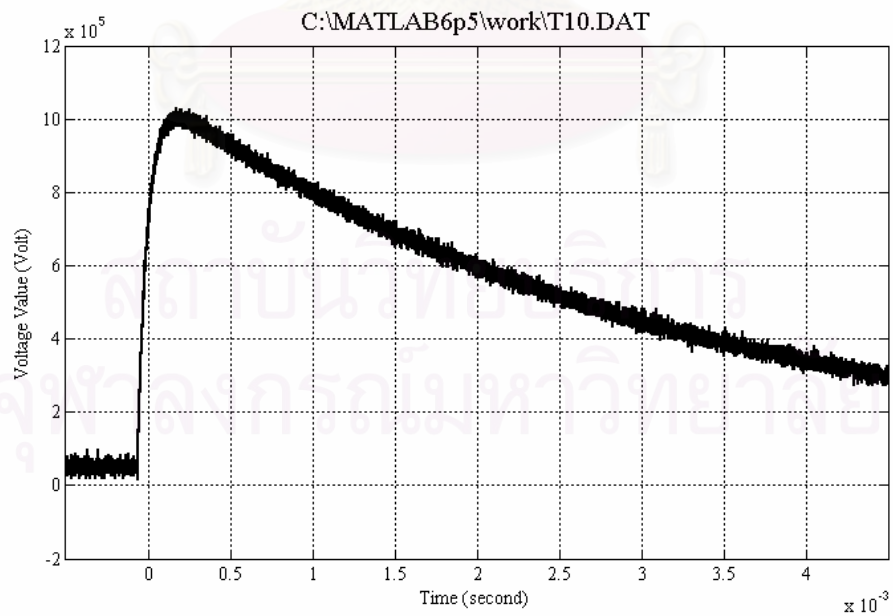
รูปที่ 2.15 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 7 (LIC)



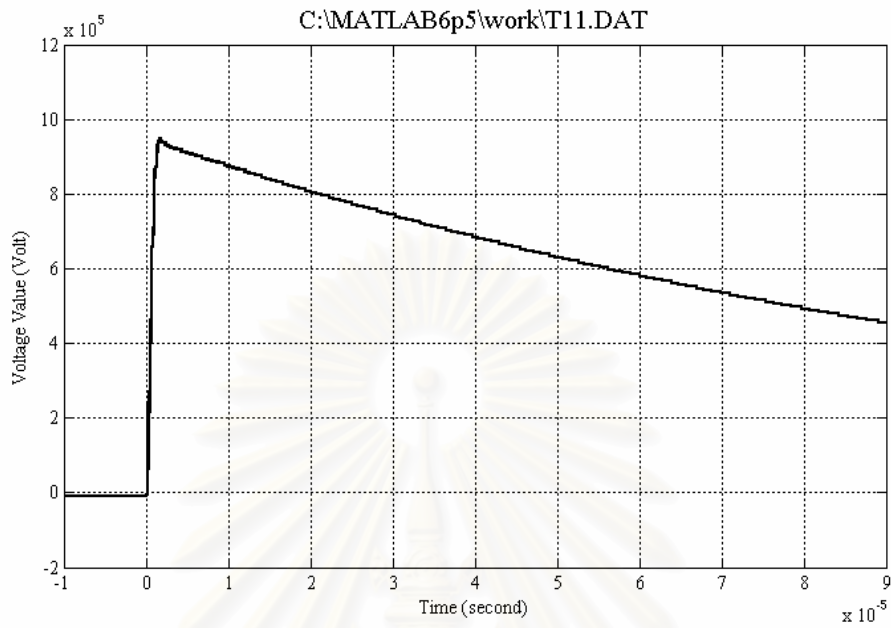
รูปที่ 2.16 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 8 (LISL)



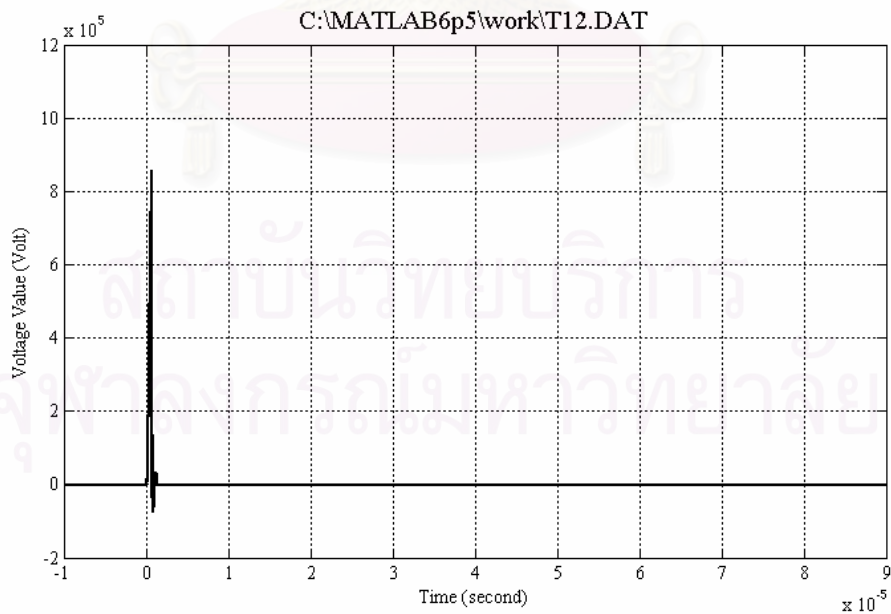
รูปที่ 2.17 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 9 (LIFA)



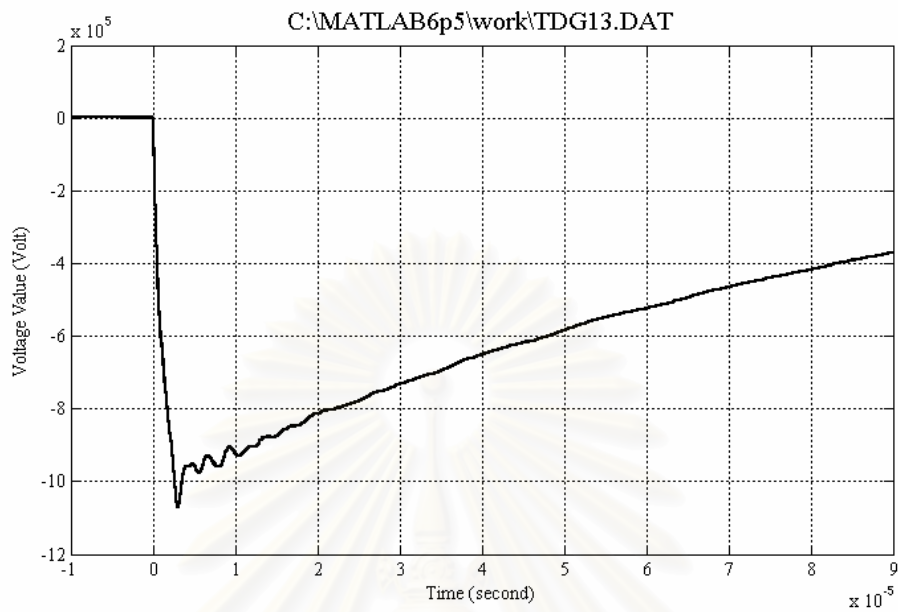
รูปที่ 2.18 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 10 (SI)



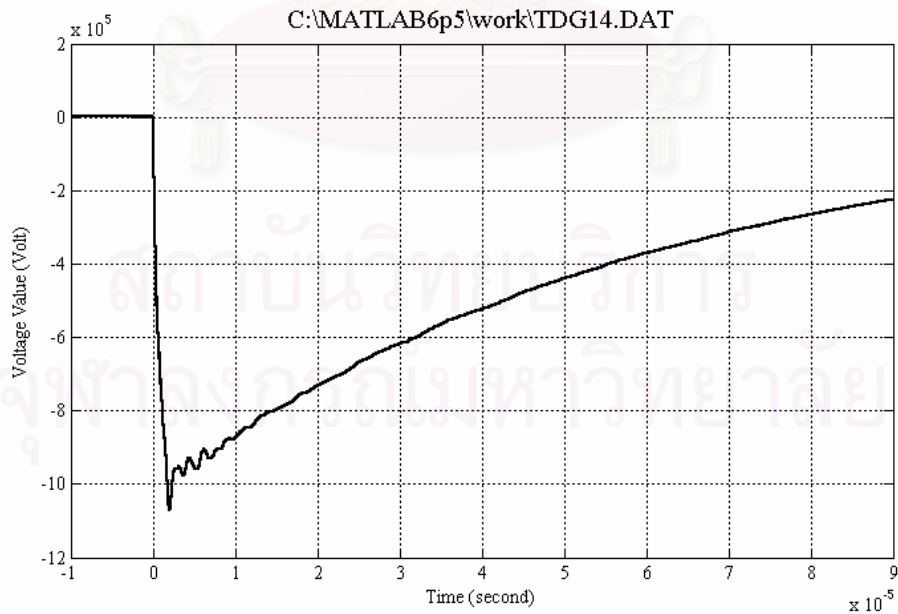
รูปที่ 2.19 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 11 (LIFO)



รูปที่ 2.20 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 12 (LICFO)



รูปที่ 2.21 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 13 (LILO)



รูปที่ 2.22 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG กรณีที่ 14 (LISO)

ในการทดสอบความถูกต้องของการประดิษฐ์รูปคลื่น นอกจากจะใช้โปรแกรมมาตรฐาน TDG ในการทดสอบแล้ว การเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีการที่ต่างกันได้ สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยการวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้าง (Residual Curve) (รูปคลื่นตกค้างคือรูปคลื่นที่เกิดจาก ผลต่างของรูปคลื่นจริงกับรูปคลื่นที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น) โดยมาตรฐานกำหนดให้รูปคลื่นตกค้าง มีค่าเฉลี่ยและค่า รากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้น ในการเปรียบเทียบวิธีการที่ต่างกันได้ หลาย ๆ วิธี สามารถใช้ค่าเฉลี่ยและค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้าง มาเปรียบเทียบกันได้ หากวิธีการใดมีค่าเฉลี่ยและค่ารากกำลังสองเฉลี่ยต่ำกว่าแสดงว่าวิธีการนั้นมีความถูกต้องมากกว่า

2.3 วิธีการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในงานวิจัยครั้งนี้

การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในงานวิจัยครั้งนี้ มี 2 วิธีการ ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ได้แก่วิธีตัวกรองกาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ แต่ละวิธีการมีความแตกต่างในกรรมวิธี และมีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกัน ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 โดยวิธีตัวกรองกาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ มีกรรมวิธีดังนี้

2.3.1 วิธีตัวกรองกาลมาน

วิธีตัวกรองกาลมาน เป็นการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันพัลส์ สำหรับข้อมูลเต็มหน่วย (Discrete Data) เพื่อประมาณค่าจริงจากค่าที่วัดได้ โดยวิธีการนี้เป็นกรรมวิธีเชิงเส้น (Linear Algorithm) โดยคำนวณมาจากสมการสถานะทั่วไป ดังนี้

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}_d, t) + \mathbf{u}(t) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{v}(t) \quad (2.3)$$

เมื่อ $\mathbf{x}(t)$ = เวกเตอร์สถานะที่เวลา t

$\mathbf{z}(t)$ = ค่าที่วัดได้ที่เวลา t

$\mathbf{f}(\mathbf{x}, t), \mathbf{h}(\mathbf{x}, t)$ = ฟังก์ชันที่ทราบค่า

$\mathbf{u}_d(t)$ = ฟังก์ชันที่เข้ามากระทำที่เวลา t

$\mathbf{u}(t), \mathbf{v}(t)$ = กระบวนการรบกวนทางเวลาและเป็นอิสระต่อกัน

เมื่อมีการรับข้อมูลที่วัดได้เข้ามา จะมีการปรับปรุงตัวแปรไปเรื่อย ๆ โดยค่าของ x ที่ประมาณได้จะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นเรียกว่าเป็น ตัวกรองคาลมานแบบขยาย (Extended Kalman Filter)

จากสมการความผิดพลาด

$$x(t) = x^*(t) + \Delta x(t) \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } x(t) &= \text{ค่าจริง} \\ x^*(t) &= \text{ค่าที่ประมาณได้ที่เวลา } t \\ \Delta x(t) &= \text{ค่าผิดพลาดที่เวลา } t \end{aligned}$$

สร้างสมการปรับปรุง

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - \hat{z}_k^-) \quad (2.5)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (2.6)$$

$$H_k = \left[\frac{\partial h}{\partial x} \right]_{x_k = x_k^*} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \hat{x}_k^- &= \text{ค่าประมาณที่ดีที่สุดก่อนเวลา } t_k \\ z_k &= \text{ค่าที่วัดได้ที่เวลา } t_k \\ \hat{z}_k^- &= \text{ค่าประมาณค่าที่วัดได้ที่ดีที่สุดก่อนถึงเวลา } t_k \\ K_k &= \text{อัตราขยายของคาลมาน (Kalman Gain)} \end{aligned}$$

P_k = ความแปรปรวนของเวกเตอร์สถานะ (Estimation Error Covariance Matrix)

\hat{z}_k^- หาได้จากสมการ

$$\hat{z}_k^- = h(x_k^*, t_k) + H_k \Delta \hat{x}_k^- \quad (2.8)$$

$$\Delta \hat{x}_k^- = \hat{x}_k^- - x_k^* \quad (2.9)$$

K_k หาได้จากสมการ

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (2.10)$$

เมื่อ H_k^T = ทรานสโพสเมตริกซ์ ของ H_k

R_k = Covariance Matrix ของค่าผิดพลาดจากการวัด ($v(t)$)

ทำการประมาณในวงรอบใหม่ ได้ คือ

$$\hat{x}_{k+1}^- = f(\hat{x}_k, u_d, t) \quad \text{ที่เวลา } t = t_{(k+1)} \quad (2.11)$$

$$P_{k+1}^- = \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k \quad (2.12)$$

เมื่อ Q_k = Covariance Matrix ของ $u(t)$

Φ_k เป็นเมตริกซ์ หาได้จากสมการ

$$\Phi_k = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]_{x_k = x_k^*} \quad (2.13)$$

แล้วนำไปปรับปรุง x_k และ P_k จะทำให้ได้ค่าสำหรับวงรอบต่อไป

การคำนวณด้วยวิธีตัวกรองคาลมานจะมีเกณฑ์หยุด สองเกณฑ์ คือ

- ครบรอบที่กำหนด
- เมื่อค่าสัมบูรณ์ของความแปรปรวน (เมตริกซ์ P) 2 รอบที่ติดกันน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ (10^{-8} , 10^{-6}) [11] มีผลให้ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้างมีค่าต่ำสุด

สำหรับกรรมวิธีการนำวิธีตัวกรองคาลมาน เพื่อให้ประติษฐานรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า สามารถเลือกใช้สมการมาประติษฐานรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าสมการใดก็ได้ หากแต่สมการที่มีความนิยมใช้ประติษฐานรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ได้แก่

$$M(t) = A_0 (e^{-a(t+t_0)} - B e^{-b(t+t_0)}) (1 - B_1 e^{-c(t+t_0)})^d \quad (2.14)$$

การประยุกต์ใช้วิธีตัวกรองคาลมาน กับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซิ่ง ทำได้โดยสร้างสมการสถานะ ได้แก่

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi \mathbf{x}_k \quad (2.15)$$

$$Z(t) = M(\mathbf{x}, t) + G_N(t) \quad (2.16)$$

โดยที่ Φ = เมทริกซ์เอกลักษณะ (I) มีการรบกวน $Q_k = 0$

$Z(t)$ = ค่ารูปคลื่นที่วัดได้ที่เวลา t

$M(\mathbf{x}, t)$ = รูปคลื่นเฉลี่ยที่ประคิษฐ์จากสมการแบบจำลอง

$G_N(t)$ = ภาวะรบกวนทั้งหมด (ได้แก่ การแกว่ง, ส่วนพุ่งเกิน, สัญญาณรบกวนและค่าผิดพลาดจากการวัด)

กำหนดให้ x^* เป็นค่าประมาณเริ่มต้น จะได้

$$\hat{z}_k^- = h(\mathbf{x}_k^*, t_k) = [M(\hat{x}_k^-, t)] \quad (2.17)$$

ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 กำหนดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs มีค่าผิดพลาด $\pm 30\%$ สำหรับเวลาหน้าคลื่น และ $\pm 20\%$ สำหรับเวลาถึงกึ่งค่ายอด

ดังนั้นเวกเตอร์สถานะจะมีค่าอยู่ในช่วงช่วงหนึ่ง โดยกำหนดให้ค่าของเวกเตอร์สถานะเป็นกระบวนการสุ่ม (Random Process) มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ จะได้ค่าประมาณเริ่มต้นและความแปรปรวนของเวกเตอร์สถานะแต่ละตัว ตามสมการ

$$\hat{x}_i^- = \frac{1}{2}(x_{i1} + x_{i2}) \quad (2.18)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{12}(x_{i1} - x_{i2})^2 \quad (2.19)$$

P เป็นเมตริกซ์แนวทแยง ที่มีค่าความแปรปรวนของเวกเตอร์สถานะ

R_k เป็นเมตริกซ์ขนาด 1×1 บอกถึงค่าความแปรปรวนของ $G_N(t)$ โดยกำหนดค่าตามมาตรฐาน คือ 5% ของค่ายอด จะได้

$$R_k = \frac{1}{3} K^2 \hat{U}_p^2 \quad (2.20)$$

โดยที่ K^2 มีค่าอยู่ในช่วง $[9 \times 10^{-5}, 3 \times 10^{-3}]$ [11]

เมื่อทราบค่า x^* , R_k และเมตริกซ์ P จะสามารถคำนวณช่วงรอบใหม่ได้ โดยใช้สมการที่ (2.4) ถึง สมการที่ (2.13)

หลังจากนำค่าขอบเขตที่ได้จากข้อกำหนดตามมาตรฐาน เข้าสู่กระบวนการคำนวณ จะทำให้ค่าความแปรปรวนในแต่ละรอบการคำนวณลดลง จนกระทั่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนด จะมีผลให้ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้างมีค่าน้อยที่สุดด้วย

ปัญหาการวิเคราะห์ค่าส่วนพุ่งเกินสำหรับวิธีตัวกรองกาลมาน

มาตรฐาน IEC 60060 -1 ได้กำหนดไว้ว่า หากรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามี ส่วนพุ่งเกิน ซ้อนทับอยู่ในเวลาไม่เกิน $1 \mu s$ และมีขนาดของส่วนพุ่งเกินไม่เกิน 5% ให้ถือว่ารูปคลื่นนั้นไม่มีส่วนพุ่งเกิน และใช้ค่าแรงดันทดสอบเป็นแรงดันสูงสุด ที่นำเอาส่วนพุ่งเกินออกไปแล้ว รูปคลื่นที่นำเอาส่วนพุ่งเกินออกไปแล้ว จะเรียกว่า "Mean Curve Without Overshoot (MCWO)"

นิยามของเวลาในการเกิดส่วนพุ่งเกิน กล่าวว่า เป็นเวลาที่รูปคลื่นอิมพัลส์ (ที่มีส่วนพุ่งเกินอยู่ด้วย) มีค่ามากกว่ารูปคลื่นอิมพัลส์ที่ตัดส่วนพุ่งเกินออกไปแล้ว (MCWO) ในทางปฏิบัติ เราจะเขียนรูปคลื่นอีกรูปหนึ่ง คือ รูปคลื่นที่นำผลการแกว่ง และสัญญาณรบกวนออกไปแล้ว แต่ยังมีส่วนพุ่งเกินอยู่ เรียกว่า "Mean Curve With Overshoot (MCO)" โดยที่ค่าส่วนพุ่งเกิน และเวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน จะต้องคำนวณจาก MCWO และ MCO

การประเมินค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยวิธีตัวกรองคาถมาน

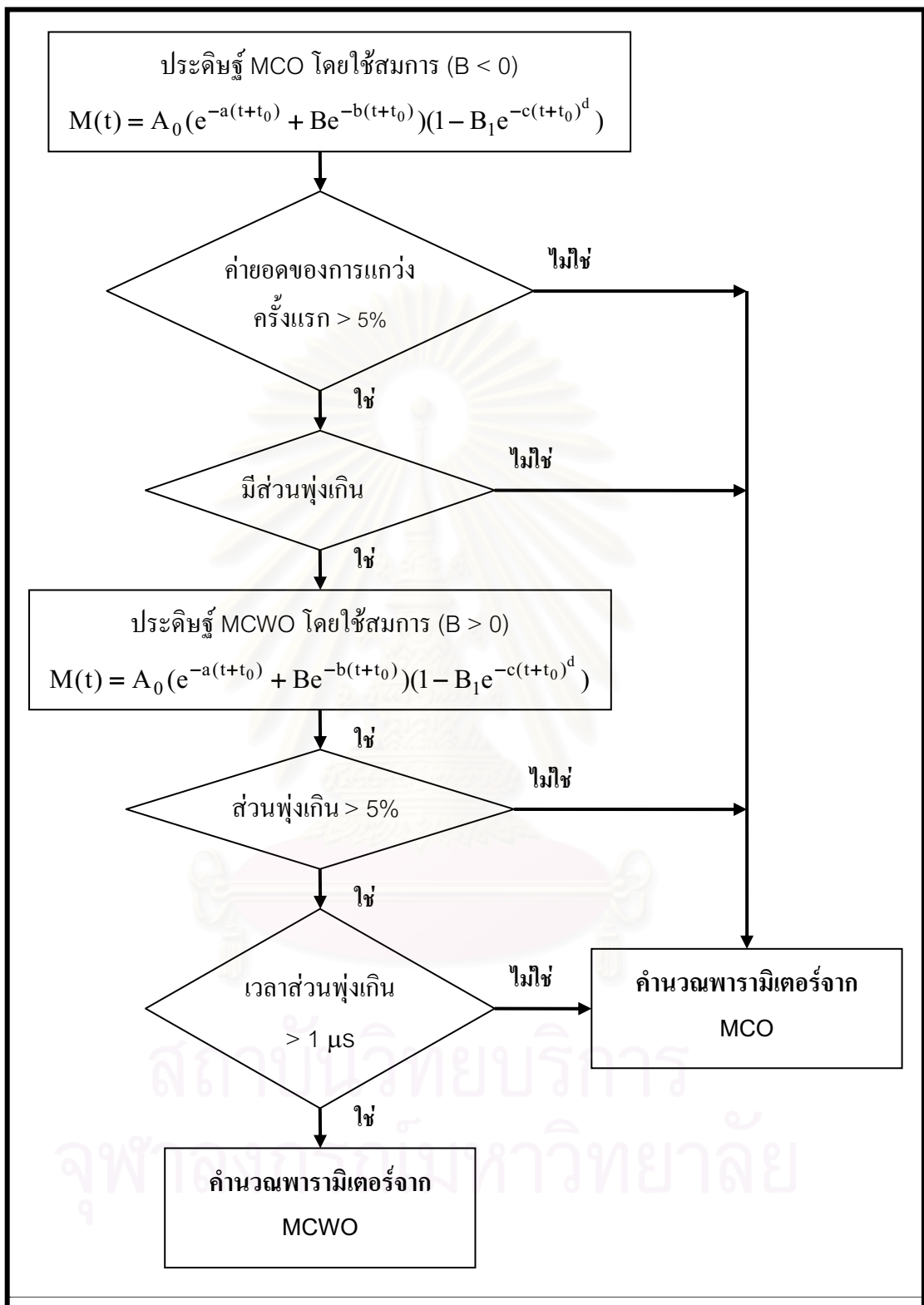
1. ประดิษฐ์ MCO หากค่ายอดของการแกว่ง 5 ครั้งมากกว่า 5% ของ MCO แสดงว่าไม่ใช่รูปคลื่นมาตรฐาน หยุดกระบวนการคำนวณ หากไม่ใช่ กระบวนการดำเนินต่อไป
2. หาก MCO ไม่มีส่วนพุ่งเกิน จำนวน พารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์จาก MCO และกระบวนการจะหยุด หาก มีส่วนพุ่งเกิน กระบวนการจะดำเนินต่อไป
3. ประดิษฐ์ MCWO จำนวนหาค่าส่วนพุ่งเกิน หากส่วนพุ่งเกินมีค่าเกิน 5% (ของ MCO หรือ MCWO ?) แสดงว่าไม่ใช่รูปคลื่นตามมาตรฐาน กระบวนการจะหยุด หากส่วนพุ่งเกินน้อยกว่า 5% กระบวนการจะดำเนินต่อไป
4. หากเวลาเกิดส่วนพุ่งเกิน มีค่ามากกว่า $1 \mu\text{s}$ ให้คำนวณพารามิเตอร์จาก MCO ถ้าไม่ คำนวณพารามิเตอร์จาก MCWO

การประดิษฐ์ MCO และ MCWO เมื่อใช้ตัวกรองคาถมาน

การประดิษฐ์รูปคลื่นจะเริ่มประดิษฐ์จากส่วนหางคลื่นก่อน โดยเลือกจุดที่น่าจะเป็นหางคลื่นมาสองจุด จากนั้นก็ทำการชักตัวอย่างจากสองจุด ประดิษฐ์หางคลื่นเพื่อตรวจสอบส่วนพุ่งเกินก่อน

เพื่อให้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น ให้ใช้การประมาณค่าตัวแปร B ตามสมการที่ (2.14) ให้เป็นค่าบวก สำหรับการประดิษฐ์ MCWO และให้เป็นค่าลบ สำหรับการประดิษฐ์ MCO

กรณีที่รูปคลื่น ไม่มีส่วนพุ่งเกิน รูปคลื่น MCO และ MCWO เป็นรูปคลื่นเดียวกัน



รูปที่ 2.23 แสดงขั้นตอนในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยวิธีตัวกรองคาถมาน

2.3.2 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์เป็นวิธีการประดิษฐ์รูปคลื่นโดยใช้กรรมวิธีแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Algorithm) ลักษณะเป็นการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน โดยมีวิธีการดังนี้ เริ่มต้นด้วยการตั้งสมการค่าผิดพลาด ($F(w)$ คือสมการที่ต้องการให้มีค่าน้อยที่สุด)

$$F(w) = \varepsilon^T \varepsilon \quad (2.21)$$

$$\Delta w = [J^T J + \lambda I]^{-1} J^T \varepsilon \quad (2.22)$$

โดยที่

$F(w)$ = ผลรวมของค่าผิดพลาดทั้งหมด

w = $[w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ คือ ตัวแปรของสมการสถานะ

ε = เวกเตอร์ค่าผิดพลาด

λ = พารามิเตอร์ ซึ่งปรับปรุง โดยอัตราลด (Decay Rate) $\beta = 0.1$

J = จาคอบีเยนเมทริกซ์ หาได้จากสมการ

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_N}{\partial w_N} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

ขั้นตอนวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

หาค่าเริ่มต้นของ w , λ (กำหนดให้ $\lambda = 0.01$)

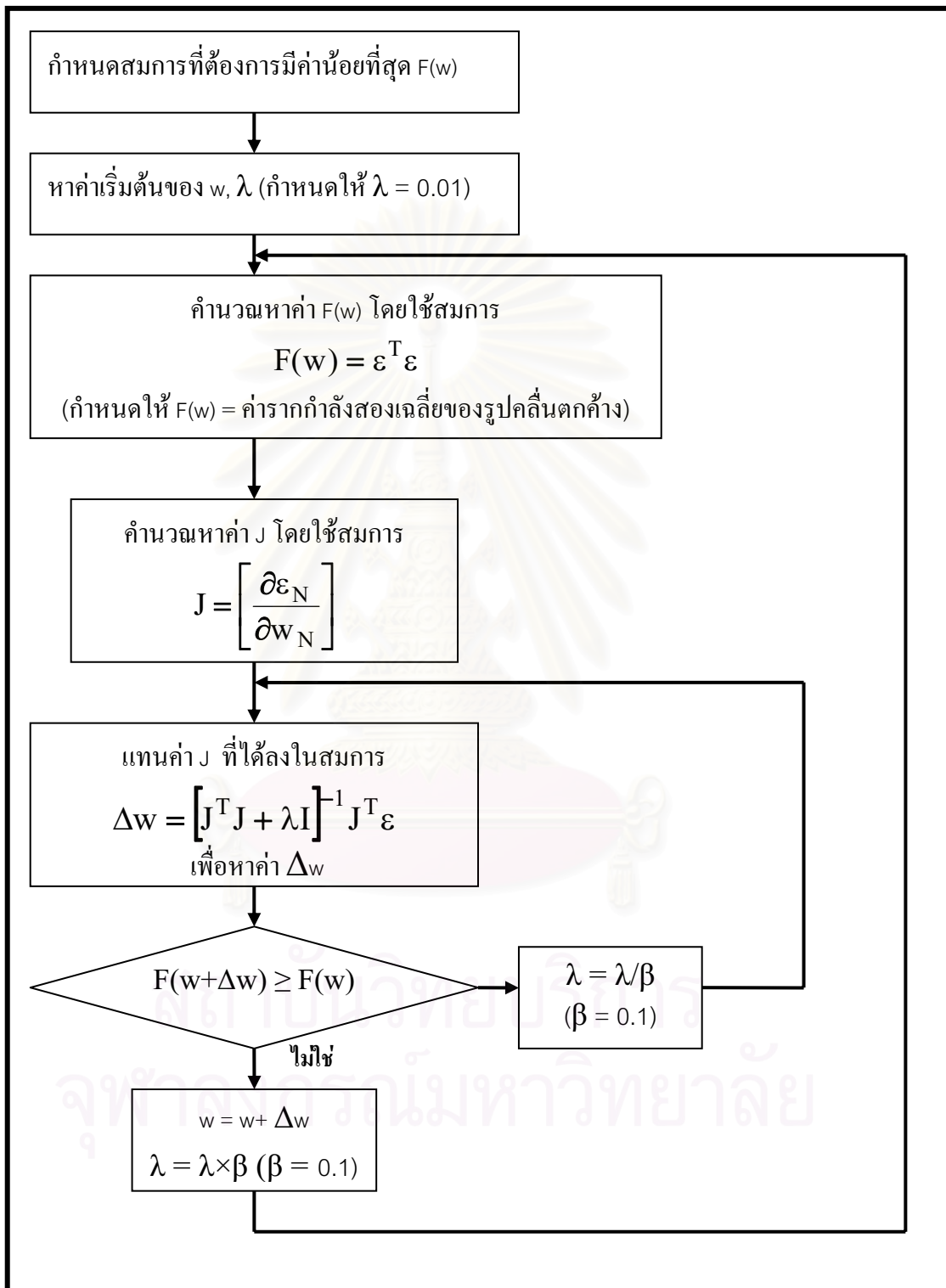
1. คำนวณหาค่า $F(w)$
2. คำนวณหาค่า J จากสมการ (2.23)
3. แทนค่าที่ได้ในสมการที่ (2.22) หาค่า Δw
4. ปรับปรุงค่า w (ใหม่) = $w + \Delta w$ เปรียบเทียบค่า $F(w)$ (ใหม่) กับ $F(w)$ (เก่า)
5. หาก $F(w)$ (ใหม่) < $F(w)$ (เก่า) ให้แทนค่า

$$w = w \text{ (ใหม่)}$$

$$\lambda = \lambda \times \beta \quad (\beta=0.1)$$
 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2
6. หาก $F(w)$ (ใหม่) $\geq F(w)$ (เก่า) ให้แทนค่า

$$\lambda = \lambda / \beta \quad (\beta=0.1)$$
 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ สามารถเขียนขั้นตอนวิธีการได้ดังนี้



รูปที่ 2.24 แสดงขั้นตอนในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

การประยุกต์ใช้วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ กับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ทำได้โดยใช้ค่าผิดพลาดกำลังสอง (Square Error) เป็นฟังก์ชันที่ต้องการให้มีค่าต่ำสุด จากสมการ

$$F = \sum_{i=1}^n [u_m(i) - u_c(i)]^2 \Rightarrow \text{Min!} \quad (2.24)$$

โดยที่ $u_m(i)$ = รูปคลื่นจริงที่วัดได้
 $u_c(i)$ = รูปคลื่นที่ประดิษฐ์ขึ้น

รูปคลื่นประดิษฐ์ $u_c(i)$ สามารถเลือกใช้สมการแบบจำลองที่เหมาะสมกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า และรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง แบบใดก็ได้ เช่น

$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2.25)$$

$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + B(1 - \cos(\omega t))e^{-\gamma t} \quad (2.26)$$

$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + C \sin(\phi t)e^{-\delta t} \quad (2.27)$$

$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + B(1 - \cos(\omega t))e^{-\gamma t} + C \sin(\phi t)e^{-\delta t} \quad (2.28)$$

เมื่อเลือกสมการแบบจำลองที่ต้องการแล้ว แทนค่าใน สมการ (2.24) จากนั้น นำสมการที่ได้ เข้าสู่ขั้นตอนวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ตามรูปที่ 2.24 จะทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมีค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุด ตามต้องการ

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การเปรียบเทียบวิธีตัวกรองคาบมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

แนวทางในการเปรียบเทียบวิธีการทั้งสองวิธีการซึ่งมีความแตกต่างกันนั้น แนวทางสำคัญทางหนึ่งได้แก่ การเปรียบเทียบกับรูปคลื่นอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 61083-2 ได้แก่ รูปคลื่นที่สร้างจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เนื่องจากงานวิจัยนี้ ยึดถือผลตามมาตรฐาน IEC 61083-2 เป็นเกณฑ์ และแนวทางอื่น ๆ ในการเปรียบเทียบ ได้แก่ การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย และค่ารากกำลังสอง ของรูปคลื่นตกค้าง ในแต่ละกรณี

3.1 หลักเกณฑ์ในการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์รูปคลื่น

วิธีตัวกรองคาบมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งวิธีการได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 หากจะนำมาเปรียบเทียบวิธีการ จำเป็นต้องจัดให้อยู่บนพื้นฐานเดียวกัน ได้แก่

3.1.1 รูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรม TDG เป็นรูปคลื่นเดียวกัน

3.1.2 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ เป็นสมการเดียวกัน

3.1.3 ค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ใช้รูปแบบเดียวกัน

3.1.4 อัลกอริทึมหลักที่ใช้เป็นอัลกอริทึมเดียวกัน ได้แก่ อัลกอริทึมดังรูปที่ 3.1 โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยรูปคลื่นเฉลี่ยจะใช้วิธีตัวกรองคาบมาน และวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ เพื่อการเปรียบเทียบ

3.1.5 ใช้โปรแกรมเมทแลปเวอร์ชัน 6.5 ในการเขียนโปรแกรมวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

3.2 รูปแบบของข้อมูลเข้า

ข้อมูลหลักที่ใช้เป็นรูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรม TDG โดยเก็บเป็นไฟล์ข้อมูล โดยใช้หลักเกณฑ์เดียวกับ นายสรณรงค์ สุวรรณนารักษ์ (2541) [15] ได้แก่

3.2.1 จำนวนจุดข้อมูลใช้ 10,000 จุด

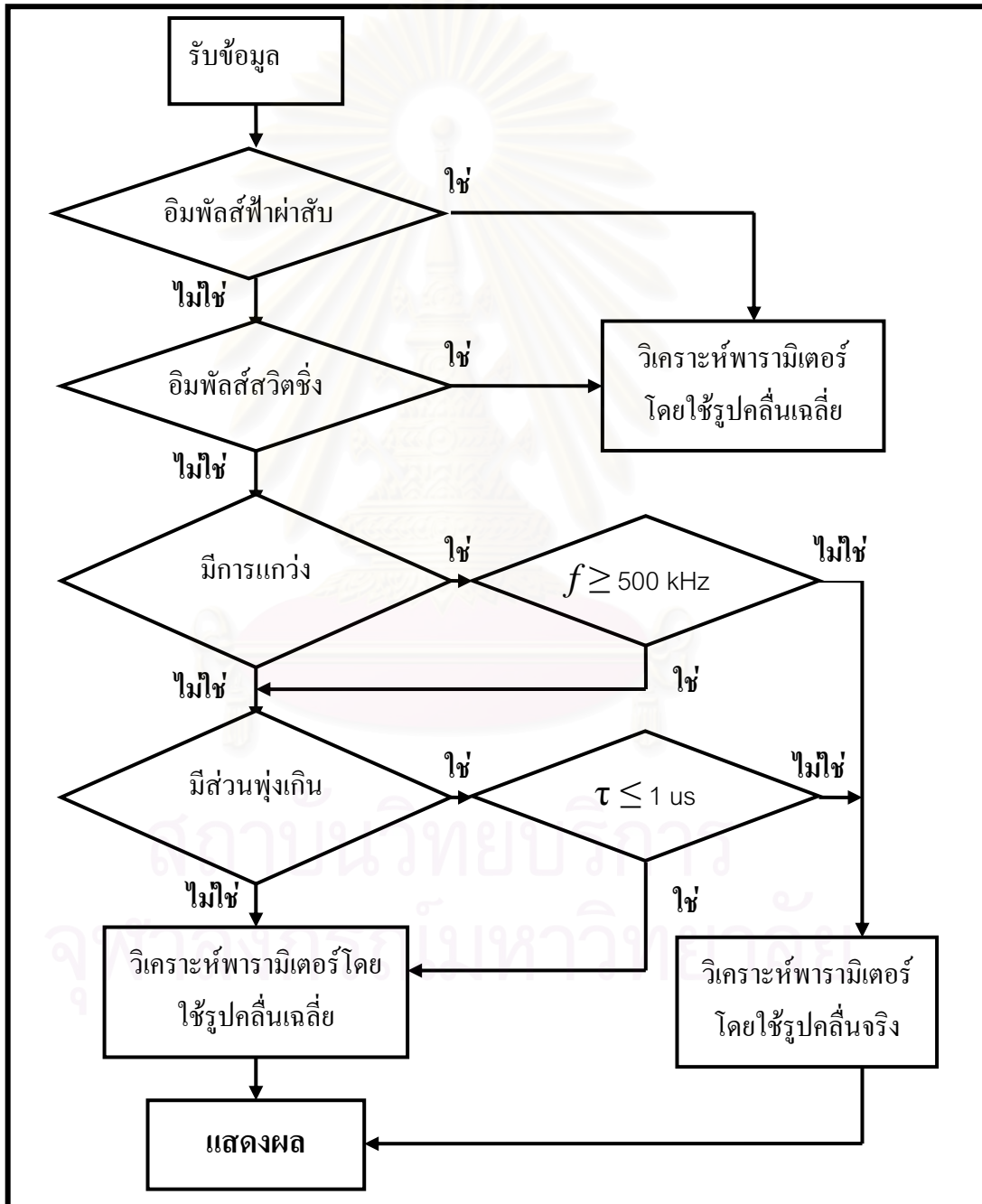
3.2.2 จำนวนพรีทริก เท่ากับ 10% ของจำนวนจุดข้อมูล

3.2.3 ระดับสัญญาณรบกวนภายใน กำหนดไว้สูงสุด 1%

3.2.4 อัตราการซัดตัวอย่างตามมาตรฐาน IEC 61083-1 [16] โดยคำนวณจาก

$$\text{อัตราการซัดตัวอย่าง} \geq 30/T_x \text{ Hz}$$

เมื่อ ค่า T_x คือช่วงเวลาระหว่าง ค่าแรงดัน 30% และ แรงดัน 90% ของค่ายอด เลือกใช้ค่า T_x ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ ที่มีเวลาถึงตอนสับไม่น้อยกว่า 500 ns จะได้ค่า T_x ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ เท่ากับ 300 ns และอัตราการชกตัวอย่างของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ฟ้าผ่า 100 MHz ส่วนรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง จะใช้อัตราการชกตัวอย่าง 2 MHz เพื่อให้ได้ ข้อมูลถึงค่าแรงดันเป็นครั้งหนึ่งของค่ายอด



รูปที่ 3.1 แสดงอัลกอริทึมของ โปรแกรมวิเคราะห์พารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

3.3 การจำแนกรูปคลื่น

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่รับเข้ามาวิเคราะห์ มีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 3 ประเภท ได้แก่

3.3.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ

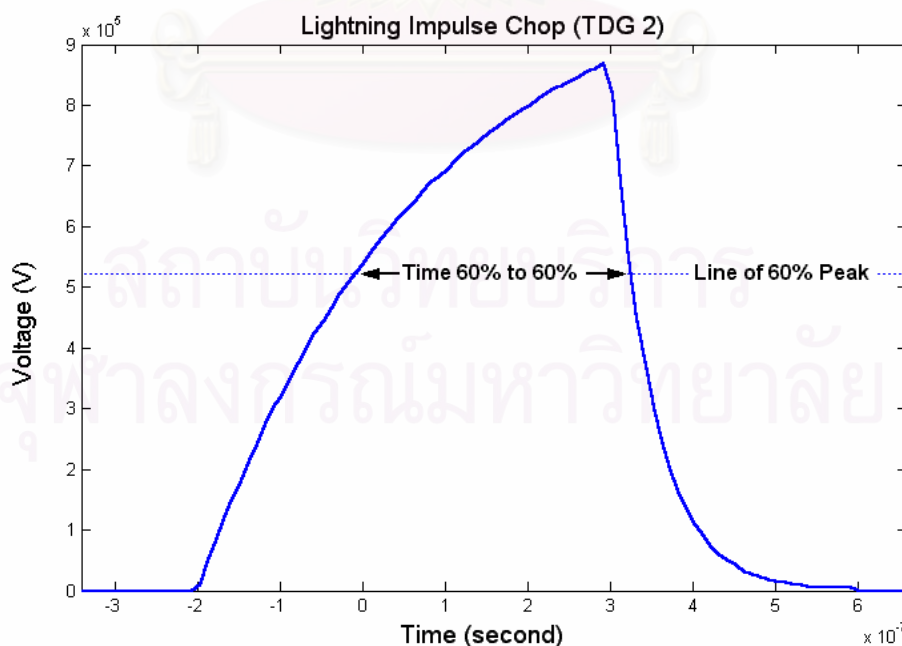
3.3.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

3.3.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

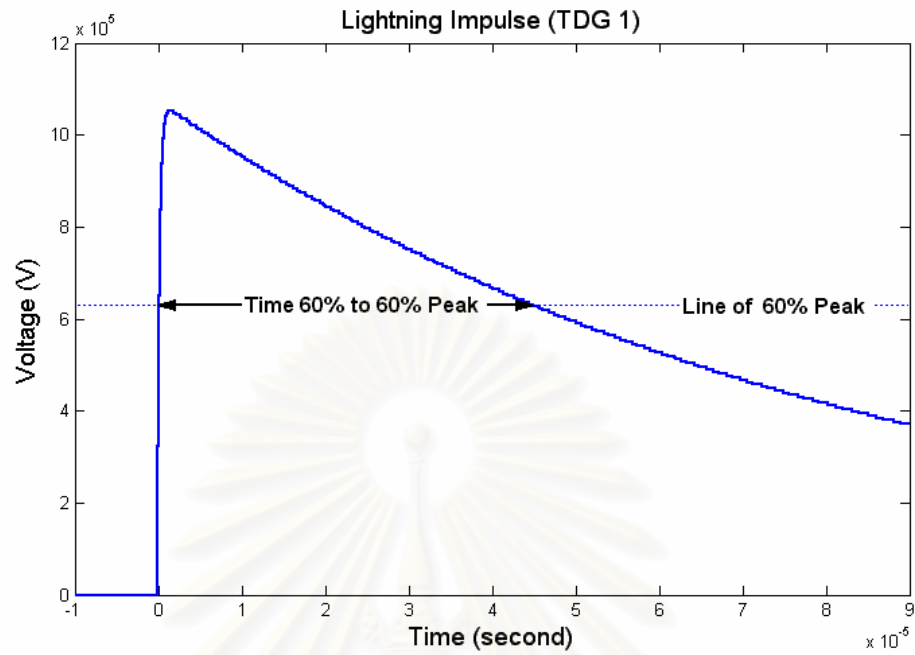
การจำแนกรูปคลื่นทั้งสามกรณี ใช้ความแตกต่างของเวลาระหว่างจุดที่ค่าแรงดันเป็น 60% ของค่ายอดข้อมูลดิบ เนื่องจาก IEC 60060-1 กำหนดเวลาถึงกึ่งค่ายอดไว้ 40-60 μs สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มตามมาตรฐาน และกำหนดเวลาถึงค่ายอดไว้ 200-400 μs สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

ดังนั้น จึงกำหนดค่าเวลาระหว่างค่าแรงดัน 60% ของค่ายอดข้อมูลดิบไว้ดังนี้

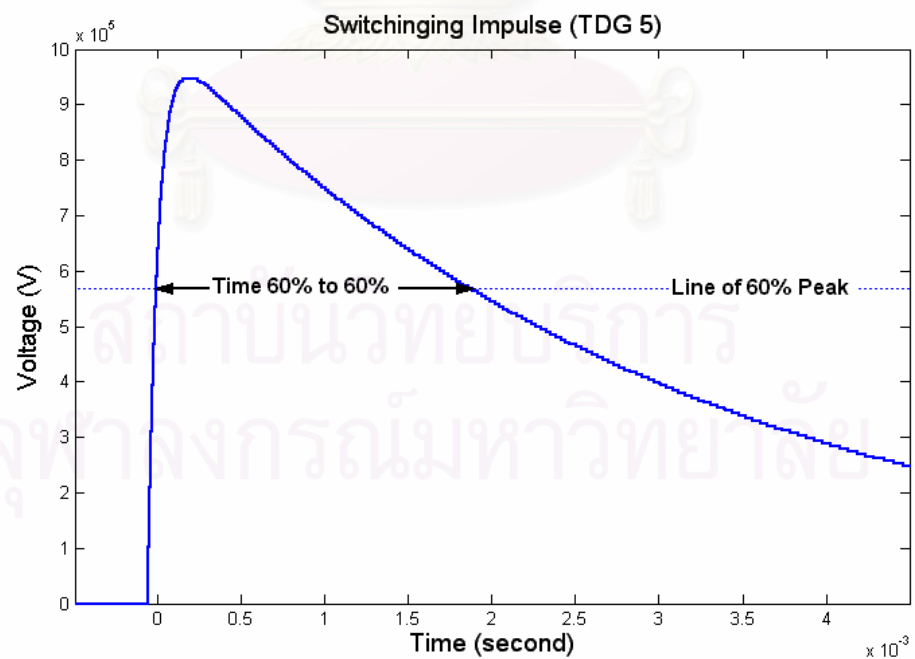
- แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ ต่ำกว่า 10 μs (ดูรูปที่ 3.2)
- แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม ต่ำกว่า 100 μs (ดูรูปที่ 3.3)
- แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง มากกว่า 100 μs (ดูรูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.2 แสดงช่วงเวลาระหว่างค่าแรงดัน 60% กรณีรูปคลื่นฟ้าผ่าสับ (รูปคลื่นอ้างอิง กรณีที่ 2)



รูปที่ 3.3 แสดงช่วงเวลาระหว่างค่าแรงดัน 60% กรณีรูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม (รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1)



รูปที่ 3.4 แสดงช่วงเวลาระหว่างค่าแรงดัน 60% กรณีรูปคลื่นสวิตชิง (รูปคลื่นอ้างอิง กรณีที่ 5)

3.4 การหาค่าเริ่มต้นเพื่อคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ย

จากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม ซึ่งมีรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ คือ

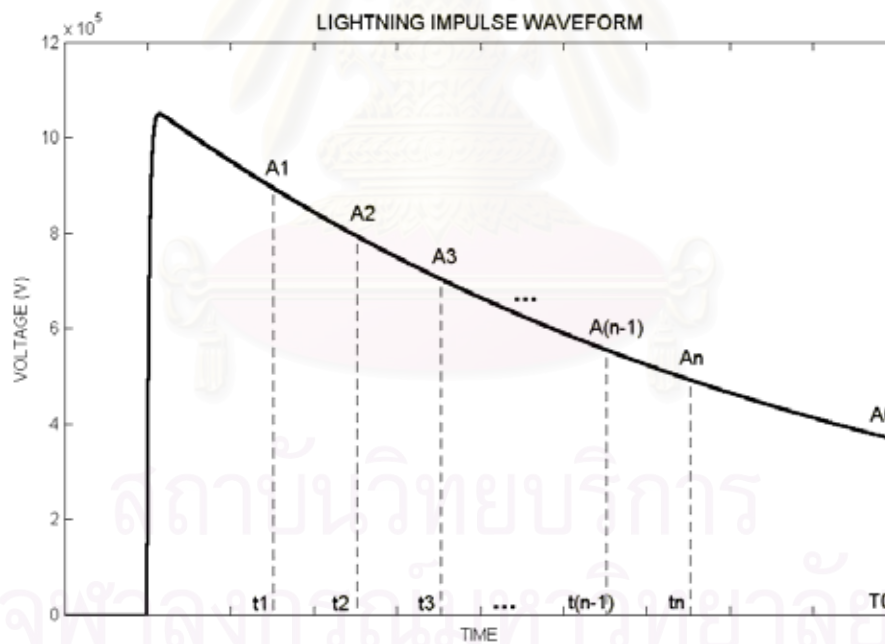
$$M(t) = A(e^{\alpha(t-t_0)} - e^{\beta(t-t_0)}) \quad (3.1)$$

(โดยที่ $\alpha < 0$ และ $\beta < 0$ เป็นค่าคงที่)

พิจารณาเฉพาะส่วนหลังคลื่น จะพบว่า ค่าของ $(-Ae^{\beta(t-t_0)}) \rightarrow 0$ นั่นคือ สมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม จะกลายเป็น

$$M(t) = Ae^{\alpha(t-t_0)} \quad (3.2)$$

เมื่อทำการเลือกจุดของส่วนหลังคลื่น n จุด ดังรูป



รูปที่ 3.5 แสดงการเลือกจุดของส่วนหลังคลื่นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มจำนวน n จุด

จากรูปที่ 1 พิจารณาเฉพาะช่วง จากจุด A_1 ถึง A_0 สามารถแทนได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์

$$M(t) = A_1 e^{\alpha_1(t-t_1)} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3 เมื่อแทนค่า $t = T_0$ จะได้ $M(t) = A_0$ เขียนได้เป็น

$$A_1 e^{\alpha_1(T_0 - t_1)} = A_0 \quad (3.4)$$

ทำการแก้สมการที่ 4 จะได้ ค่า

$$\alpha_1 = \frac{1}{(T_0 - t_1)} \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) \quad (3.5)$$

ในทำนองเดียวกัน พิจารณา จุด $A_2 \dots A_n$ จะพบว่า

$$\alpha_2 = \frac{1}{(T_0 - t_2)} \ln\left(\frac{A_0}{A_2}\right) \quad (3.6)$$

$$\alpha_n = \frac{1}{(T_0 - t_n)} \ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right) \quad (3.7)$$

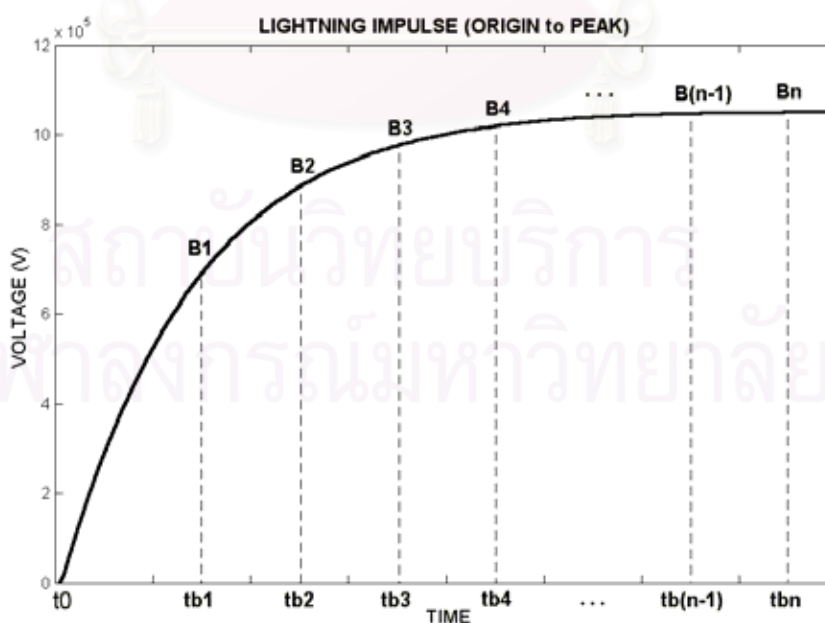
โดย
$$\alpha_{\text{initial}} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{abs}(\alpha_i) \quad (3.8)$$

และค่า A_{initial} หาได้จากสมการของจุด A_0 เมื่อเวลา $t = t_0$ (เมื่อ t_0 คือค่าเวลาเริ่มต้น)

ดังนั้น
$$A_{\text{initial}} = A_0 e^{\alpha_{\text{initial}}(t_0 - T_0)} \quad (3.9)$$

เมื่อได้ค่า A_{initial} และ α_{initial} สามารถนำไปหาค่า β_{initial} ได้ดังนี้

พิจารณาส່วนหน้าคลื่นจากจุด t_0 ถึง จุดสูงสุดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม ใช้สมการที่ (3.1) ทำการเลือกจุดหน้าคลื่นมาทั้งสิ้น n จุด ดังรูป



รูปที่ 3.6 แสดงการเลือกจุดของส่วนหน้าคลื่นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มจำนวน n จุด

จากสมการที่ (3.1) แทนค่าจากจุด B_1 จะได้

$$B_1 = A_{\text{initial}} (e^{\alpha_{\text{initial}} (t_{B1} - t_0)} - e^{\beta_1 (t_{B1} - t_0)}) \quad (3.10)$$

ทำการแก้สมการจะได้

$$\beta_1 = \frac{1}{(t_{B1} - t_0)} \ln(e^{\alpha_{\text{initial}} (t_{B1} - t_0)} - \frac{B_1}{A_{\text{initial}}}) \quad (3.11)$$

ในทำนองเดียวกัน พิจารณาจุด $B_2 \dots B_n$ จะได้

$$\beta_2 = \frac{1}{(t_{B2} - t_0)} \ln(e^{\alpha_{\text{initial}} (t_{B2} - t_0)} - \frac{B_2}{A_{\text{initial}}}) \quad (3.12)$$

$$\beta_n = \frac{1}{(t_{Bn} - t_0)} \ln(e^{\alpha_{\text{initial}} (t_{Bn} - t_0)} - \frac{B_n}{A_{\text{initial}}}) \quad (3.13)$$

$$\text{โดย} \quad \beta_{\text{initial}} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{abs}(\beta_i) \quad (3.14)$$

ดังนั้น จะได้ค่า A_{initial} , α_{initial} , β_{initial} และค่า t_0 เป็นค่าเริ่มต้นของการคำนวณ พารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยการประดิษฐ์รูปคลื่นเฉลี่ย ด้วยวิธีตัวกรองกาลมานหรือวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ เพื่อการเปรียบเทียบต่อไป

3.5 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

3.5.1 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

จากวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในทางทฤษฎีสามารถแทนได้ด้วยสมการ

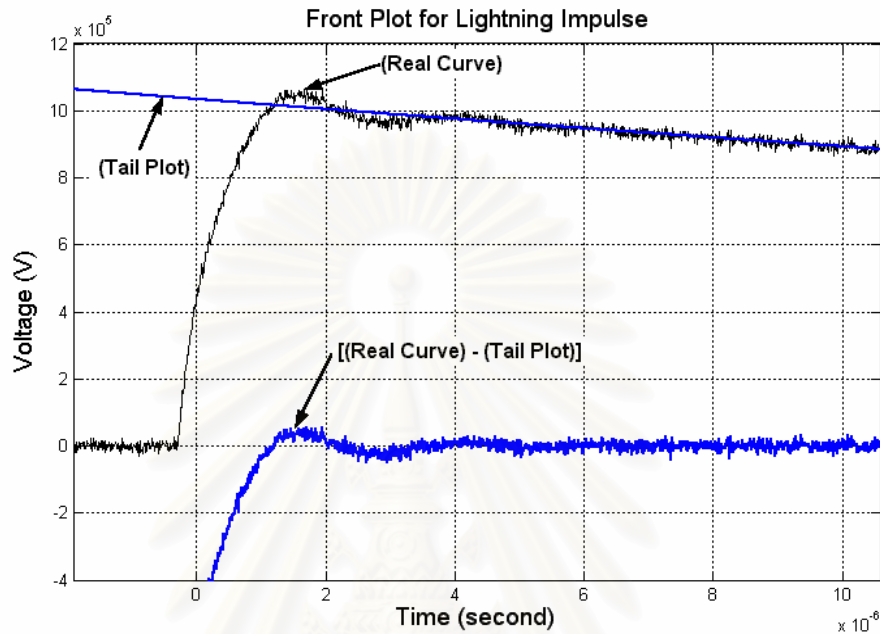
$$M(t) = A(e^{\alpha(t-t_0)} - e^{\beta(t-t_0)}) \quad (3.15)$$

จากสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในทางทฤษฎี สามารถดัดแปลงให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ในการคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม ได้เป็น

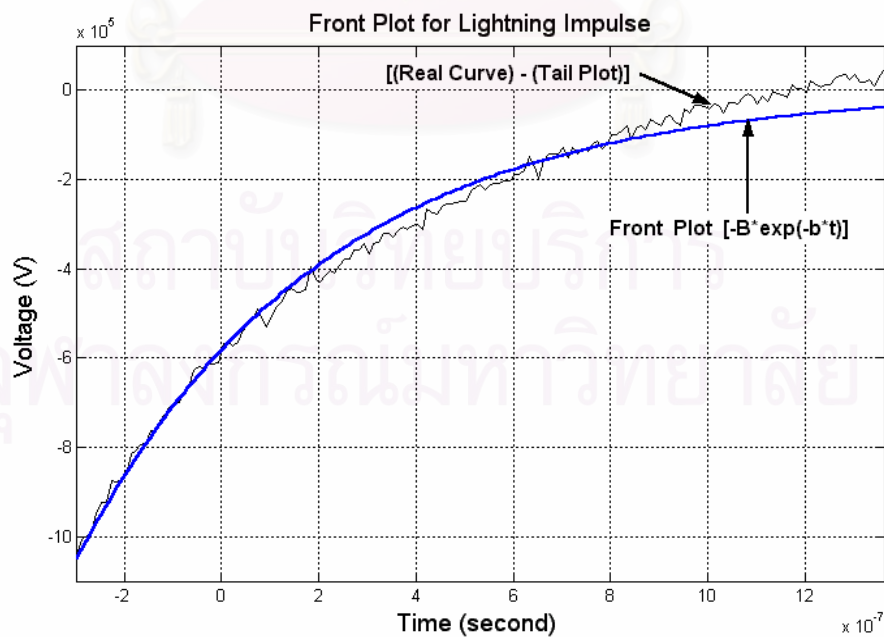
$$M(t) = Ae^{\alpha(t-t_{01})} - Be^{\beta(t-t_{02})} \quad (3.16)$$

ดังนั้น จะใช้สมการ (3.16) เป็นสมการสำหรับอัลกอริทึมวิธีตัวกรองกาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ โดยจะใช้การประดิษฐ์ฟังก์ชัน 2 ครั้ง คือประดิษฐ์ส่วนหลังคลื่นก่อน (ดังรูป 3.7) รูปคลื่นที่เกิดจากผลต่างรูปคลื่นจริงกับส่วนหลังคลื่นที่ประดิษฐ์ขึ้น จะนำไปประดิษฐ์

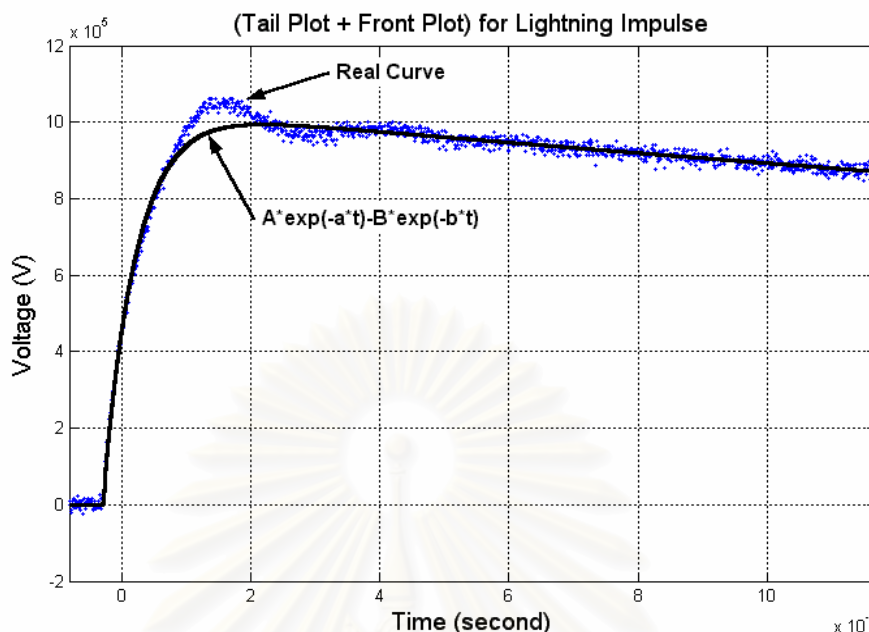
ส่วนหน้าคลื่น (ดังรูป 3.8) จากนั้นนำการประดิษฐ์รูปคลื่นทั้งสองส่วนมารวมกัน ได้เป็นรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มตามสมการแบบจำลอง (สมการ 3.16) ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 แสดงการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มส่วนหางคลื่น (รูปคลื่นกรณีที่ 8)



รูปที่ 3.8 แสดงการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มส่วนหน้าคลื่น (รูปคลื่นกรณีที่ 8)



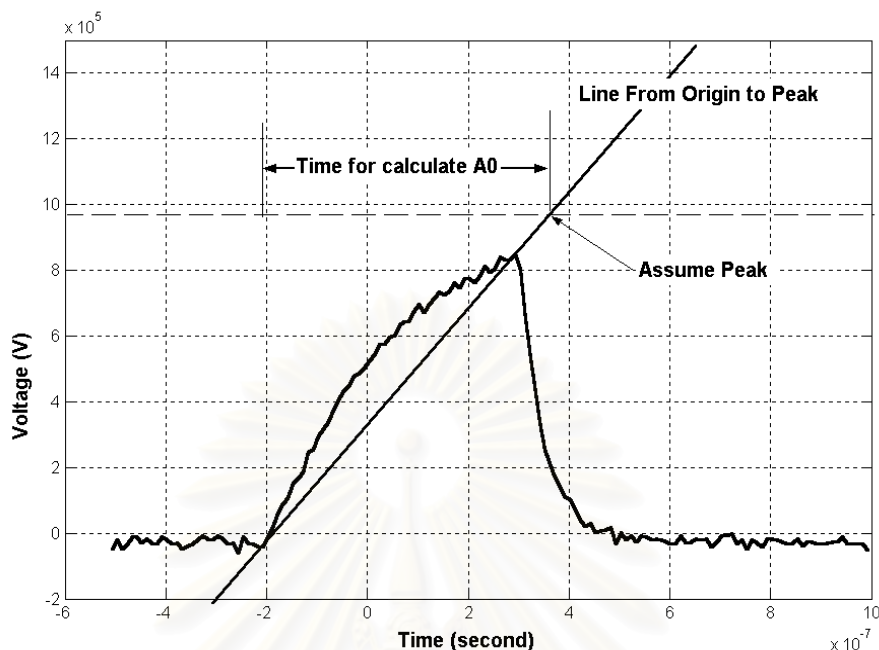
รูปที่ 3.9 แสดงผลรวมของการประดิษฐ์ส่วนหลังคลื่นและหน้าคลื่น (รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8)

3.5.2 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับจากรูปคลื่นอ้างอิงของโปรแกรม TDG มีเฉพาะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หน้าคลื่นเท่านั้น รูปคลื่นดังกล่าวจะไม่มีข้อมูลส่วนหลังคลื่นเลย ดังนั้นในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์จากรูปคลื่นเฉลี่ยจากสมการ 3.16 จะใช้ค่า a คงที่ให้มีค่าเท่ากับ $1/(68.5 \mu\text{s})$ ค่าเริ่มต้นของค่าคงที่อื่นใช้วิธีการหาค่าเริ่มต้นตามวิธีการในหัวข้อ 3.4 โดยสมมติรูปคลื่นสับตอนที่แรงดันประมาณ 70-90% ของแรงดันสูงสุด ดังรูปที่ 3.10 และใช้จุดเริ่มต้นการประดิษฐ์รูปคลื่น จากเวลาเริ่มต้น จนถึงจุดสูงสุดของข้อมูล

3.6 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงจากรูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรม TDG มีเพียง 2 กรณี ได้แก่รูปคลื่นอ้างอิงในกรณีที่ 5 และ 10 เป็นรูปคลื่นเดียวกัน ต่างกันเพียงรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5 ไม่มีสัญญาณรบกวนแต่รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 10 มีสัญญาณรบกวนมาก ซึ่งจะใช้วิธีการหาค่าเริ่มต้นตามวิธีการในหัวข้อ 3.4 และใช้สมการ 3.16 ในการคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ย



รูปที่ 3.10 แสดงการสมมติค่ายอดเพื่อหาค่าเริ่มต้นของรูปคลื่นฟ้าผ่าลับ (รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 7)

3.7 การวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้าง

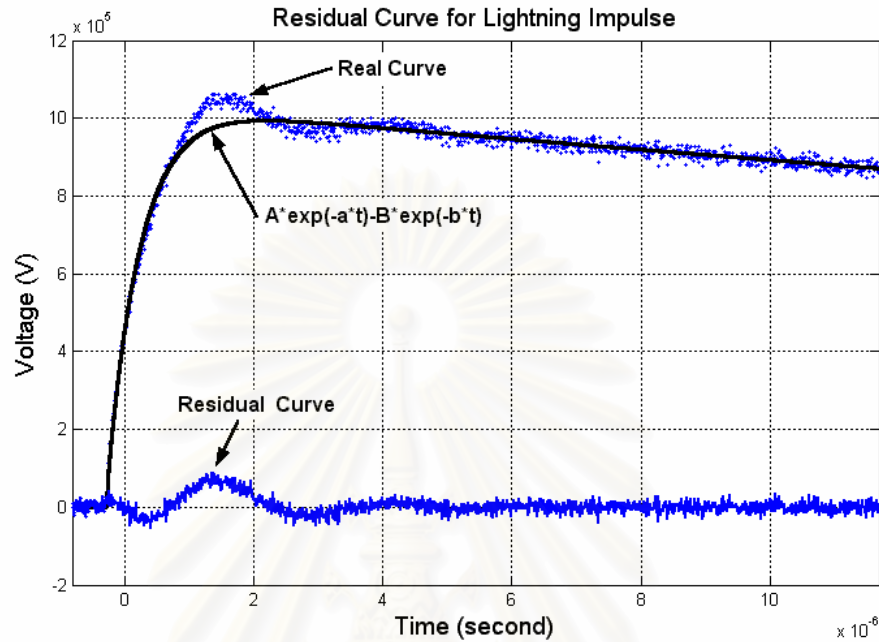
รูปคลื่นตกค้างคือรูปคลื่นผลต่างระหว่างรูปคลื่นจริงกับรูปคลื่นเฉลี่ยที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น ดังรูปที่ 3.11 การวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้างเพื่อหาแนวทางการคำนวณพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน รูปคลื่นตกค้างจะประกอบไปด้วย

- ก) สัญญาณรบกวน
- ข) การแกว่ง
- ค) ส่วนพุ่งเกิน

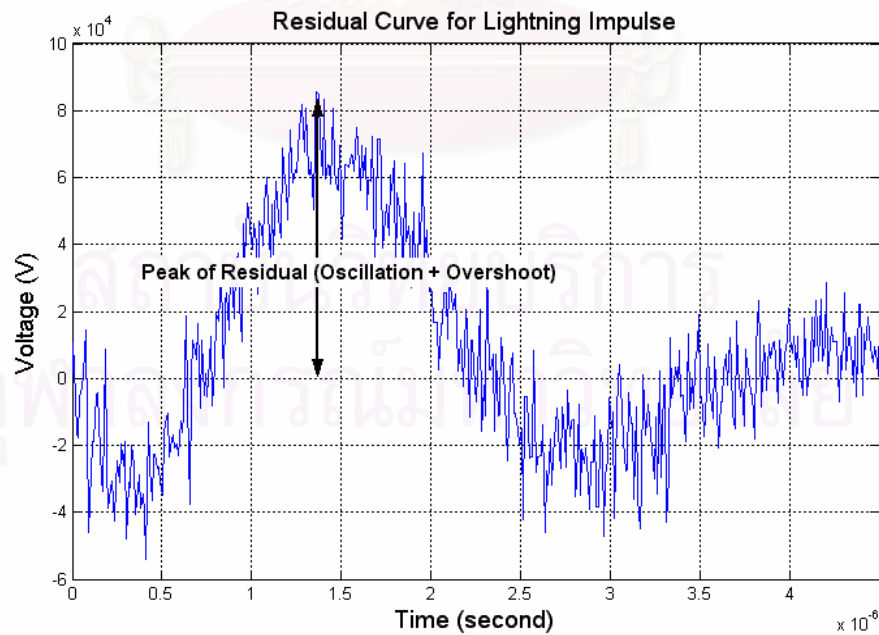
ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 จากบทที่ 2 เกณฑ์มาตรฐาน กำหนดส่วนประกอบของรูปคลื่นตกค้างไว้ดังนี้

- สัญญาณรบกวนไม่เกิน 1% ของค่ายอด
- กำหนดขนาดการแกว่งมากที่สุด ไม่เกิน 5% ของค่ายอด
- กำหนดขนาดส่วนพุ่งเกิน ไม่เกิน 5% ของค่ายอด (ดูรูปที่ 3.12)

หากรูปคลื่นตกค้างมีขนาดการแกว่ง และขนาดส่วนพุ่งเกินเกินกว่ามาตรฐานกำหนด ถือว่ารูปคลื่นนั้นไม่ใช่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน



รูปที่ 3.11 แสดงรูปคลื่นตกค้างจากผลต่างของรูปคลื่นจริงและรูปคลื่นเฉลี่ย (รูปคลื่นกรณีที่ 8)



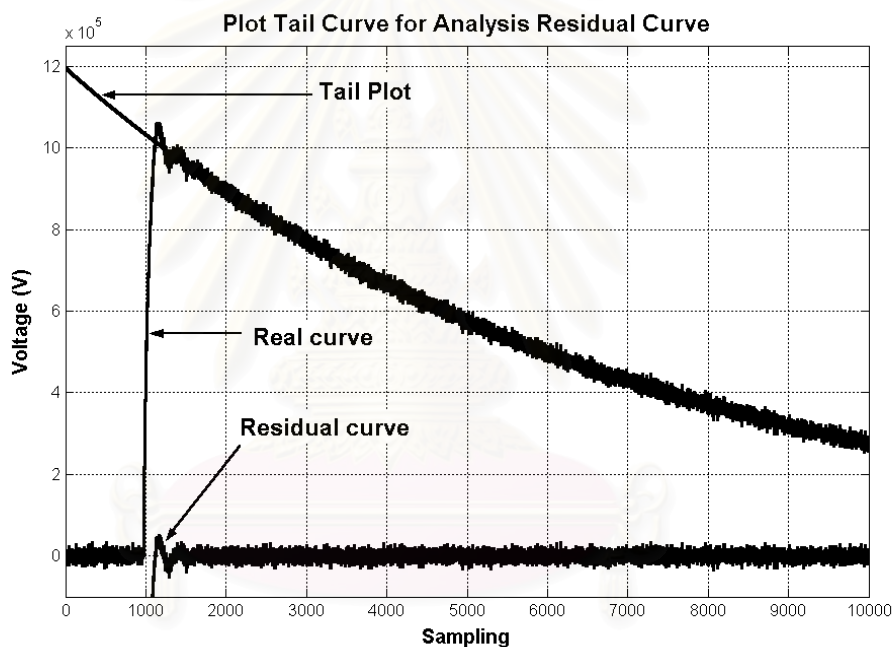
รูปที่ 3.12 แสดงค่ายอดของรูปคลื่นตกค้าง (รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8)

ส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 ได้แก่

- ความถี่การแกว่งมากกว่า 500 kHz
- เวลาที่เกิดส่วนพุ่งเกินน้อยกว่า 1 μ s

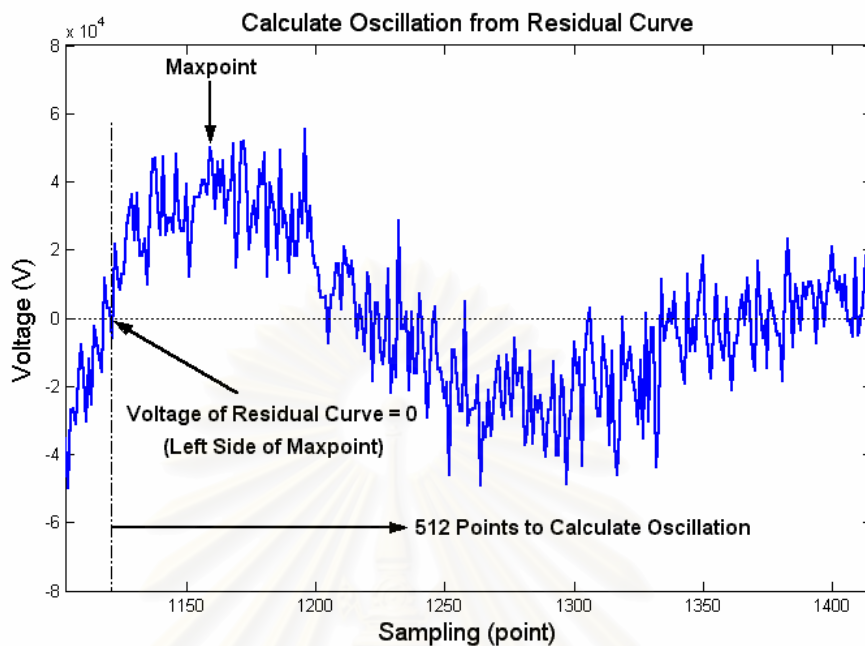
หากรูปคลื่นตกค้าง มีความถี่การแกว่งและเวลาเกิดส่วนพุ่งเกินเป็นไปตามมาตรฐาน จะคำนวณพารามิเตอร์จากรูปคลื่นเฉลี่ย นอกนั้น คำนวณพารามิเตอร์จากรูปคลื่นจริง

การวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้างเพื่อหาความถี่ของการแกว่ง ใช้วิธีวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่โดยใช้ฮอกรัมฟูเรียร์ เพื่อหาขนาดของความถี่ที่ใหญ่ที่สุด ถือเป็นความถี่ของการแกว่ง

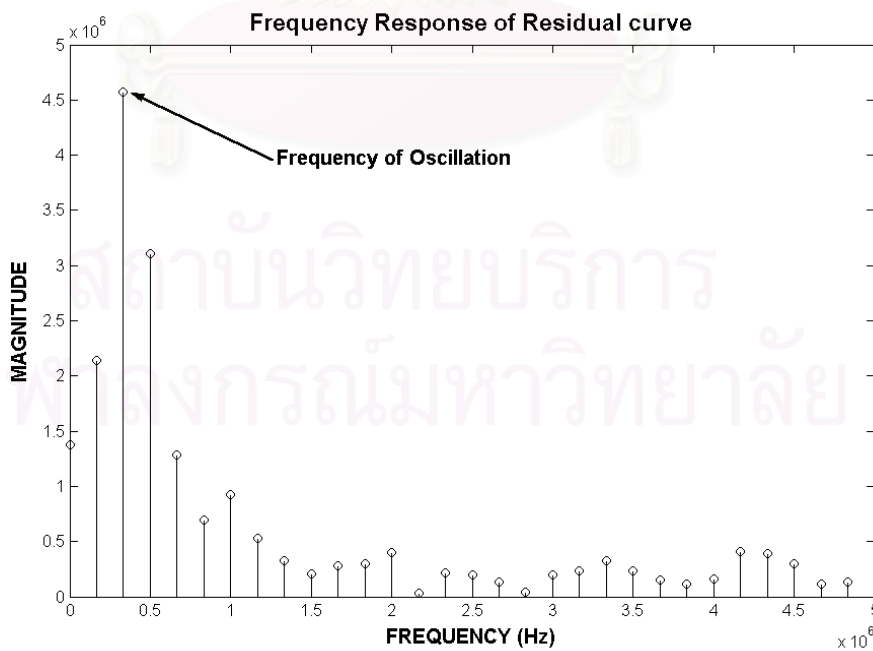


รูปที่ 3.13 แสดงการประดิษฐ์ส่วนหลังคลื่นเพื่อวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้าง (รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8)

การวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อหาความถี่ของการแกว่ง เริ่มต้นโดยการประดิษฐ์ส่วนหลังคลื่นของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม จะได้รูปคลื่นตกค้าง ซึ่งเป็นผลต่างของรูปคลื่นจริงและรูปคลื่นที่ประดิษฐ์ขึ้น ดังรูปที่ 3.13 จากนั้นจะเริ่มทำการวิเคราะห์จากจุดยอดไปทางด้านซ้ายมือของรูปคลื่นตกค้าง เพื่อหาจุดที่ค่าแรงดันของรูปคลื่นตกค้างเป็นศูนย์ การวิเคราะห์ความถี่ของการแกว่งจะเริ่มต้นจากจุดนี้ไปทางด้านขวามือ เป็นจำนวน 512 จุด ตามรูปที่ 3.14 นำไปคำนวณโดยใช้ FFT (Fast Furier Transform) เพื่อหาขนาดความถี่ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด จะถือเป็นความถี่ของการแกว่ง ดังรูปที่ 3.15 ในกรณีนี้ ได้ความถี่ของการแกว่ง ประมาณ 390 kHz

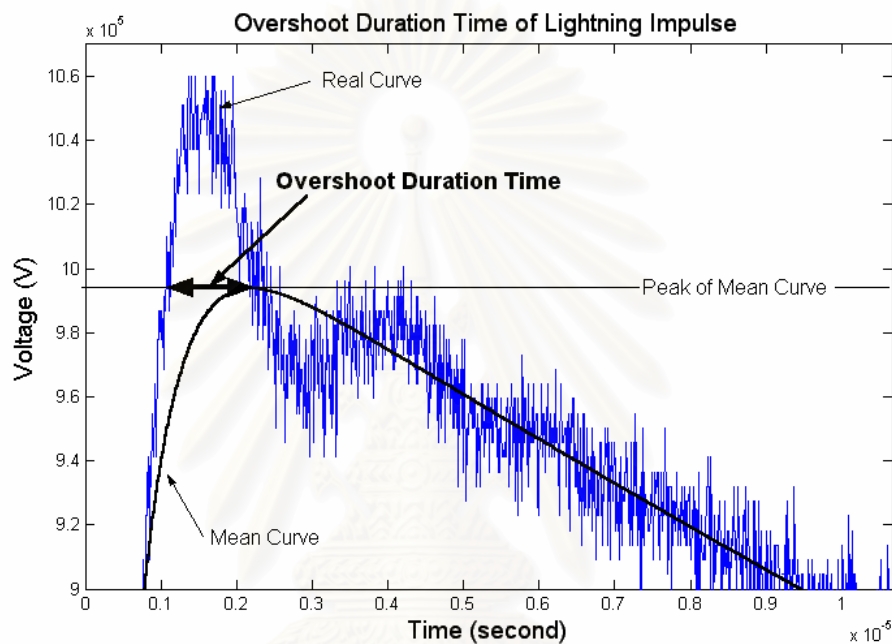


รูปที่ 3.14 แสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อคำนวณความถี่ของการแกว่ง (รูปคลื่นกรณีที่ 8)



รูปที่ 3.15 แสดงขนาดของความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8)

การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อคำนวณเวลาที่เกิดส่วนพุ่งเกิน F.Garnacho และคณะ [17] ได้นำเสนอวิธีการคำนวณเวลาที่เกิดส่วนพุ่งเกิน โดยเวลาที่เกิดส่วนพุ่งเกิน คือ ช่วงเวลาที่แรงดันของรูปคลื่นจริงมีค่าแรงดันมากกว่าค่ายอดของรูปคลื่นเฉลี่ย เมื่อรูปคลื่นเฉลี่ยของแรงดันอิมพัลส์ คือ รูปคลื่นที่ประดิษฐ์ขึ้นตามสมการ (3.16) ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงการคำนวณเวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน (รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8 บริเวณค่ายอด)

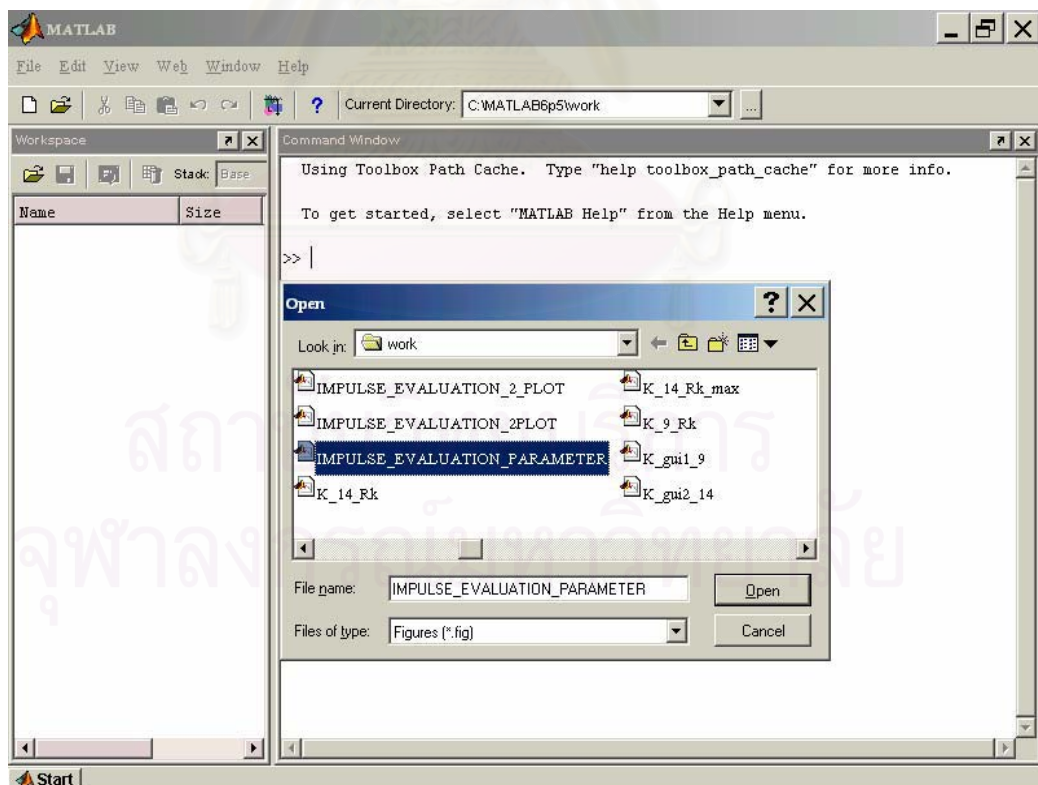
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

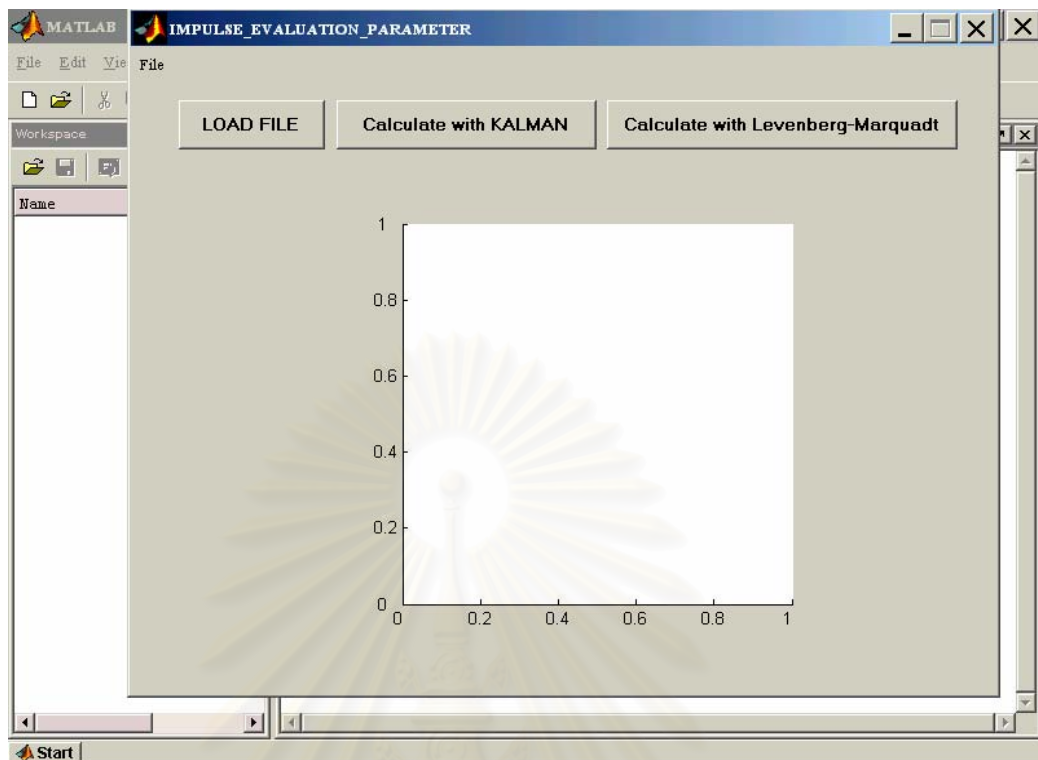
ผลการทดสอบโปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยวิธีตัวกรองคาถาและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ กับรูปคลื่นอ้างอิง TDG

4.1 โปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

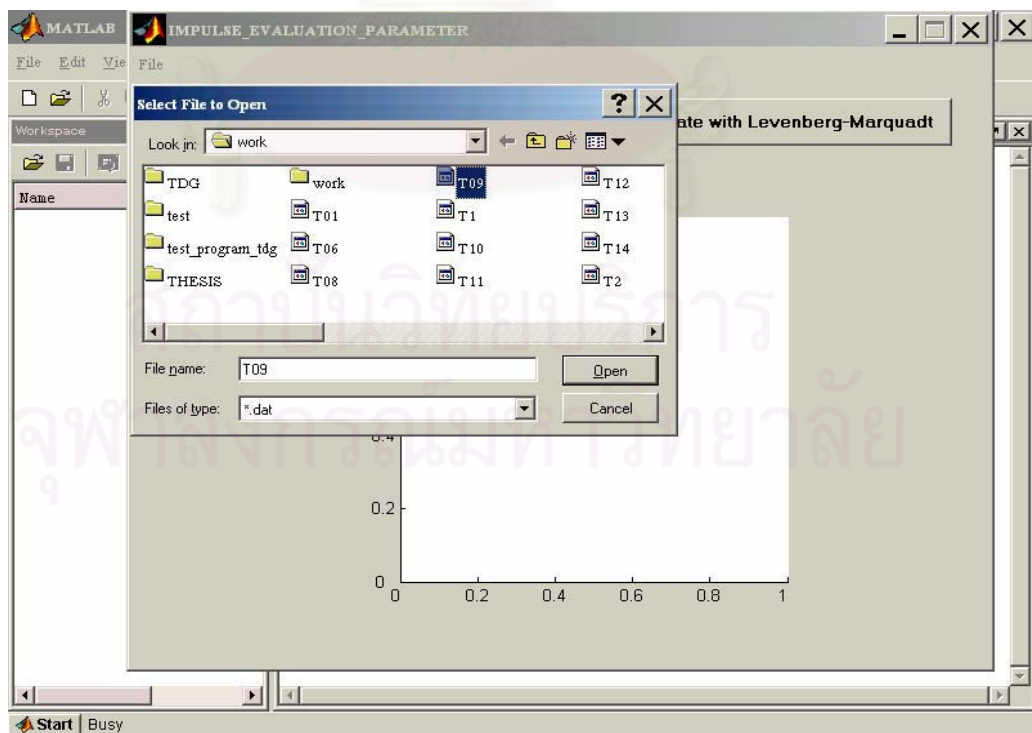
โปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในวิทยานิพนธ์ฉบับ มีชื่อว่า “IMPULSE EVALUATION PARAMETER” โดยโปรแกรมนี้ทำงานจากพื้นฐานโปรแกรมแมทแลป (Matlab) โดยเปิดไฟล์โปรแกรมที่ชื่อ “IMPULSE_EVALUATION_PARAMETER.fig” ดังรูปที่ 4.1 จะทำให้มีหน้าต่างของโปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขึ้นมาดังรูปที่ 4.2 การใช้งานโปรแกรม เริ่มต้นจากการเปิดไฟล์ข้อมูล โดยใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม “LOAD FILE” เพื่อที่จะเปิดข้อมูลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากไฟล์ที่มีนามสกุล “.dat” ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งไฟล์ดังกล่าว เป็นรูปคลื่นอ้างอิงมาจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2



รูปที่ 4.1 เริ่มต้นโปรแกรม โดยการเปิดไฟล์ “IMPULSE_EVALUATION_PARAMETER.fig”

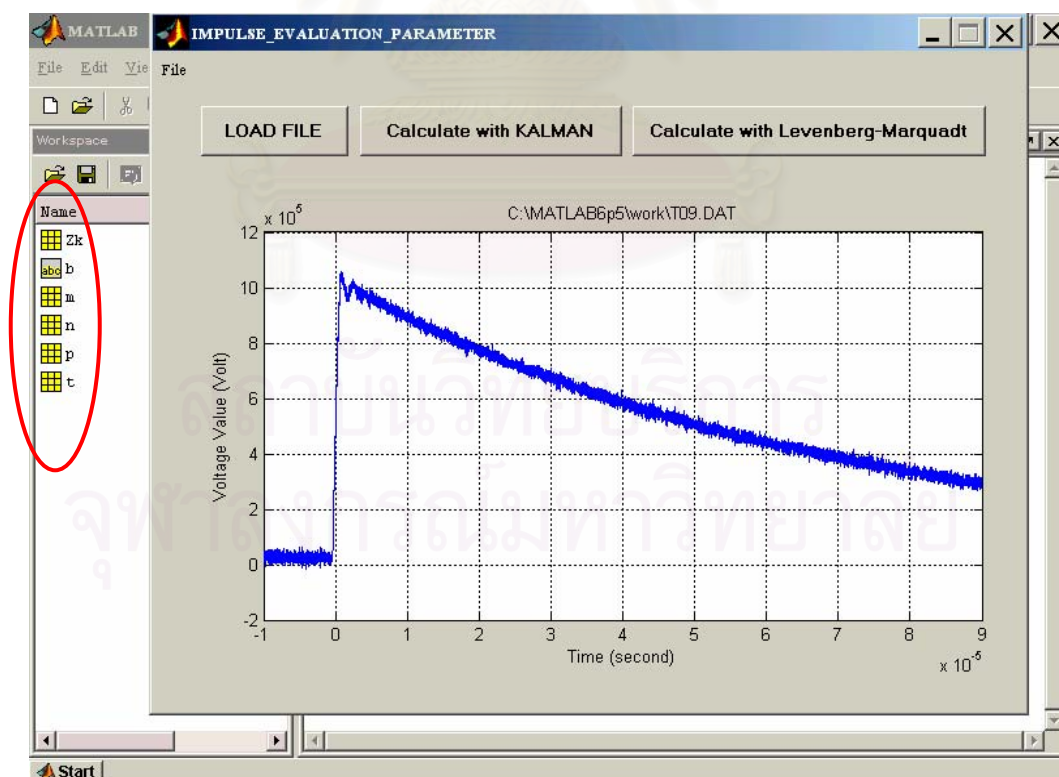


รูปที่ 4.2 หน้าต่างโปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

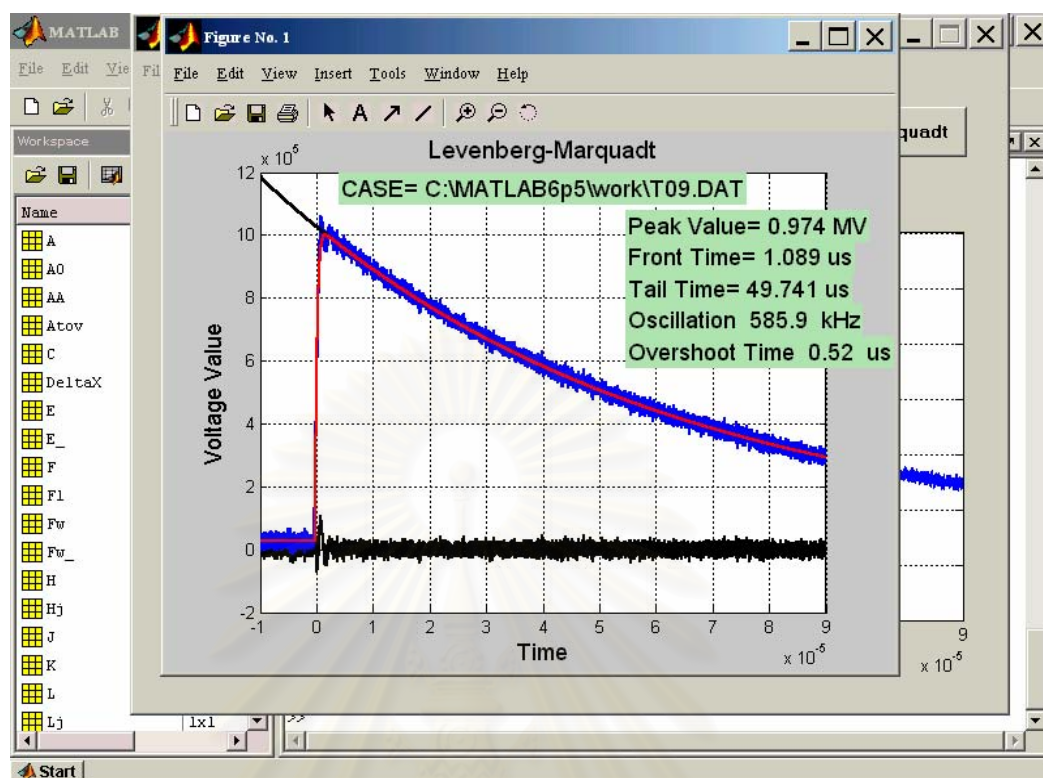


รูปที่ 4.3 เลือกเปิดไฟล์ข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์

เมื่อเปิดไฟล์แล้ว โปรแกรมจะทำการบันทึกข้อมูลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ลงในพื้นที่เวิร์กสเปซ (Work Space) ของโปรแกรมเมทแลป (วงรีสีแดงในรูปที่ 4.4) ในรูปข้อมูลทางคณิตศาสตร์เพื่อการคำนวณและทำการวาดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ลงในหน้าต่างโปรแกรม ดังรูปที่ 4.4 จากนั้น ผู้ใช้โปรแกรมสามารถที่จะเลือกวิธีการในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้ 2 วิธีการ คือวิธีตัวกรองกาลมาน และวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ด้วยการคลิกที่ปุ่ม “Calculate with KALMAN” หรือ “Calculate with Levenberg-Marquadt” เมื่อใช้เมาส์คลิกเลือกปุ่มวิธีการคำนวณแล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ และแสดงผลค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ (ได้แก่ ค่ายอด, เวลาหน้าคลื่น, เวลาถึงกึ่งค่ายอด, ความถี่ของการแกว่ง, เวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน) วิธีการในการคำนวณ และแสดงชื่อไฟล์ของรูปคลื่นข้อมูล เป็นรูปแบบหน้าต่างรูปภาพของโปรแกรมเมทแลป ดังรูปที่ 4.5 หน้าต่างรูปภาพนี้เป็นหน้าต่างอิสระ ผู้ใช้สามารถย่อหรือขยายหน้าต่างรูปภาพ หรือแก้ไขรูปภาพได้ตามความพอใจ โดยใช้เครื่องมือในหน้าต่างรูปภาพของโปรแกรมเมทแลป ซึ่งการแสดงผลเป็นหน้าต่างอิสระ มีข้อดี คือผู้ใช้สามารถที่จะคำนวณค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในรูปคลื่นเดียวกันได้ทั้งสองวิธีการ



รูปที่ 4.4 แสดงผลการอ่านไฟล์ข้อมูลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

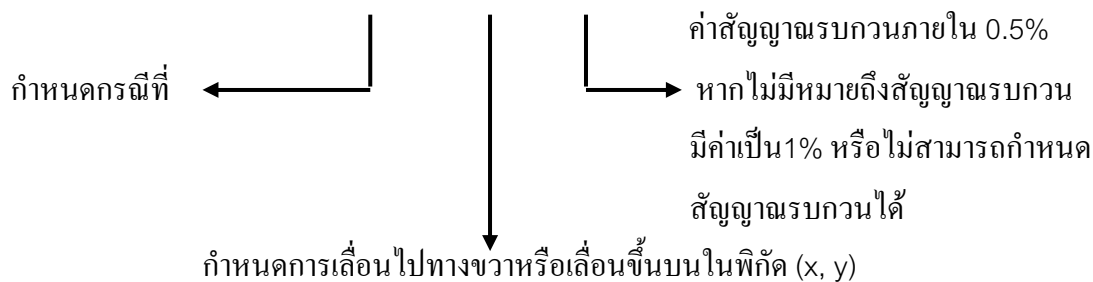


รูปที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

4.2 การทดสอบโปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์กับรูปคลื่นอ้างอิง TDG

การทดสอบโปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กับรูปคลื่นอ้างอิง จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG ทำได้โดยการสร้างรูปคลื่นอ้างอิงในแต่ละกรณีขึ้นมารณี่ละ 1 ชุด กำหนดจากการเลื่อนทางเวลา ทางแกน x หรือ แกน y จากพิกัด (0, 0) จนถึง (3, 3) จะทำให้ในแต่ละชุดจะมีจำนวนรูปคลื่น 16 รูปคลื่น (กรณีที่ไม่สามารถกำหนดสัญญาณรบกวนภายใน) และจำนวนรูปคลื่น 32 รูปคลื่น (กรณีที่สามารถกำหนดสัญญาณรบกวนภายใน จะกำหนดสัญญาณรบกวนภายในเป็น 1% และ 0.5% ตามลำดับ) รูปแบบของชื่อไฟล์ข้อมูลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ

TNN-XY-5.dat



ตัวอย่างเช่น T06-00-5.dat หมายถึงรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6 มีการเลื่อนทางพิกัด (0, 0) จากการตั้งค่าในโปรแกรม TDG และมีสัญญาณรบกวน 0.5% หรือ T06-00.dat หมายถึงรูปคลื่นเดียวกันแตกต่างกันที่สัญญาณรบกวนในกรณีนี้เป็น 1%

รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่สามารถกำหนดค่าสัญญาณรบกวนภายในได้ ได้แก่รูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6, 7, 8, 9 และ 10 รูปคลื่นกรณีเหล่านี้จะมีทั้งหมด 32 รูปคลื่น และรูปคลื่นกรณีอื่นอีก 9 กรณี ไม่สามารถกำหนดค่าสัญญาณรบกวนภายในได้ จะมีกรณีละ 16 รูปคลื่น รวมรูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG คือ $(32 \times 5) + (16 \times 9) = 304$ รูปคลื่น ซึ่งจะนำเสนอกรณีละ 16 รูปคลื่นรวมเป็น 224 รูปคลื่น

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมที่ใช้วิธีตัวกรองกาลมาน และวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ กับรูปคลื่นอ้างอิง ได้ผลดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.14 และภาพของผลลัพธ์ในแต่ละกรณี อยู่ในภาคผนวก โดยสัญลักษณ์ในตารางผลการทดสอบ มีความหมายดังนี้

Peak	คือ ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์
T_1	คือ เวลาหน้าคลื่นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า หรือเวลาถึงค่ายอดสำหรับแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง
T_2	คือ เวลาถึงถึงค่ายอดสำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม หรือเวลาถึงตอนสับสำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ
F_0	คือ ความถี่ของการแกว่ง (Frequency of Oscillation)
T_0	คือ เวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน (Duration Time of Overshoot)
ME	คือ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดหรือรูปคลื่นตกค้าง (Mean of Error)
RMSE	คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยความผิดพลาดหรือรูปคลื่นตกค้าง (RMS of Error)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม, รูปคลื่นเรียบ)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	1.04 – 1.06	0.81 – 0.87	57.5 – 62.5	–	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองกาลมาน							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T01-00	1.049	0.840	60.1	–	–	-4.3	6.3	1.049	0.839	60.2	–	–	119.4	6.9
T01-01	1.049	0.840	60.1	–	–	-0.8	6.3	1.050	0.845	60.2	–	–	246.0	7.8
T01-02	1.049	0.840	60.1	–	–	-4.3	6.3	1.049	0.840	60.2	–	–	73.7	6.4
T01-03	1.049	0.840	60.1	–	–	-3.2	6.3	1.050	0.841	60.2	–	–	221.9	7.6
T01-10	1.051	0.840	60.2	–	–	12.4	6.3	1.051	0.846	60.3	–	–	199.9	7.1
T01-11	1.051	0.839	60.2	–	–	11.6	6.3	1.051	0.843	60.3	–	–	180.9	6.9
T01-12	1.051	0.840	60.2	–	–	9.6	6.2	1.051	0.842	60.3	–	–	215.4	7.2
T01-13	1.051	0.840	60.2	–	–	4.3	6.3	1.051	0.838	60.3	–	–	201.1	6.7
T01-20	1.050	0.840	60.2	–	–	2.0	6.3	1.050	0.838	60.2	–	–	34.8	6.5
T01-21	1.050	0.840	60.2	–	–	-4.3	6.3	1.050	0.838	60.2	–	–	16.1	6.5
T01-22	1.050	0.840	60.2	–	–	-5.1	6.3	1.050	0.837	60.2	–	–	0.0	6.5
T01-23	1.050	0.840	60.2	–	–	3.3	6.2	1.050	0.837	60.2	–	–	29.1	6.5
T01-30	1.050	0.840	60.1	–	–	5.4	6.2	1.050	0.850	60.1	–	–	154.5	7.3
T01-31	1.050	0.841	60.1	–	–	0.2	6.2	1.050	0.850	60.1	–	–	215.4	8.2
T01-32	1.050	0.840	60.1	–	–	0.2	6.3	1.051	0.848	60.1	–	–	229.7	8.7
T01-33	1.050	0.840	60.1	–	–	-0.1	6.3	1.051	0.844	60.1	–	–	258.9	8.7

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 2 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าสับ, รูปคลื่นเรียบ)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	0.86 – 0.88	0.49 – 0.53	0.55 – 0.59	–	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองกาลมาน							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T02-00	0.865	0.498	0.577	–	–	-0.1	24.4	0.865	0.502	0.580	–	–	-57.3	37.8
T02-01	0.867	0.503	0.582	–	–	-0.1	4.4	0.867	0.508	0.576	–	–	-86.2	63.3
T02-02	0.869	0.508	0.586	–	–	0.0	25.3	0.869	0.511	0.579	–	–	-60.3	58.3
T02-03	0.869	0.511	0.589	–	–	0.1	52.1	0.869	0.511	0.581	–	–	-25.4	52.0
T02-10	0.867	0.499	0.578	–	–	-0.1	24.4	0.867	0.507	0.574	–	–	-111.9	69.9
T02-11	0.869	0.504	0.582	–	–	-0.1	4.8	0.869	0.509	0.577	–	–	-82.9	62.3
T02-12	0.869	0.507	0.586	–	–	0.1	30.9	0.869	0.509	0.579	–	–	-55.6	57.2
T02-13	0.871	0.513	0.590	–	–	0.2	56.4	0.871	0.512	0.581	–	–	-24.2	52.5
T02-20	0.867	0.500	0.578	–	–	-0.1	24.2	0.867	0.508	0.574	–	–	-112.9	70.1
T02-21	0.867	0.502	0.582	–	–	-0.1	5.7	0.867	0.503	0.583	–	–	-24.4	31.1
T02-22	0.869	0.507	0.586	–	–	0.1	28.9	0.869	0.510	0.579	–	–	-57.1	57.8
T02-23	0.871	0.513	0.590	–	–	0.2	55.4	0.871	0.512	0.581	–	–	-23.4	52.8
T02-30	0.865	0.498	0.578	–	–	-0.1	24.9	0.865	0.506	0.573	–	–	-114.8	69.9
T02-31	0.867	0.503	0.582	–	–	-0.1	5.4	0.867	0.504	0.583	–	–	-27.6	32.1
T02-32	0.869	0.508	0.586	–	–	0.1	30.3	0.869	0.510	0.578	–	–	-54.2	56.1
T02-33	0.871	0.514	0.590	–	–	0.2	54.7	0.871	0.513	0.590	–	–	-25.9	53.2

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 3 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าเต็ม, มีการแกว่ง, ไม่มีสัญญาณรบกวน)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	1.04 – 1.06	1.6 – 1.7	45 – 49	< 500	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองกาลมาน							ผลจากวิธีเลขวนเบิร์ต-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T03-00	1.048	1.662	47.5	390.6	–	–	–	1.048	1.662	46.8	390.6	–	–	–
T03-01	1.048	1.650	47.5	390.6	–	–	–	1.048	1.659	46.8	390.6	–	–	–
T03-02	1.048	1.654	47.5	390.6	–	–	–	1.048	1.659	46.8	390.6	–	–	–
T03-03	1.048	1.658	47.5	390.6	–	–	–	1.048	1.660	46.8	390.6	–	–	–
T03-10	1.050	1.650	47.6	390.6	–	–	–	1.050	1.665	46.9	390.6	–	–	–
T03-11	1.050	1.652	47.6	390.6	–	–	–	1.050	1.663	46.9	390.6	–	–	–
T03-12	1.050	1.654	47.6	390.6	–	–	–	1.050	1.663	46.9	390.6	–	–	–
T03-13	1.050	1.660	47.6	390.6	–	–	–	1.050	1.663	46.9	390.6	–	–	–
T03-20	1.050	1.652	47.5	390.6	–	–	–	1.050	1.668	46.8	390.6	–	–	–
T03-21	1.050	1.654	47.5	390.6	–	–	–	1.050	1.665	46.8	390.6	–	–	–
T03-22	1.050	1.660	47.4	390.6	–	–	–	1.050	1.667	46.8	390.6	–	–	–
T03-23	1.050	1.662	47.5	390.6	–	–	–	1.050	1.667	46.8	390.6	–	–	–
T03-30	1.050	1.663	47.3	390.6	–	–	–	1.050	1.672	46.8	390.6	–	–	–
T03-31	1.050	1.654	47.3	390.6	–	–	–	1.050	1.672	46.8	390.6	–	–	–
T03-32	1.050	1.656	47.3	390.6	–	–	–	1.050	1.671	46.8	390.6	–	–	–
T03-33	1.050	1.661	47.3	390.6	–	–	–	1.050	1.671	46.8	390.6	–	–	–

หมายเหตุ ผลทดสอบกรณีที่ 3 คำนวณพารามิเตอร์จากรูปคลื่นจริง จึงไม่มีการวิเคราะห์ ค่า ME และ RMSE

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 4 (รูปคลื่นแรงดันอินพุตสี่เหลี่ยม, มีการแกว่ง, ไม่มีสัญญาณรบกวน)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	0.96 – 0.99	1.0 – 1.1	48 – 52	> 500	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองกาลมาน							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T04-00	0.976	1.059	49.6	585.9	0.64	456.7	93.8	0.978	1.065	49.5	585.9	0.63	813.5	94.0
T04-01	0.976	1.055	49.6	585.9	0.64	464.7	94.3	0.978	1.062	49.5	585.9	0.63	801.1	94.4
T04-02	0.976	1.051	49.6	585.9	0.64	463.6	94.7	0.978	1.058	49.5	585.9	0.62	781.6	94.7
T04-03	0.976	1.047	49.6	585.9	0.64	464.9	95.0	0.978	1.054	49.5	585.9	0.62	793.7	95.1
T04-10	0.977	1.055	49.8	585.9	0.65	465.2	94.3	0.978	1.059	49.6	585.9	0.64	598.4	94.1
T04-11	0.977	1.052	49.8	585.9	0.65	466.3	94.8	0.978	1.056	49.6	585.9	0.64	582.8	94.6
T04-12	0.977	1.048	49.8	585.9	0.64	471.7	95.3	0.979	1.052	49.6	585.9	0.63	568.0	95.1
T04-13	0.977	1.046	49.7	585.9	0.64	474.8	95.6	0.979	1.050	49.6	585.9	0.64	561.2	95.4
T04-20	0.977	1.053	49.7	585.9	0.65	460.3	94.4	0.977	1.054	49.5	585.9	0.65	464.3	94.3
T04-21	0.977	1.049	49.7	585.9	0.65	462.2	94.8	0.977	1.050	49.5	585.9	0.65	447.2	94.7
T04-22	0.977	1.046	49.7	585.9	0.64	464.2	95.2	0.977	1.046	49.5	585.9	0.64	491.7	95.1
T04-23	0.977	1.044	49.7	585.9	0.64	464.1	95.7	0.977	1.044	49.5	585.9	0.64	459.3	95.6
T04-30	0.976	1.051	49.7	585.9	0.65	453.4	94.3	0.975	1.047	49.6	585.9	0.66	252.2	94.7
T04-31	0.977	1.047	49.7	585.9	0.64	456.5	94.8	0.975	1.044	49.6	585.9	0.65	208.3	95.2
T04-32	0.977	1.044	49.6	585.9	0.64	459.9	95.2	0.975	1.040	49.6	585.9	0.65	193.9	95.6
T04-33	0.977	1.040	49.6	585.9	0.64	462.6	95.7	0.975	1.037	49.6	585.9	0.65	190.2	96.1

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซิ่ง, รูปคลื่นเรียบ)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	0.94 – 0.96	240 – 260	2400 – 2600	–	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองกาลมาน							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T05-00	0.950	251.5	2494	–	–	-289.7	8.2	0.946	252.0	2509	–	–	432.3	14.5
T05-01	0.950	251.5	2494	–	–	-283.9	8.2	0.946	251.0	2507	–	–	398.9	13.1
T05-02	0.950	251.5	2494	–	–	-282.9	8.2	0.946	250.5	2506	–	–	368.8	12.3
T05-03	0.950	251.5	2494	–	–	-282.3	8.2	0.947	250.0	2505	–	–	353.3	11.9
T05-10	0.951	251.5	2501	–	–	-247.5	7.9	0.948	250.0	2511	–	–	338.6	11.3
T05-11	0.951	251.0	2501	–	–	-217.1	7.3	0.949	249.0	2510	–	–	302.2	11.0
T05-12	0.951	251.0	2501	–	–	-215.9	7.3	0.949	248.5	2510	–	–	299.4	11.0
T05-13	0.951	251.5	2501	–	–	-215.4	7.3	0.948	249.0	2510	–	–	316.2	10.9
T05-20	0.951	251.0	2499	–	–	-192.5	7.0	0.948	248.5	2507	–	–	270.7	10.5
T05-21	0.951	251.0	2499	–	–	-191.4	7.0	0.948	249.0	2507	–	–	265.0	10.5
T05-22	0.951	251.0	2499	–	–	-190.9	7.0	0.948	249.0	2507	–	–	269.1	10.4
T05-23	0.951	251.0	2499	–	–	-191.1	7.0	0.948	248.5	2507	–	–	274.0	10.4
T05-30	0.950	251.5	2497	–	–	-210.5	7.2	0.948	249.0	2505	–	–	275.4	10.0
T05-31	0.950	251.0	2497	–	–	-214.0	7.2	0.947	251.5	2507	–	–	340.3	11.5
T05-32	0.950	251.0	2496	–	–	-212.8	7.2	0.947	251.5	2507	–	–	315.5	11.0
T05-33	0.951	251.0	2496	–	–	-212.6	7.2	0.947	251.5	2507	–	–	329.1	11.1

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม, ไม่มีการแกว่ง, มีสัญญาณรบกวน)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	1.04 – 1.06	0.81 – 0.87	57.5 – 62.5	–	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองกาลมาน							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T06-00	1.049	0.840	60.0	–	–	92.0	117.9	1.048	0.836	60.2	–	–	-328.6	118.0
T06-01-5	1.049	0.844	60.1	–	–	-151.5	58.4	1.049	0.845	59.3	–	–	212.1	58.4
T06-02	1.050	0.837	60.3	–	–	32.5	116.6	1.050	0.835	58.7	–	–	-640.8	116.9
T06-03-5	1.050	0.853	60.2	–	–	-184.2	59.5	1.049	0.856	59.6	–	–	-202.1	59.6
T06-10	1.049	0.835	60.1	–	–	-137.6	117.9	1.049	0.838	60.0	–	–	46.7	117.8
T06-11-5	1.049	0.844	60.1	–	–	-144.6	58.5	1.050	0.847	59.2	–	–	142.4	58.6
T06-12	1.050	0.837	60.3	–	–	42.5	116.5	1.051	0.839	58.6	–	–	-420.3	116.5
T06-13-5	1.050	0.853	60.2	–	–	-203.5	59.7	1.048	0.852	59.8	–	–	-227.2	60.3
T06-20	1.049	0.835	60.1	–	–	-143.1	117.9	1.049	0.838	60.0	–	–	47.5	117.9
T06-21-5	1.049	0.844	60.1	–	–	-118.1	58.4	1.051	0.850	59.3	–	–	17.9	58.8
T06-22	1.050	0.837	60.3	–	–	48.6	116.5	1.051	0.839	58.5	–	–	-457.8	116.6
T06-23-5	1.050	0.853	60.2	–	–	-218.8	59.8	1.049	0.853	59.8	–	–	-741.4	60.6
T06-30	1.049	0.835	60.1	–	–	-158.2	118.0	1.050	0.838	60.0	–	–	66.8	117.9
T06-31-5	1.049	0.844	60.1	–	–	-132.4	58.5	1.051	0.850	59.3	–	–	-8.7	58.8
T06-32	1.050	0.837	60.3	–	–	35.6	116.6	1.050	0.837	58.7	–	–	-716.4	116.9
T06-33-5	1.050	0.853	60.2	–	–	-177.2	59.8	1.048	0.851	59.8	–	–	-707.5	60.5

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 7 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าสลับ, มีสัญญาณรบกวน)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	0.86 – 0.88	0.49 – 0.53	0.55 – 0.59	–	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองกาลมาน							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T07-00	0.865	0.508	0.581	–	–	401.7	339.8	0.865	0.498	0.568	–	–	385.8	324.2
T07-01-5	0.866	0.499	0.580	–	–	-216.3	153.5	0.866	0.504	0.575	–	–	-362.4	174.3
T07-02	0.873	0.514	0.589	–	–	780.6	306.9	0.873	0.511	0.580	–	–	725.6	302.9
T07-03-5	0.870	0.508	0.588	–	–	-177.0	179.6	0.870	0.529	0.586	–	–	-550.8	237.6
T07-10	0.866	0.508	0.581	–	–	387.8	339.2	0.866	0.499	0.568	–	–	373.8	323.1
T07-11-5	0.866	0.499	0.580	–	–	-261.6	154.5	0.866	0.504	0.575	–	–	-405.4	175.1
T07-12	0.872	0.513	0.589	–	–	832.7	308.5	0.872	0.509	0.579	–	–	776.4	303.3
T07-13-5	0.871	0.509	0.588	–	–	-176.8	179.4	0.871	0.521	0.580	–	–	-408.0	200.4
T07-20	0.866	0.510	0.582	–	–	444.7	338.8	0.866	0.500	0.569	–	–	433.8	322.7
T07-21-5	0.865	0.498	0.580	–	–	-225.6	155.1	0.865	0.503	0.575	–	–	-362.0	174.1
T07-22	0.872	0.513	0.589	–	–	845.3	308.3	0.872	0.510	0.580	–	–	789.5	304.0
T07-23-5	0.871	0.509	0.588	–	–	-133.8	181.4	0.871	0.529	0.586	–	–	-498.9	237.8
T07-30	0.865	0.507	0.581	–	–	470.9	339.4	0.865	0.498	0.568	–	–	456.1	323.4
T07-31-5	0.865	0.498	0.580	–	–	-212.4	154.0	0.865	0.503	0.575	–	–	-349.1	173.5
T07-32	0.873	0.514	0.589	–	–	752.9	306.7	0.873	0.510	0.580	–	–	696.0	302.8
T07-33-5	0.872	0.509	0.588	–	–	-177.5	181.9	0.872	0.529	0.586	–	–	-547.1	237.6

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่าเต็ม, มีการแกว่ง, มีสัญญาณรบกวน)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	1.04 – 1.06	1.6 – 1.7	45 – 49	< 500	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองคาถา							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T08-00	1.051	1.666	46.8	390.6	–	–	–	1.052	1.689	47.0	390.6	–	–	–
T08-01-5	1.049	1.642	46.9	390.6	–	–	–	1.049	1.678	46.8	390.6	–	–	–
T08-02	1.046	1.670	47.3	390.6	–	–	–	1.055	1.679	46.4	390.6	–	–	–
T08-03-5	1.052	1.656	46.6	390.6	–	–	–	1.052	1.688	46.6	390.6	–	–	–
T08-10	1.051	1.668	46.8	390.6	–	–	–	1.052	1.690	46.8	390.6	–	–	–
T08-11-5	1.048	1.641	47.0	390.6	–	–	–	1.049	1.677	46.8	390.6	–	–	–
T08-12	1.056	1.670	46.2	390.6	–	–	–	1.055	1.679	46.4	390.6	–	–	–
T08-13-5	1.052	1.655	46.9	390.6	–	–	–	1.052	1.686	46.6	390.6	–	–	–
T08-20	1.052	1.664	46.9	390.6	–	–	–	1.053	1.692	46.8	390.6	–	–	–
T08-21-5	1.048	1.639	46.7	390.6	–	–	–	1.049	1.675	46.8	390.6	–	–	–
T08-22	1.056	1.675	46.5	390.6	–	–	–	1.055	1.678	46.4	390.6	–	–	–
T08-23-5	1.052	1.656	46.6	390.6	–	–	–	1.052	1.689	46.6	390.6	–	–	–
T08-30	1.052	1.665	46.8	390.6	–	–	–	1.053	1.692	46.9	390.6	–	–	–
T08-31-5	1.049	1.642	46.9	390.6	–	–	–	1.050	1.678	46.7	390.6	–	–	–
T08-32	1.056	1.670	46.5	390.6	–	–	–	1.055	1.678	46.4	390.6	–	–	–
T08-33-5	1.052	1.655	46.6	390.6	–	–	–	1.052	1.688	46.6	390.6	–	–	–

หมายเหตุ ผลทดสอบกรณีที่ 8 คำนวณพารามิเตอร์จากรูปคลื่นจริง จึงไม่มีกรวิเคราะห์ ค่า ME และ RMSE

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 9 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม, มีการแกว่ง, มีสัญญาณรบกวน)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	0.96 – 0.99	1.0 – 1.1	48 – 52	> 500	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองกาลมาน							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMS E (V)
T09-00	0.977	1.043	49.6	585.9	0.57	746.4	148.4	0.977	1.044	49.5	585.9	0.57	1626.0	148.8
T09-01-5	0.976	1.068	49.7	585.9	0.62	409.2	109.4	0.976	1.067	49.6	585.9	0.62	1224.0	109.8
T09-02	0.978	1.027	49.8	585.9	0.57	497.8	149.3	0.980	1.033	49.7	585.9	0.57	-179.7	149.2
T09-03-5	0.977	1.027	49.6	585.9	0.65	445.6	111.6	0.978	1.031	49.6	585.9	0.64	318.7	110.3
T09-10	0.977	1.043	49.6	585.9	0.57	715.0	148.5	0.977	1.044	49.4	585.9	0.57	1683.0	149.0
T09-11-5	0.976	1.068	49.7	585.9	0.62	373.3	109.6	0.975	1.065	49.6	585.9	0.64	1332.0	110.1
T09-12	0.978	1.027	49.8	585.9	0.58	487.1	149.3	0.980	1.034	49.7	585.9	0.57	-203.9	149.3
T09-13-5	0.977	1.050	49.7	585.9	0.64	406.6	110.5	0.978	1.053	49.7	585.9	0.64	-140.2	110.5
T09-20	0.977	1.043	49.6	585.9	0.57	746.2	148.5	0.977	1.043	49.5	585.9	0.58	1508.0	148.8
T09-21-5	0.976	1.068	49.7	585.9	0.64	376.0	109.5	0.976	1.066	49.6	585.9	0.64	1224.0	109.9
T09-22	0.978	1.027	49.8	585.9	0.57	492.3	149.4	0.979	1.032	49.8	585.9	0.57	-158.6	149.4
T09-23-5	0.977	1.050	49.7	585.9	0.65	386.8	110.6	0.978	1.053	49.7	585.9	0.64	-86.5	110.6
T09-30	0.977	1.043	49.6	585.9	0.58	728.2	148.4	0.977	1.043	49.5	585.9	0.58	1649.0	148.8
T09-31-5	0.976	1.068	49.7	585.9	0.62	400.2	109.6	0.976	1.067	49.6	585.9	0.62	1172.0	109.9
T09-32	0.978	1.027	49.8	585.9	0.57	493.0	149.4	0.979	1.032	49.8	585.9	0.57	-161.4	149.3
T09-33-5	0.977	1.051	49.7	585.9	0.64	388.2	110.6	0.978	1.053	49.7	585.9	0.64	-136.0	110.6

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 10 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์, มีสัญญาณรบกวน)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	0.94 – 0.96	240 – 260	2400 – 2600	–	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองกาลมาน							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T10-00	0.949	247.0	2503	–	–	292.5	106.7	0.949	248.5	2499	–	–	341.3	106.4
T10-01-5	0.949	249.5	2505	–	–	206.8	53.2	0.949	250.0	2503	–	–	162.1	53.0
T10-02	0.948	248.0	2506	–	–	247.4	106.0	0.948	248.0	2506	–	–	437.4	106.1
T10-03-5	0.951	250.5	2503	–	–	16.7	53.5	0.949	250.0	2509	–	–	125.2	53.9
T10-10	0.949	247.0	2503	–	–	299.2	106.7	0.949	248.5	2500	–	–	339.4	106.4
T10-11-5	0.949	249.5	2506	–	–	213.5	53.1	0.950	250.0	2504	–	–	169.6	52.9
T10-12	0.948	248.5	2506	–	–	246.4	106.0	0.948	248.0	2506	–	–	433.5	106.1
T10-13-5	0.950	251.0	2502	–	–	-9.1	53.6	0.949	250.5	2509	–	–	144.4	54.0
T10-20	0.949	247.0	2503	–	–	300.4	106.7	0.949	248.5	2500	–	–	329.5	106.4
T10-21-5	0.949	249.5	2505	–	–	200.0	53.0	0.949	250.0	2504	–	–	148.3	52.9
T10-22	0.948	248.0	2506	–	–	230.6	105.8	0.948	248.0	2506	–	–	420.6	106.0
T10-23-5	0.951	250.5	2502	–	–	4.9	53.5	0.949	249.5	2508	–	–	131.9	53.9
T10-30	0.949	247.0	2503	–	–	303.4	106.8	0.949	249.0	2500	–	–	317.7	106.5
T10-31-5	0.949	249.5	2506	–	–	214.4	53.3	0.949	250.0	2504	–	–	151.5	53.1
T10-32	0.949	247.0	2504	–	–	240.4	106.1	0.948	248.0	2506	–	–	418.4	106.1
T10-33-5	0.951	250.5	2502	–	–	6.8	53.7	0.949	250.0	2508	–	–	128.7	54.0

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าเต็มซึ่งได้จากการทดลอง)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	0.94 – 0.96	1.07 – 1.19	82 – 91	–	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองคาบมาน							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T11-00	0.957	1.146	86.7	–	1.35	–	–	0.957	1.145	86.7	–	1.05	–	–
T11-01	0.959	1.151	86.4	–	1.35	–	–	0.959	1.149	86.4	–	1.05	–	–
T11-02	0.959	1.152	86.4	–	1.35	–	–	0.959	1.151	86.4	–	1.23	–	–
T11-03	0.958	1.147	86.6	–	1.34	–	–	0.958	1.146	86.6	–	1.05	–	–
T11-10	0.960	1.151	86.8	–	1.35	–	–	0.960	1.150	86.7	–	1.34	–	–
T11-11	0.959	1.145	86.8	–	1.35	–	–	0.959	1.143	86.8	–	1.35	–	–
T11-12	0.959	1.146	86.8	–	1.34	–	–	0.959	1.145	86.8	–	1.34	–	–
T11-13	0.960	1.149	86.8	–	1.35	–	–	0.960	1.148	86.7	–	1.34	–	–
T11-20	0.959	1.152	86.7	–	1.23	–	–	0.959	1.151	86.6	–	1.23	–	–
T11-21	0.959	1.146	86.7	–	1.23	–	–	0.959	1.145	86.6	–	1.23	–	–
T11-22	0.960	1.150	86.6	–	1.23	–	–	0.960	1.148	86.6	–	1.23	–	–
T11-23	0.959	1.149	86.7	–	1.23	–	–	0.959	1.148	86.7	–	1.23	–	–
T11-30	0.960	1.156	86.5	–	1.23	–	–	0.960	1.155	86.5	–	1.23	–	–
T11-31	0.959	1.150	86.6	–	1.23	–	–	0.959	1.148	86.5	–	1.23	–	–
T11-32	0.959	1.150	86.6	–	1.23	–	–	0.959	1.149	86.5	–	1.22	–	–
T11-33	0.959	1.153	86.5	–	1.23	–	–	0.959	1.152	86.5	–	1.22	–	–

หมายเหตุ ผลทดสอบกรณีที่ 11 คำนวณพารามิเตอร์จากรูปคลื่นจริง จึงไม่มีการวิเคราะห์ ค่า ME และ RMSE

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 12 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านซึ่งได้จากการทดลอง)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	0.84 – 0.87	0.48 – 0.54	0.51 – 0.56	–	–

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองกาลมาน							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T12-00	0.854	0.513	0.538	–	–	310.3	193.6	0.854	0.496	0.526	–	–	576.9	212.0
T12-01	0.852	0.513	0.542	–	–	283.4	187.7	0.852	0.499	0.532	–	–	501.3	201.6
T12-02	0.852	0.513	0.534	–	–	297.8	187.4	0.852	0.498	0.523	–	–	580.8	214.1
T12-03	0.854	0.513	0.536	–	–	295.6	190.7	0.854	0.498	0.525	–	–	539.8	206.4
T12-10	0.856	0.512	0.538	–	–	317.4	189.6	0.856	0.497	0.527	–	–	573.7	209.3
T12-11	0.852	0.512	0.532	–	–	304.3	190.2	0.852	0.498	0.522	–	–	525.2	203.9
T12-12	0.854	0.514	0.535	–	–	304.8	188.5	0.854	0.499	0.524	–	–	542.5	204.3
T12-13	0.856	0.514	0.537	–	–	321.0	192.8	0.856	0.499	0.525	–	–	574.5	209.9
T12-20	0.856	0.514	0.539	–	–	321.6	195.3	0.856	0.498	0.527	–	–	589.2	213.8
T12-21	0.852	0.513	0.543	–	–	294.3	189.2	0.852	0.500	0.533	–	–	510.3	203.1
T12-22	0.852	0.513	0.535	–	–	305.6	189.3	0.852	0.498	0.524	–	–	539.8	204.7
T12-23	0.856	0.515	0.537	–	–	314.0	192.7	0.856	0.499	0.526	–	–	563.6	209.6
T12-30	0.856	0.514	0.539	–	–	323.0	194.5	0.856	0.856	0.526	–	–	592.4	213.4
T12-31	0.852	0.513	0.542	–	–	293.5	187.8	0.852	0.500	0.532	–	–	506.5	201.5
T12-32	0.852	0.513	0.535	–	–	306.4	189.2	0.852	0.498	0.524	–	–	538.9	204.5
T12-33	0.854	0.513	0.537	–	–	312.8	191.6	0.854	0.498	0.525	–	–	563.2	208.6

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าเต็มซึ่งได้จากการทดลอง)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)
	-1.08 – -1.06	3.40 – 3.76	56 – 62	–	> 1 us

ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองคาบมาน							ผลจากวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T13-00	-1.071	3.598	58.9	390.6	–	–	–	-1.071	3.497	58.8	390.6	–	–	–
T13-01	-1.071	3.603	58.9	390.6	–	–	–	-1.071	3.498	58.8	390.6	–	–	–
T13-02	-1.071	3.585	58.9	390.6	–	–	–	-1.071	3.492	58.8	390.6	–	–	–
T13-03	-1.071	3.590	58.9	390.6	–	–	–	-1.071	3.491	58.8	390.6	–	–	–
T13-10	-1.071	3.651	58.6	390.6	–	–	–	-1.071	3.501	58.5	390.6	–	–	–
T13-11	-1.071	3.603	58.6	390.6	–	–	–	-1.071	3.501	58.5	390.6	–	–	–
T13-12	-1.071	3.611	58.6	390.6	–	–	–	-1.071	3.500	58.5	390.6	–	–	–
T13-13	-1.071	3.615	58.6	390.6	–	–	–	-1.071	3.501	58.5	390.6	–	–	–
T13-20	-1.071	3.602	58.7	390.6	–	–	–	-1.071	3.501	58.6	390.6	–	–	–
T13-21	-1.071	3.604	58.7	390.6	–	–	–	-1.071	3.502	58.6	390.6	–	–	–
T13-22	-1.071	3.608	58.7	390.6	–	–	–	-1.071	3.497	58.6	390.6	–	–	–
T13-23	-1.071	3.643	58.7	390.6	–	–	–	-1.071	3.498	58.6	390.6	–	–	–
T13-30	-1.071	3.599	58.9	390.6	–	–	–	-1.071	3.498	58.7	390.6	–	–	–
T13-31	-1.071	3.601	58.9	390.6	–	–	–	-1.071	3.499	58.7	390.6	–	–	–
T13-32	-1.071	3.646	58.9	390.6	–	–	–	-1.071	3.497	58.7	390.6	–	–	–
T13-33	-1.071	3.593	58.9	390.6	–	–	–	-1.071	3.497	58.7	390.6	–	–	–

หมายเหตุ ผลทดสอบกรณีที่ 13 คำนวณพารามิเตอร์จากรูปคลื่นจริง จึงไม่มีการวิเคราะห์ ค่า ME และ RMSE

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14 (รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าเต็มซึ่งได้จากการทดลอง)

ค่าขอบเขตมาตรฐาน	Peak (MV)		T ₁ (μs)		T ₂ (μs)		F ₀ (kHz)		T ₀ (μs)					
	-0.97 – -0.95		1.85 – 2.05		43 – 47		–		< 1 us					
ชื่อไฟล์	ผลจากวิธีตัวกรองกาลมาน							ผลจากวิธีเลขวนเบียร์ก-มาร์ควอดท์						
	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)	Peak (MV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	F ₀ (kHz)	T ₀ (μs)	ME (V)	RMSE (V)
T14-00	-0.966	1.890	45.3	585.9	0.90	-704.3	96.8	-0.967	1.889	45.2	585.9	0.90	-569.7	95.9
T14-01	-0.966	1.884	45.2	585.9	0.90	-705.4	96.7	-0.967	1.884	45.2	585.9	0.90	-557.1	95.9
T14-02	-0.966	1.889	45.2	585.9	0.89	-707.5	96.8	-0.967	1.887	45.2	585.9	0.89	-552.3	95.9
T14-03	-0.966	1.886	45.2	585.9	0.90	-701.0	96.8	-0.967	1.885	45.2	585.9	0.89	-550.4	95.9
T14-10	-0.964	1.887	45.1	585.9	0.90	-632.8	96.4	-0.966	1.886	45.0	585.9	0.89	-492.6	95.5
T14-11	-0.964	1.886	45.1	585.9	0.91	-632.0	96.4	-0.966	1.885	45.0	585.9	0.90	-492.5	95.6
T14-12	-0.965	1.883	45.1	585.9	0.91	-629.3	96.2	-0.966	1.882	45.0	585.9	0.88	-489.9	95.4
T14-13	-0.964	1.887	45.1	585.9	0.90	-633.1	96.4	-0.966	1.886	45.0	585.9	0.90	-495.6	95.6
T14-20	-0.965	1.888	45.2	585.9	0.91	-666.5	96.3	-0.966	1.886	45.1	585.9	0.89	-542.9	95.5
T14-21	-0.965	1.885	45.1	585.9	0.91	-670.4	96.3	-0.966	1.884	45.1	585.9	0.89	-538.9	95.5
T14-22	-0.965	1.884	45.1	585.9	0.91	-671.6	96.3	-0.966	1.883	45.1	585.9	0.89	-534.3	95.5
T14-23	-0.965	1.890	45.2	585.9	0.91	-670.3	96.5	-0.966	1.888	45.1	585.9	0.90	-542.4	95.7
T14-30	-0.965	1.888	45.2	585.9	0.93	-687.3	96.5	-0.967	1.887	45.1	585.9	0.89	-537.2	95.6
T14-31	-0.965	1.889	45.2	585.9	0.91	-684.1	96.5	-0.967	1.888	45.1	585.9	0.89	-548.8	95.6
T14-32	-0.965	1.893	45.2	585.9	0.91	-689.0	96.6	-0.967	1.892	45.1	585.9	0.89	-539.4	95.6
T14-33	-0.965	1.890	45.2	585.9	0.93	-687.7	96.4	-0.967	1.889	45.1	585.9	0.89	-537.0	95.5

เวลาที่ใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ 4.15 แสดงเวลาโดยเฉลี่ยในการคำนวณพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG เปรียบเทียบกันระหว่างอัลกอริทึมของวิธีตัวกรองคาถมาน และอัลกอริทึมของวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ มีส่วนประกอบหลักคือ CPU Pentium Celeron 1 GHz, RAM 119 Mbytes

ตารางที่ 4.15 แสดงเวลาเฉลี่ยในการคำนวณพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

รูปคลื่นอ้างอิง กรณีที่	เวลาที่ใช้โดยเฉลี่ย (วินาที)	
	วิธีตัวกรองคาถมาน	วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์
1	8	9
2	2	1
3	6	9
4	8	6
5	12	11
6	8	9
7	2	1
8	6	10
9	8	8
10	12	14
11	16	12
12	5	1
13	6	11
14	8	6

บทที่ 5

วิเคราะห์ สรุปผลและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบอัลกอริทึมของวิธีตัวกรองกาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ในการประเมินค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้มาจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG จำนวนทั้งสิ้น 14 กรณี

พบว่า วิธีตัวกรองกาลมานให้ผลค่าพารามิเตอร์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มากกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ และรูปคลื่นกรณีที่ 11 เป็นกรณีที่ใช้เวลาในการคำนวณมากที่สุดทั้ง 2 วิธีการ เนื่องจากเป็นกรณีที่มีขั้นตอนการคำนวณมากที่สุด ดังรูปที่ 5.1 แต่วิธีตัวกรองกาลมานใช้เวลาในการคำนวณ โดยเฉลี่ยส่วนใหญ่มากกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 5.1 แสดงกระบวนการในการคำนวณพารามิเตอร์รูปคลื่นกรณีที่ 11

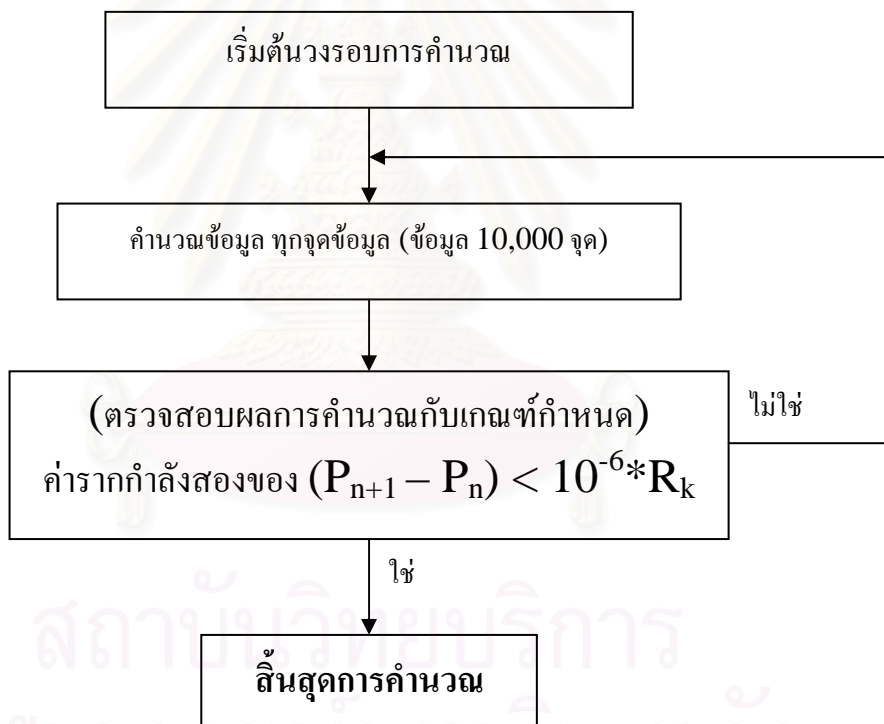
5.1 วิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์

จากการทดสอบโปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ พบว่า เวลาที่ใช้ในการคำนวณ ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1. จำนวนการวนซ้ำ (Iteraton) ในการคำนวณ

จำนวนการวนซ้ำในการคำนวณ มีผลโดยตรงกับเวลาการคำนวณ ซึ่งแต่ละวิธีการมีจำนวนการวนซ้ำแตกต่างกัน ดังนี้

1.1 วิธีตัวกรองกาลมาน มีการเปลี่ยนค่าตัวแปรทุกจุดของข้อมูล (ข้อมูล 10,000 จุด) ต่อ 1 รอบ เมื่อครบ 1 รอบ แล้วจึงตรวจสอบผลการคำนวณ กับเกณฑ์ที่กำหนด เกณฑ์ที่กำหนดในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ค่ารากกำลังสองของเมตริกซ์ P ในสองรอบติดกัน มีค่าน้อยกว่า $10^{-6} * R_k$ ดังรูปที่ 5.2

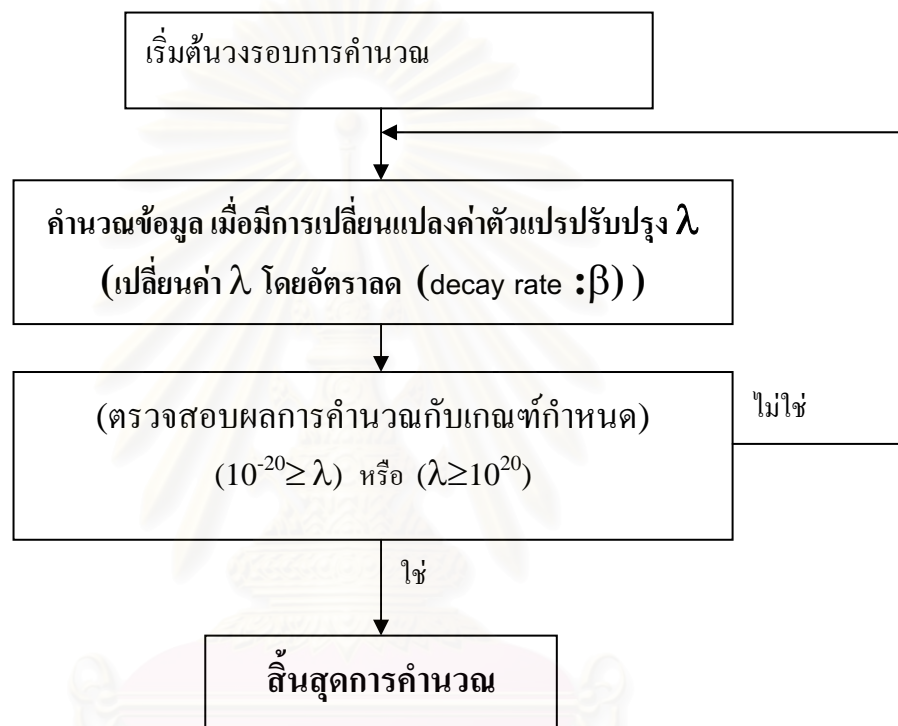


รูปที่ 5.2 แสดงกระบวนการคำนวณโดยอัลกอริทึมของวิธีตัวกรองกาลมาน

ดังนั้น วิธีตัวกรองกาลมาน มีจำนวนการวนซ้ำในการคำนวณ คือ

$$\text{จำนวนการวนซ้ำ} = (\text{จำนวนจุดข้อมูล} \times \text{จำนวนรอบใหญ่})$$

1.2 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ การเปลี่ยนค่าตัวแปรเนื่องจากการเปลี่ยนค่าตัวแปรปรับปรุง λ ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนจุดข้อมูล แต่จะมีความสัมพันธ์กับค่าเริ่มต้น กล่าวคือ หากค่าเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงคำตอบ จำนวนการวนซ้ำจะต่ำกว่ากรณีที่ค่าเริ่มต้นมีค่าไม่ใกล้เคียงคำตอบ มีการตรวจสอบกับเกณฑ์ที่กำหนดทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนค่าตัวแปรปรับปรุง เกณฑ์ที่กำหนดในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ค่าตัวแปรปรับปรุง λ อยู่นอกขอบเขต $[10^{-20}, 10^{-20}]$ ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงกระบวนการคำนวณโดยอัลกอริทึมของวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

“วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ จะใช้จำนวนการวนซ้ำน้อยกว่า วิธีตัวกรองกาลมาน”

2. ขนาดของตัวแปรที่สร้างขึ้น เนื่องจาก

ขนาดของตัวแปรที่สร้างขึ้นในการคำนวณ จะมีผลต่อเวลาการคำนวณ เนื่องจากโปรแกรมเมทแลป จะเขียนข้อมูลตัวแปรลงในเวิร์กสเปซ หากตัวแปรที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้น (ขนาดของตัวแปร มีผลให้ RAM ของคอมพิวเตอร์ในขณะนั้น ลดลง)

2.1 วิธีตัวกรองกาลมาน สร้างตัวแปรที่ใหญ่ที่สุดมีมิติ $n \times 1$ (สมมติข้อมูล 10,000 จุด ตัวแปรจะมีขนาด = 80 kbyte)

2.2 วิธีเลขเวเนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ สร้างตัวแปรที่ใหญ่ที่สุด คือ เมตริกซ์จาโคเบียน (เมตริกซ์ J) มีมิติ $n \times m$ เมื่อ m คือจำนวนตัวแปรสถานะ (สมมติข้อมูล 10,000 จุด ตัวแปรจะมีขนาด = $(m \times 80)$ kbyte) และที่สำคัญคือ เมตริกซ์จาโคเบียน มีการสร้างใหม่ทุกครั้งที่มีการลดลงของค่าผิดพลาดกำลังสอง ทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีเลขเวเนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ขึ้นอยู่กับจำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ กล่าวคือ หากจุดข้อมูลน้อย ($< 2,000$ จุด) วิธีการนี้ จะมีเวลาการคำนวณต่ำมาก (เนื่องจากเมตริกซ์จาโคเบียนขนาดเล็ก ไม่มีผลกับเวลาในการคำนวณมากนัก) สังเกตจากรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 2, 7 และ 12 ซึ่งเป็นรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่าสับ มีเวลาการคำนวณไม่ถึง 1 วินาที และหากจุดข้อมูลมาก ($> 2,000$ จุด) เวลาในการคำนวณจะมากกว่า วิธีตัวกรองกาลมาน ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงใช้จุดหลังคลื่นประมาณ 2,000 จุด ในการคำนวณทั้งสองวิธีการ มีผลทำให้เวลาในการคำนวณอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกับวิธีตัวกรองกาลมาน

“วิธีเลขเวเนเบิร์ก-มาร์ควอดท์จะมีขนาดตัวแปรใหญ่กว่า วิธีตัวกรองกาลมาน”

5.2 วิเคราะห์ผลคำตอบในแต่ละวิธีการ

จากผลการทดลองโปรแกรมกับรูปคลื่นอ้างอิง จากบทที่ 4 พบว่า ผลคำตอบของทั้งสองวิธีการถูกต้อง เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน ทุกกรณี ทุกรูปคลื่น ดังนั้นในการเปรียบเทียบวิธีการ จะใช้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (ME), ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยค่าผิดพลาด (RMSE), ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Average Deviation : AVD) และเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดจากค่ากลางของเกณฑ์มาตรฐานจากผลคำตอบในแต่ละกรณี โดยค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย มีสมการดังนี้

$$AVD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (5.1)$$

เมื่อ n คือ จำนวนข้อมูล (16 รูปคลื่น ในแต่ละกรณี)
 \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยข้อมูล

เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดจากค่ากลางของเกณฑ์มาตรฐาน มีสมการดังนี้

$$\% \text{error} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_{TDG}| \right) \left(\frac{100\%}{x_{TDG}} \right) \quad (5.2)$$

เมื่อ x_{TDG} คือ ค่ากลางของพารามิเตอร์จากเกณฑ์มาตรฐาน

ได้ค่าดังตารางที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ ME และ RMSE ในแต่ละกรณีของรูปคลื่นอ้างอิง

กรณี	วิธีตัวกรองกาลมาน		วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์	
	ค่าเฉลี่ย ME (V)	ค่าเฉลี่ย RMSE (V)	ค่าเฉลี่ย ME (V)	ค่าเฉลี่ย RMSE (V)
1	4.44	6.28	149.80	7.22
2	0.09	28.26	59.01	54.78
4	463.19	94.87	512.96	94.92
5	228.16	7.46	321.80	11.34
6	126.28	88.16	311.51	88.38
7	406.10	245.44	507.54	257.30
9	505.74	129.54	800.19	129.64
10	189.53	79.86	262.47	79.86
12	306.61	190.63	551.16	207.54
14	673.27	96.49	532.56	95.64
เฉลี่ย	290.34	96.70	400.90	102.66

จากตารางที่ 5.1 พบว่า ค่าเฉลี่ย ME และ ค่าเฉลี่ย RMSE เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีของวิธีตัวกรองกาลมาน เมื่อเปรียบเทียบเป็นค่าสัมบูรณ์ มีค่าต่ำกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ทั้งนี้เพราะว่าค่าขอบเขตของตัวแปรปรับปรุ้ง (λ) ที่กำหนดในวิทยานิพนธ์ [10^{20} , 10^{-20}] อาจไม่ครอบคลุมถึงจุดที่ ค่า RMSE ของผลคำตอบมีค่าต่ำสุด การขยายขอบเขตของตัวแปรปรับปรุ้งจะทำให้ผลคำตอบมีค่า RMSE ต่ำลง แต่ทั้งนี้ การขยายขอบเขตของตัวแปรปรับปรุ้งจะมีผลให้เวลาในการคำนวณพารามิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยผลคำตอบในแต่ละวิธีการ ตามกรณีของรูปคลื่นอ้างอิง

กรณีที่	วิธีตัวกรองกาลมาน			วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์		
	Peak AVD (10^{-2})	T ₁ AVD (10^{-2})	T ₂ AVD (10^{-2})	Peak AVD (10^{-2})	T ₁ AVD (10^{-2})	T ₂ AVD (10^{-2})
1	0.05	0.01	5.00	0.06	0.38	5.00
2	0.16	0.46	0.40	0.16	0.26	0.31
3	0.08	0.39	9.30	0.08	0.37	3.75
4	0.04	0.40	6.09	0.11	0.64	5.00
5	0.05	24.61	237.50	0.08	109.38	148.44
6	0.05	0.59	8.13	0.09	0.65	47.50
7	0.31	0.44	0.39	0.31	0.88	0.53
8	0.22	1.01	19.38	0.16	0.58	16.25
9	0.05	1.30	5.86	0.12	1.14	9.06
10	0.08	131.25	144.53	0.04	84.38	275.00
11	0.05	0.24	11.25	0.05	0.24	10.00
12	0.15	0.06	2.37	0.15	4.19	0.24
13	0.00	1.48	12.50	0.00	0.23	10.00
14	0.05	0.22	5.16	0.05	0.20	5.00
เฉลี่ย	0.10	11.60	33.27	0.10	14.54	38.29

จากตารางที่ 5.2 พบว่า ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเวลาหน้าคลื่นและเวลาถึงกึ่งค่ายอด วิธีตัวกรองกาลมาน มีผลคำตอบความเบี่ยงเบนในแต่ละกรณี ต่ำกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ถือเป็นข้อดีสำหรับค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยของค่ายอด ในแต่ละวิธีการมีความเบี่ยงเบนโดยรวมเท่ากัน และความเบี่ยงเฉลี่ยในทุกกรณี พบว่า วิธีตัวกรองกาลมานมีความเบี่ยงเบนของค่าพารามิเตอร์ ต่ำกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดจากค่ากลางขอบเขตมาตรฐาน ในแต่ละกรณี

กรณี ที่	วิธีตัวกรองกาลมาน			วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์		
	%error Peak (%)	%error T ₁ (%)	%error T ₂ (%)	%error Peak (%)	%error T ₁ (%)	%error T ₂ (%)
1	0.05	0.01	0.25	0.05	0.46	0.33
2	0.24	1.15	2.43	0.24	0.53	1.63
3	0.05	0.39	1.00	0.05	0.94	0.37
4	0.17	0.39	0.64	0.22	0.61	0.90
5	0.06	0.49	0.12	0.26	0.44	0.31
6	0.05	0.71	0.28	0.09	0.77	1.00
7	0.36	0.88	2.55	0.36	1.73	1.36
8	0.25	0.78	0.61	0.24	2.03	0.72
9	0.21	1.29	0.61	0.26	1.12	0.75
10	0.12	0.63	0.16	0.13	0.36	0.19
11	0.95	1.73	0.19	0.95	1.62	0.14
12	0.22	0.64	0.55	0.22	6.38	1.62
13	0.09	0.82	0.38	0.09	2.29	0.59
14	0.53	3.21	0.38	0.68	3.26	0.22
เฉลี่ย	0.24	0.91	0.73	0.28	1.65	0.72

จากตารางที่ 5.3 ผลการตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดจากค่ากลางขอบเขตมาตรฐาน พบว่า สำหรับค่ายอดและเวลาหน้าคลื่นเมื่อเทียบกับค่ากลางขอบเขตมาตรฐาน ผลจากวิธีตัวกรองกาลมานมีความถูกต้อง แม่นยำมากกว่า วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ แต่เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดจากค่ากลางขอบเขตมาตรฐานของเวลาถึงกึ่งค่ายอด ทั้งสองวิธีการ มีความถูกต้อง แม่นยำ เท่ากัน

5.3 สรุปผลวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยเทคโนโลยีวิธีการและสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากอดีตถึงปัจจุบัน พบว่าสมการแบบจำลองที่สามารถประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ดี มีพื้นฐานมาจากสมการเอกซ์โปเนนเชียลคู่ และวิธีการในอดีต กำหนดค่าเริ่มต้นจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ ($A=1.03*U_{\text{peak}}$, $\alpha = 1/(68.5 \mu\text{s})$, $\beta = 1/(0.405 \mu\text{s})$) เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ ซึ่งค่าเริ่มต้นดังกล่าวนี้ เมื่อนำมาทดสอบกับรูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG พบว่าค่าเริ่มต้นที่กำหนดไม่เหมาะสม เนื่องจากรูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG มีความหลากหลายของค่ายอด เวลาหน้าคลื่น และเวลาถึงถึงค่ายอด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอวิธีการหาค่าเริ่มต้นในการคำนวณค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ทั้งรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับและรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง ดังรายละเอียดในบทที่ 3 โดยใช้อัลกอริทึมของวิธีตัวกรองกาลมาน และวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ในการประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ พบว่าได้ผลดีมาก เนื่องจากผลทดสอบกับรูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG ทั้ง 2 วิธีการ ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตรงตามเกณฑ์มาตรฐานทุกกรณี ทุกรูปคลื่น

การประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ส่วนสำคัญที่ควรพิจารณานอกจากค่าเริ่มต้นของการคำนวณแล้ว จุดข้อมูลในการคำนวณก็มีส่วนสำคัญต่อผลคำตอบที่ได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การประดิษฐ์รูปคลื่นจะเริ่มต้นจากการประดิษฐ์ส่วนหางคลื่นก่อน โดยจุดที่ใช้ในการคำนวณ คือ จุดยอดของข้อมูล จนถึงจุดสุดท้ายของข้อมูล แม้ว่าบริเวณจุดยอดของข้อมูลรูปคลื่นอาจมีส่วนพุ่งเกิน หรือการแกว่งรวมอยู่ด้วยแต่มีจำนวนน้อย เมื่อเทียบกับจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมด จึงไม่มีผลต่อคำตอบของส่วนหางคลื่นที่ได้ การประดิษฐ์หางคลื่นก่อนมีข้อดีคือ สามารถตรวจสอบการแกว่งที่บริเวณยอดของรูปคลื่นได้ หากรูปคลื่นมีความถี่ต่ำกว่า 500 kHz ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ก็สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์จากรูปคลื่นจริงได้ทันที ในการคำนวณส่วนหน้าคลื่น จะใช้จุดเริ่มต้นการคำนวณจนถึงค่ายอดจริง จุดเริ่มต้นในการคำนวณที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มี 2 จุดด้วยกัน คือจุดเริ่มต้นจริง และจุดที่ค่าแรงดันมีค่าเป็น 30% ของค่ายอดจากข้อมูลรูปคลื่นจริง จุดเริ่มต้นที่ 30% จะใช้ในกรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่นชัน รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่นชันคือรูปคลื่นที่มีเวลาจากจุดเริ่มต้นจริงจนถึงค่ายอด มีเวลาดำกว่า $1.8 \mu\text{s}$ นอกจากนั้นการประดิษฐ์หน้าคลื่นใช้จุดเริ่มต้นจากจุดเริ่มต้นจริง โดยทั้งสองวิธีการที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้ค่าเริ่มต้นเหมือนกัน

วิธีตัวกรองกาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ เมื่อนำมาใช้เป็นอัลกอริทึมในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ พบว่าใช้เวลาในการคำนวณทั้งสองวิธีการใกล้เคียงกัน แต่วิธีตัวกรองกาลมานได้ค่าเฉลี่ยและค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้าง ต่ำกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ และวิธีตัวกรองกาลมานมีความถูกต้อง แม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากลางของขอบเขตมาตรฐานมากกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ เมื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของทั้งสองวิธีการในแต่ละกรณี พบว่า วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ใช้ได้ดีกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสาย ที่มีจำนวนจุดในการคำนวณน้อย วิธีตัวกรองกาลมานจะมีการลู่ออกที่ค่อนข้างช้า ในกรณีที่จำนวนจุดในการคำนวณน้อย ได้แก่ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสายหรือการประดิษฐ์หน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์

ดังนั้นการเลือกวิธีการที่จะนำมาใช้จะขึ้นอยู่กับจำนวนจุดข้อมูลเป็นสำคัญ กรณีที่จุดข้อมูลน้อย (<2,000 จุด) การใช้วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ให้ผลคำตอบและเวลาการคำนวณที่ดี และกรณีที่จุดข้อมูลมาก (>2,000) ควรใช้วิธีตัวกรองกาลมาน จะมีความเหมาะสมมากกว่า

รายการอ้างอิง

1. IEC 60060-1. High-voltage test techniques - Part 1. General definitions and test requirements 1989-11.
2. IEC 60060-2. High-voltage test techniques - Part 2. Measuring system 1996-11.
3. IEC 61083-2. Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests - Part2. Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms 1996-07.
4. Mathworks, Inc. Matlab version 6.5. Mathworks, Inc, 2002.
5. De Boor, C. A Practical Guide to Splines. Springer-Verlag 1978.
6. Boaventura, W. C. Modelling impulse voltage test waveforms using time-domain fitting based on Prony's method . International Symposium on High Voltage Engineering 2003.
- 7 . Wong, K. C. P.; et al. Digital Measurement of Lightning Impulse Parameters Using Curving Fitting Algorithm. International Symposium on High Voltage Engineering 467 (August 1999) : 193-196.
- 8 . Hackemack, K.; Werle, P.; Gockenbach, E.; and Borsi, H. A New Proposal for the Evaluation of Lightning Impulses. International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (June 2000) : 93-96.
- 9 . Hackemack, K.; and Gockenbach, E. Robust Evaluation Procedure for Lightning Impulses. International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (June 2003) : 518-521.
- 10 . Chen, T.; Han, D.; Tham, L. G.; and Francis, T. K. Au. Acceleration of Levenberg – Marquardt Training of Neural Networks with Variable Decay Rate. IEEE 2003 : 1873-1878.
- 11 . Brede, A. P.; Werle, P.; Gockenbach, E.; and 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) : 74-77.

- 12 . Perez, J.; Martinez, J. Kalman Filter Algorithm for Digitally Recorded Lightning Impulse Parameter Evaluation. IEEE Transactions on Power Delivery. 11, 4 (October 1996) : 1713-1719.
- 13 . Perez, J.; Martinez, J. Digitally Recorded Lightning Impulse with Overshoot Parameter Evaluation by Using Kalman Filtering Method. IEEE Transactions on Power Delivery 11, 4 (October 1996) : 1005-1014.
14. สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2547.
15. ศรณรงค์ สุวรรณชนารักษ์. การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อหาพารามิเตอร์ของแรงดันทดสอบอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
16. IEC 61083-1. Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests - Part1. Requirements for digital recorders 1994-11.
- 17 . Ganacho, F.; et al. Evaluation Procedures for Lightning Impulse Parameter in case of Waveforms with Oscillations and/or Overshoot. IEEE Transactions on Power Delivery 12, 2 (April 1997) : 640-649.



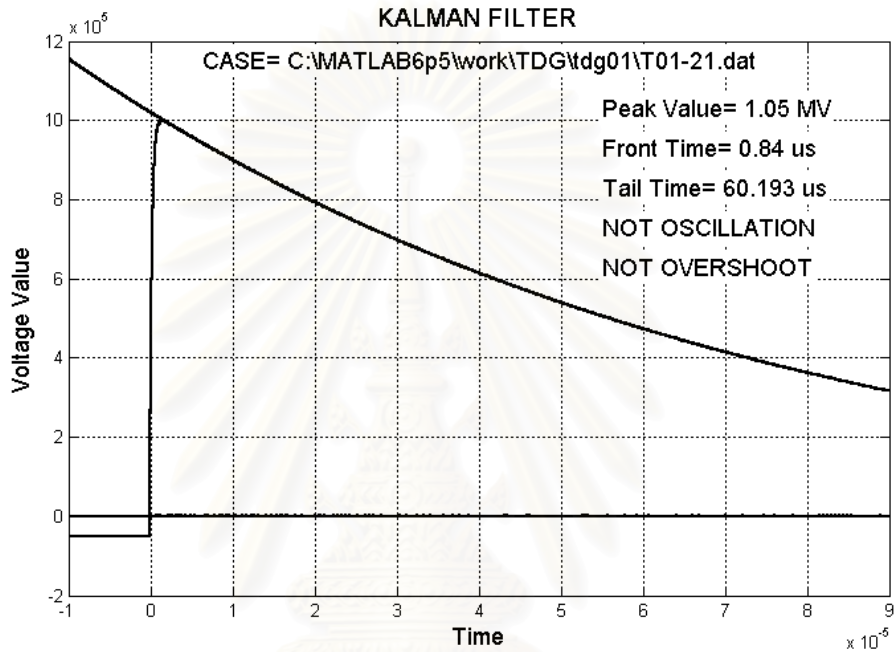
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

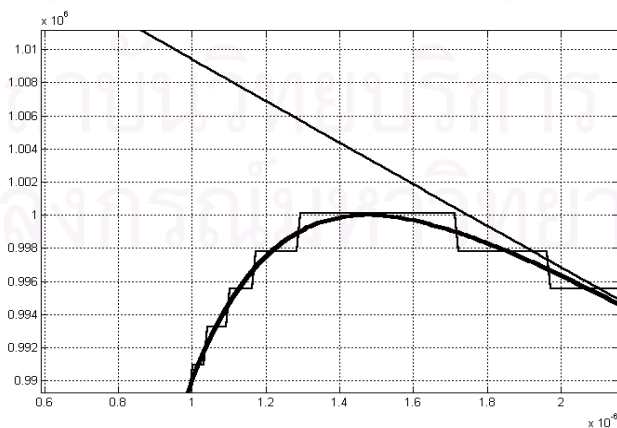
ภาคผนวก ก

รูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมคำนวณค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

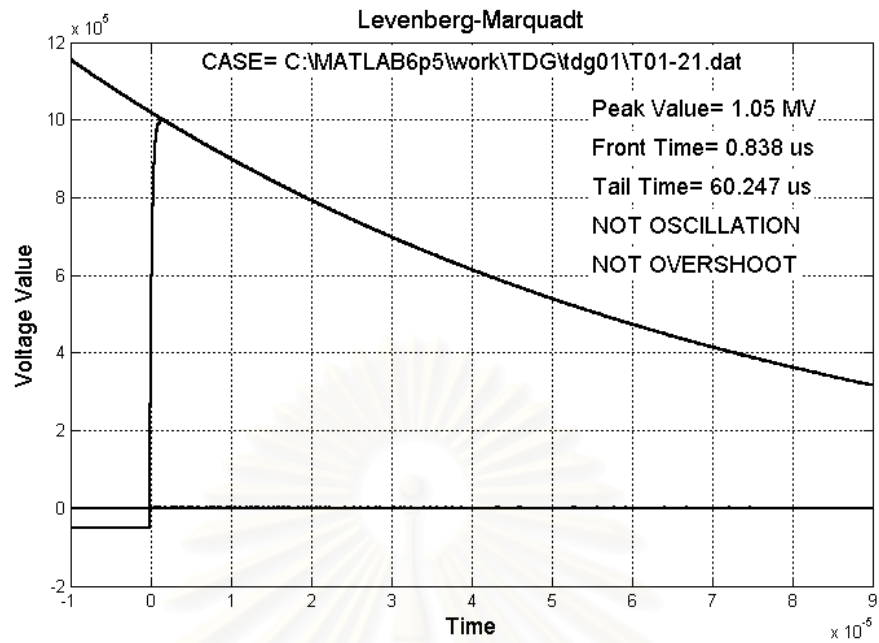
รูปคลื่นที่ได้นี้ คือผลการทดสอบโปรแกรมคำนวณค่าพารามิเตอร์โดยวิธีตัวกรองคาล์มาน และวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ดังตารางผลการทดสอบในบทที่ 4 โดยจะนำเสนอรูปคลื่น ตัวแทนในแต่ละกรณี กรณีละ 1 รูปคลื่นต่อวิธีการ



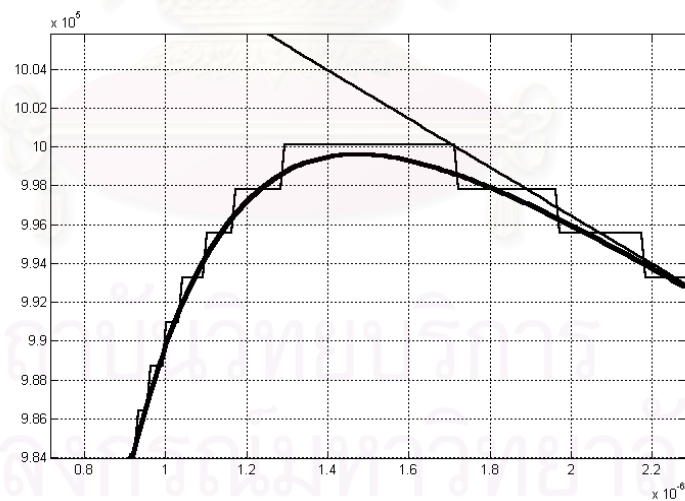
รูปที่ ก.1 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1



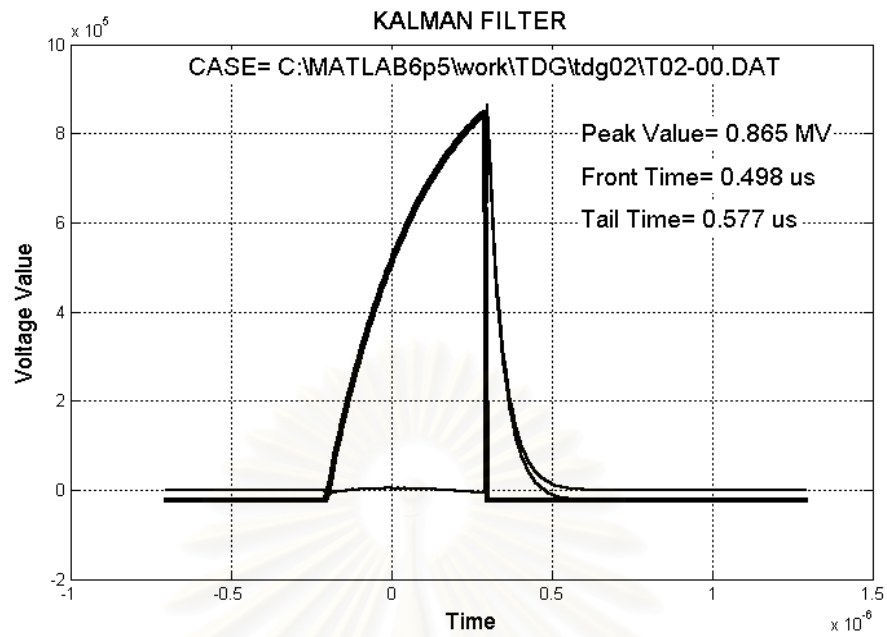
รูปที่ ก.2 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1 บริเวณค่ายอด



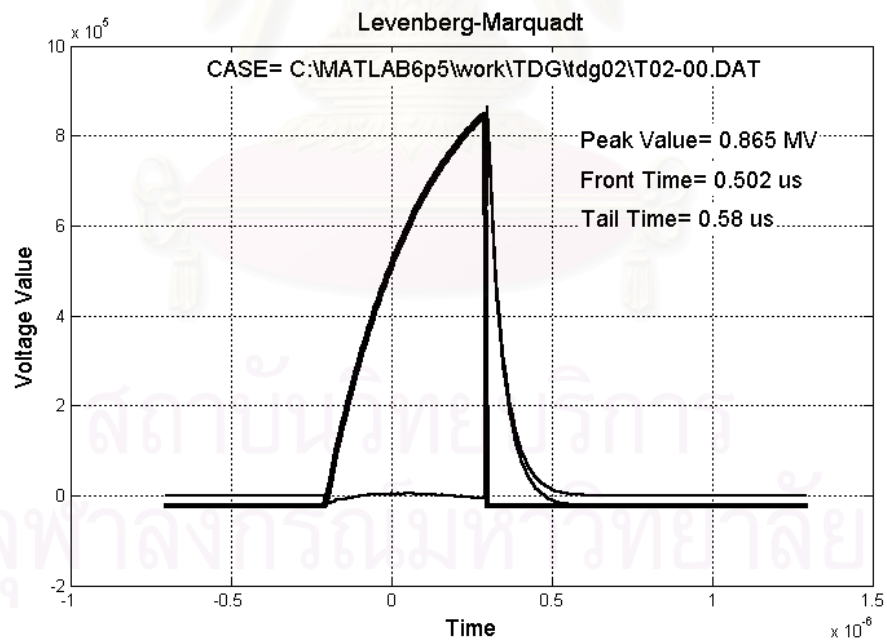
รูปที่ ก.3 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1



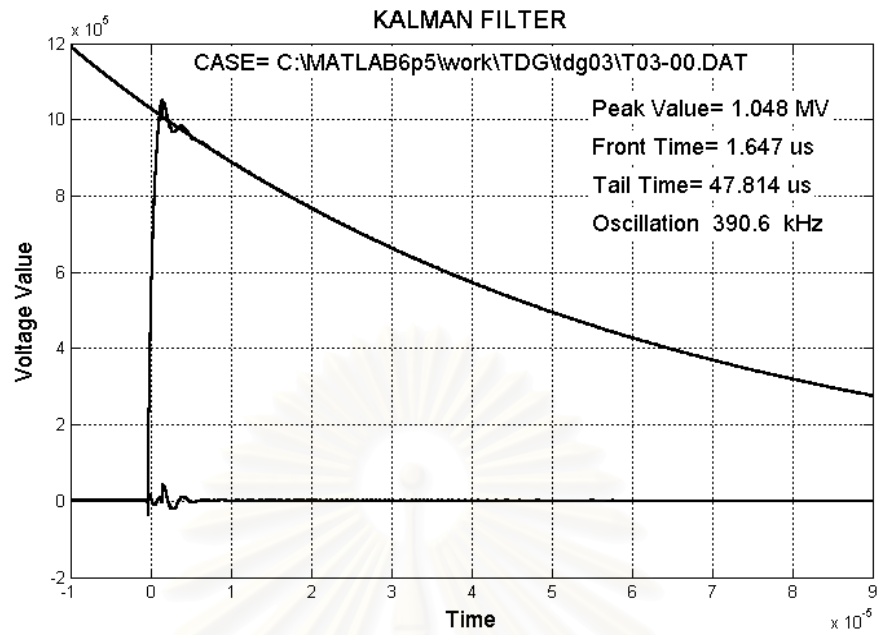
รูปที่ ก.4 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1 บริเวณค่ายอด



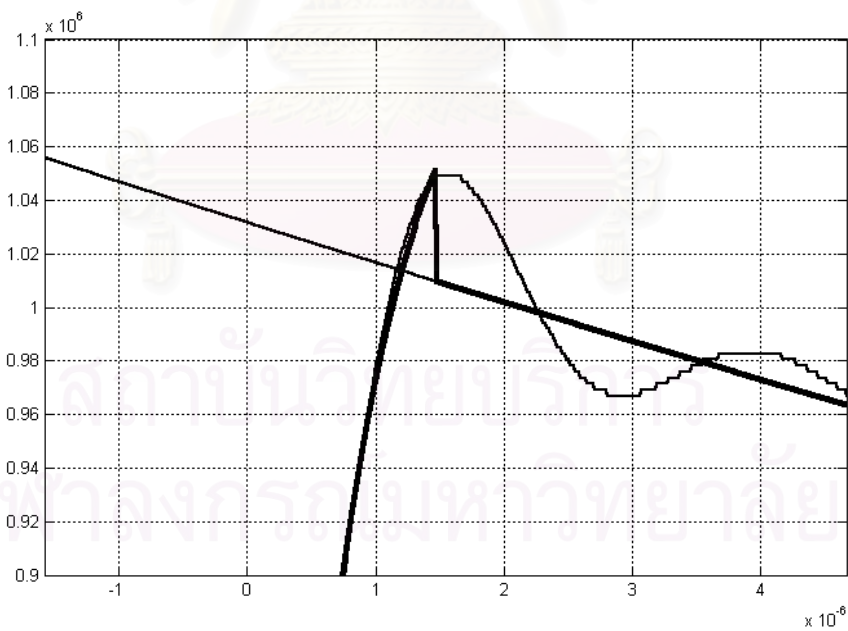
รูปที่ ก.5 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 2



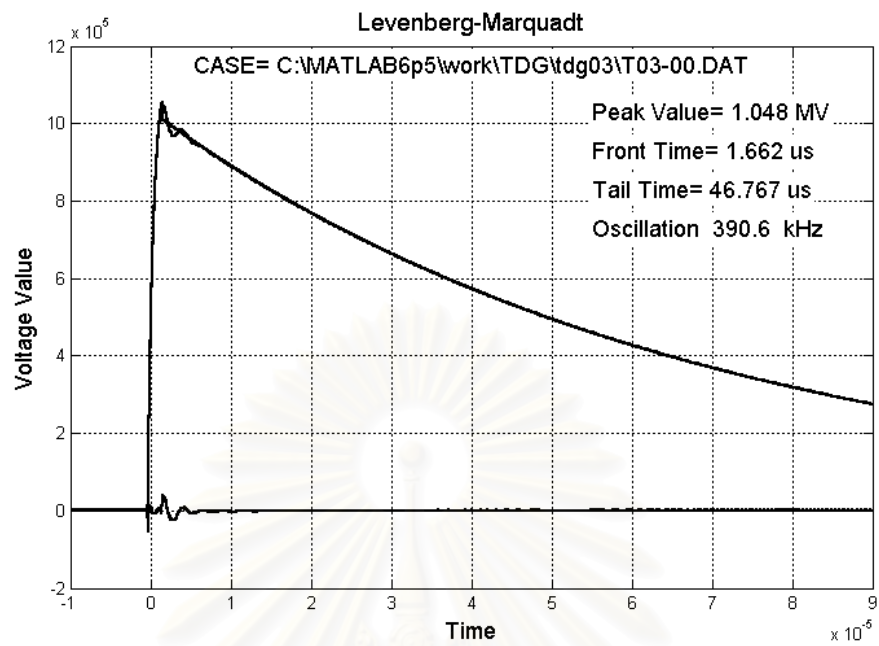
รูปที่ ก.6 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 2



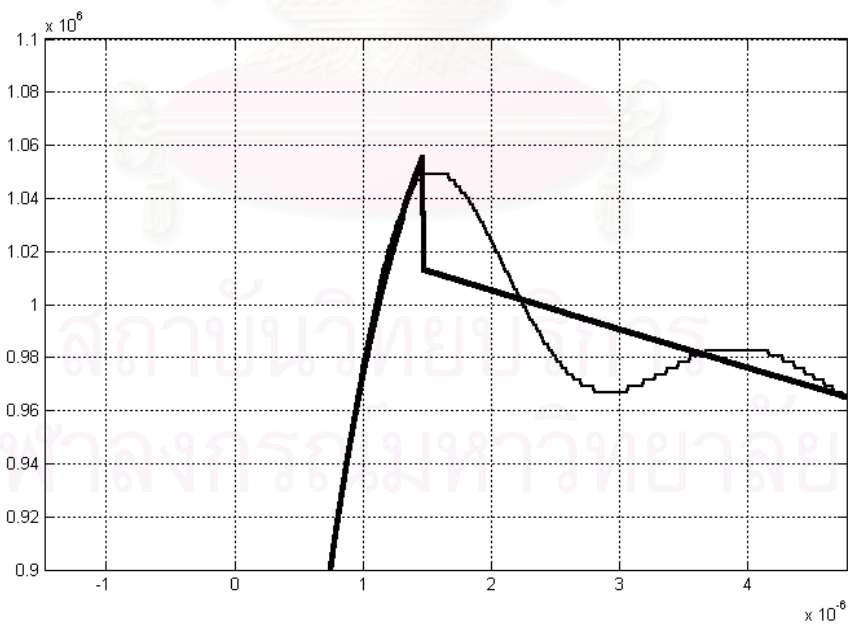
รูปที่ ก.7 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 3



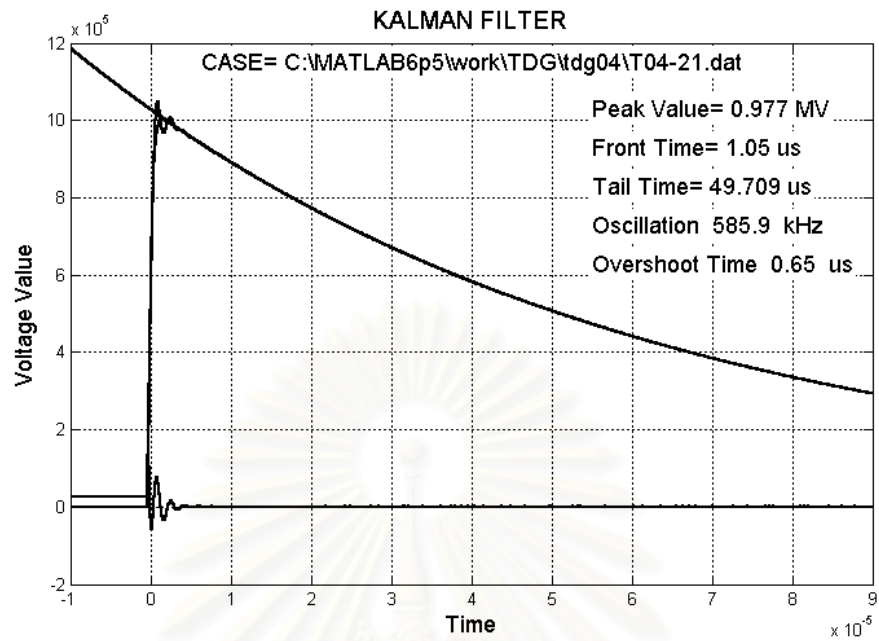
รูปที่ ก.8 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 3 บริเวณค่ายอด



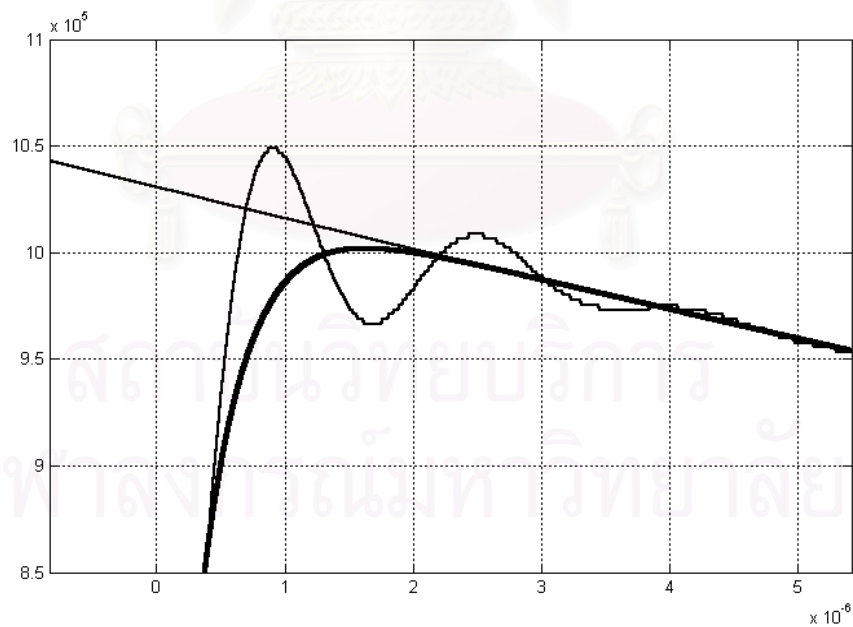
รูปที่ ก.9 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดตที่กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 3



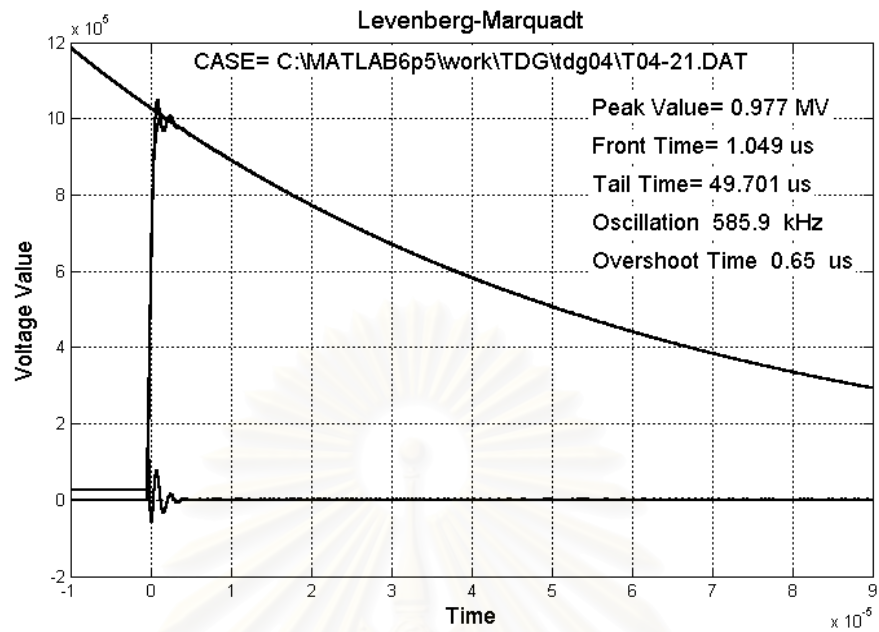
รูปที่ ก.10 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดตที่กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 3 บริเวณค่ายอด



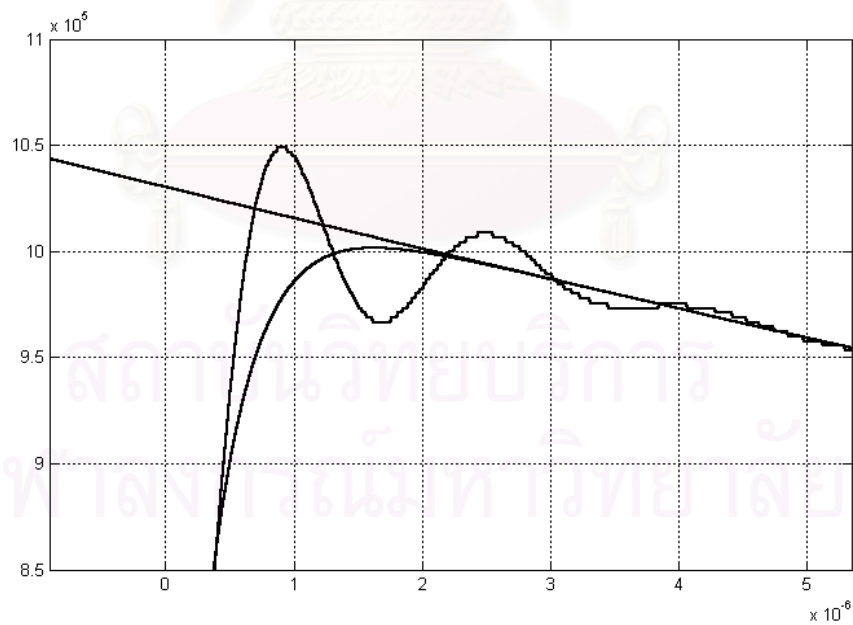
รูปที่ ก.11 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มนำกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 4



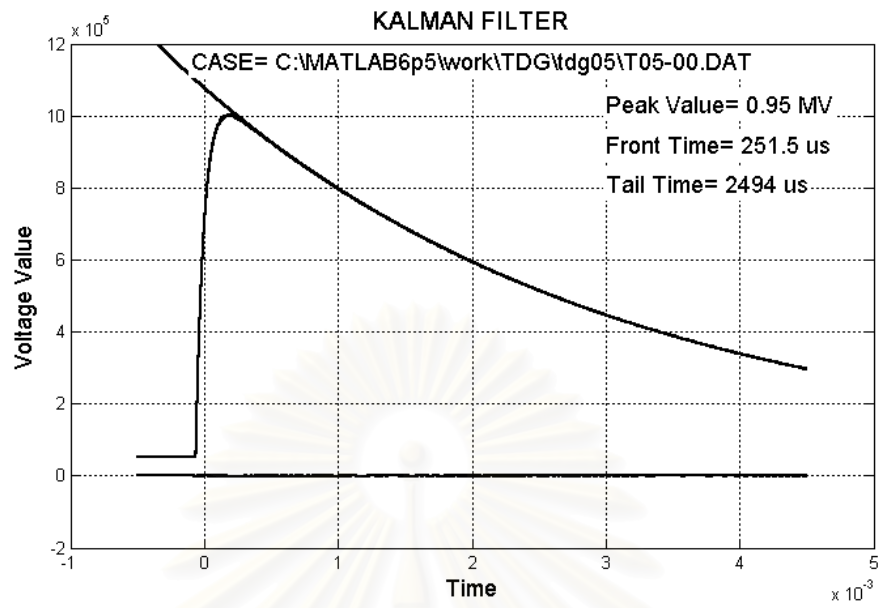
รูปที่ ก.12 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มนำกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 4 บริเวณค่ายอด



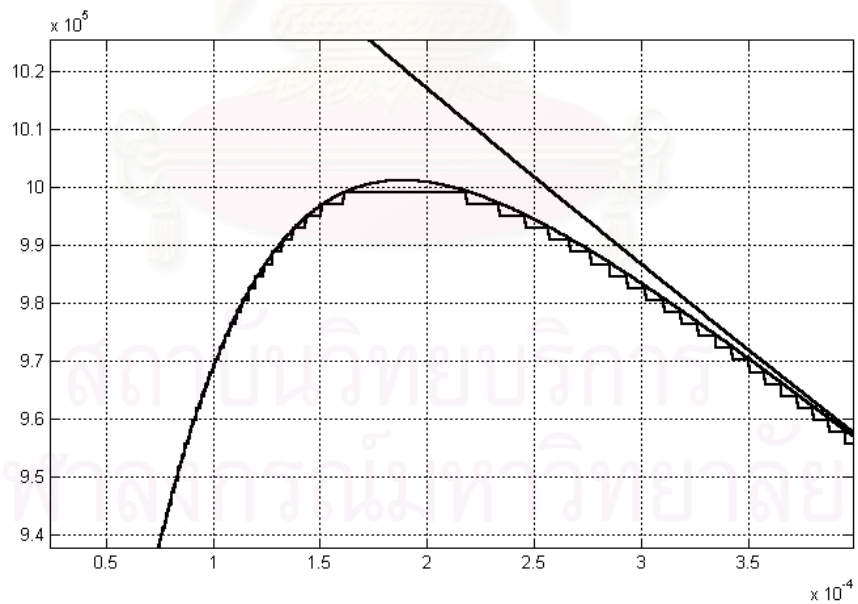
รูปที่ ก.13 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 4



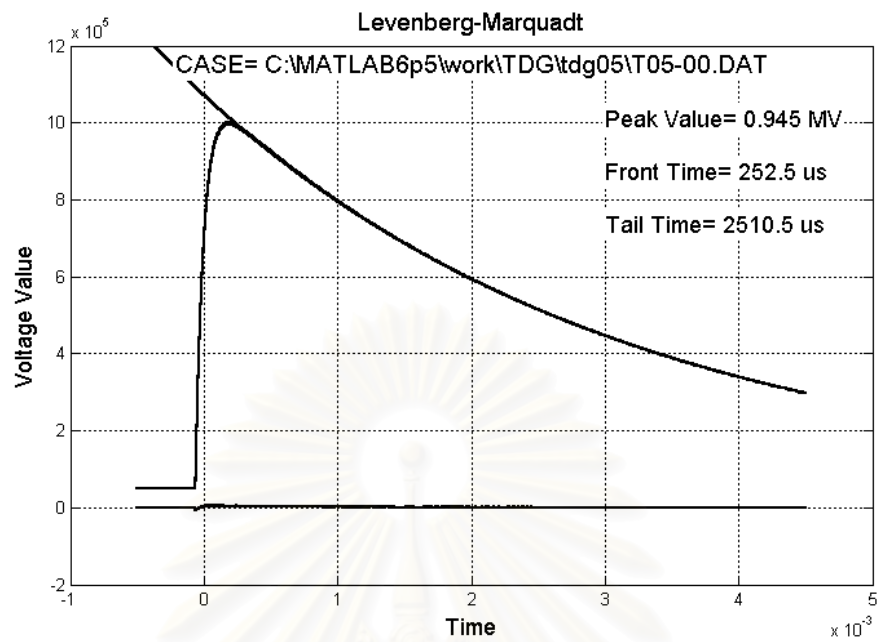
รูปที่ ก.14 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 4 บริเวณค่ายอด



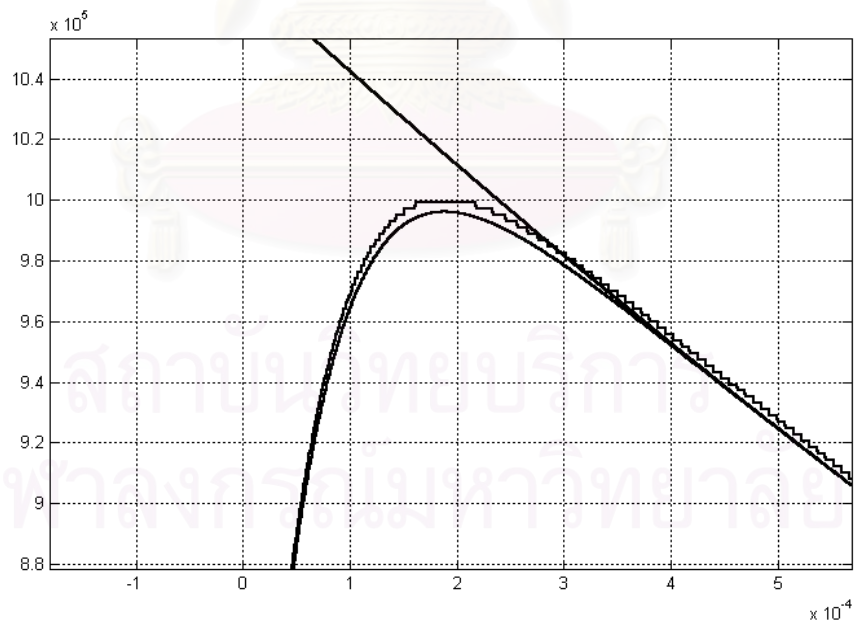
รูปที่ ก.15 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5



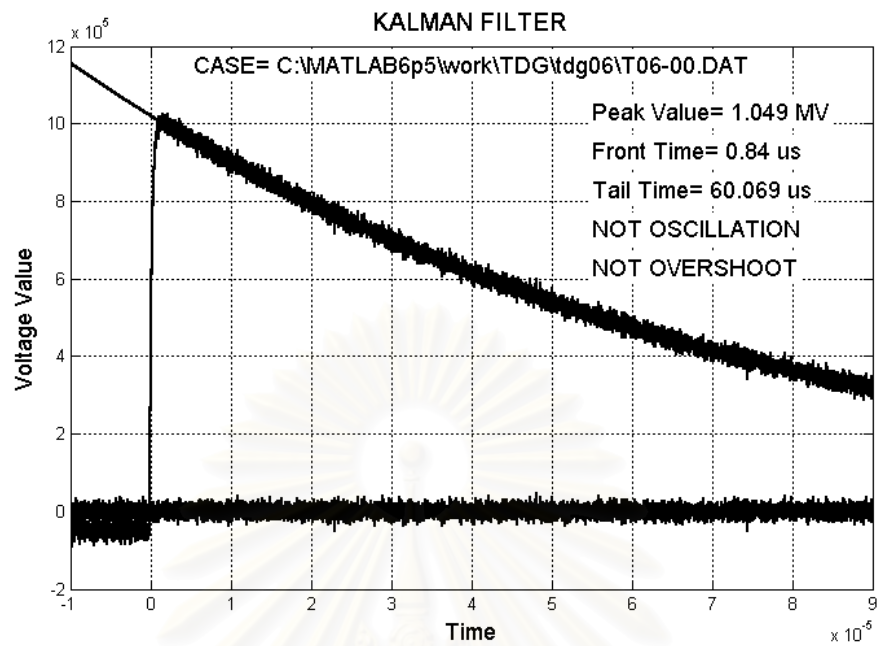
รูปที่ ก.16 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5 บริเวณค่ายอด



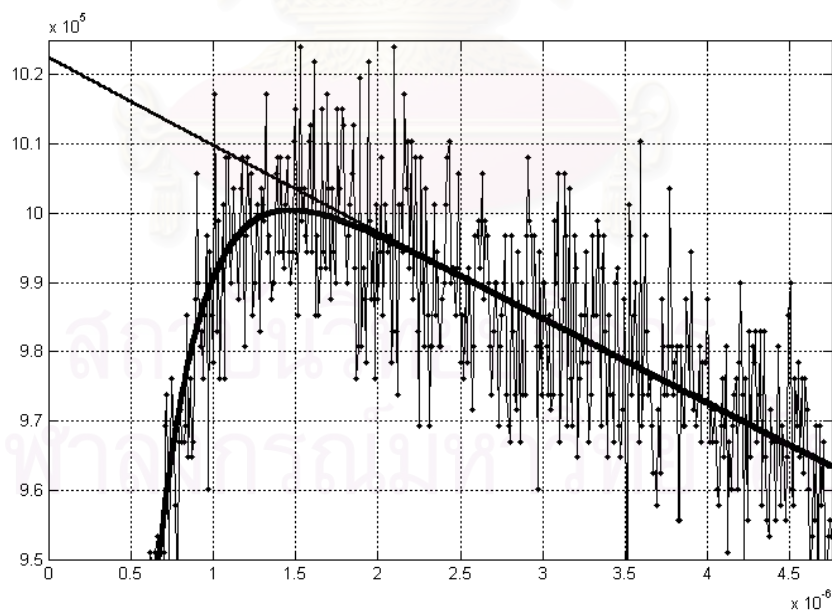
รูปที่ ก.17 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5



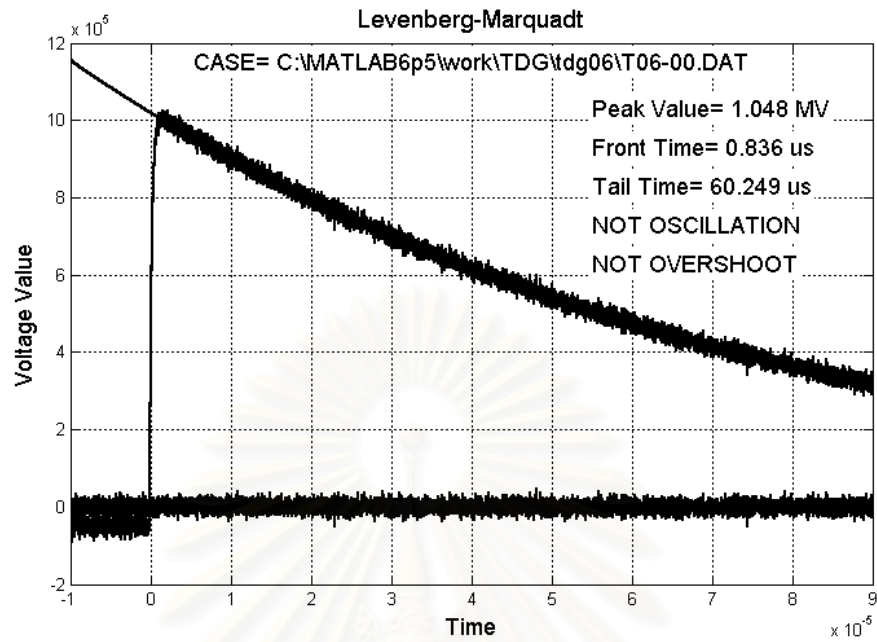
รูปที่ ก.18 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5 บริเวณค่ายอด



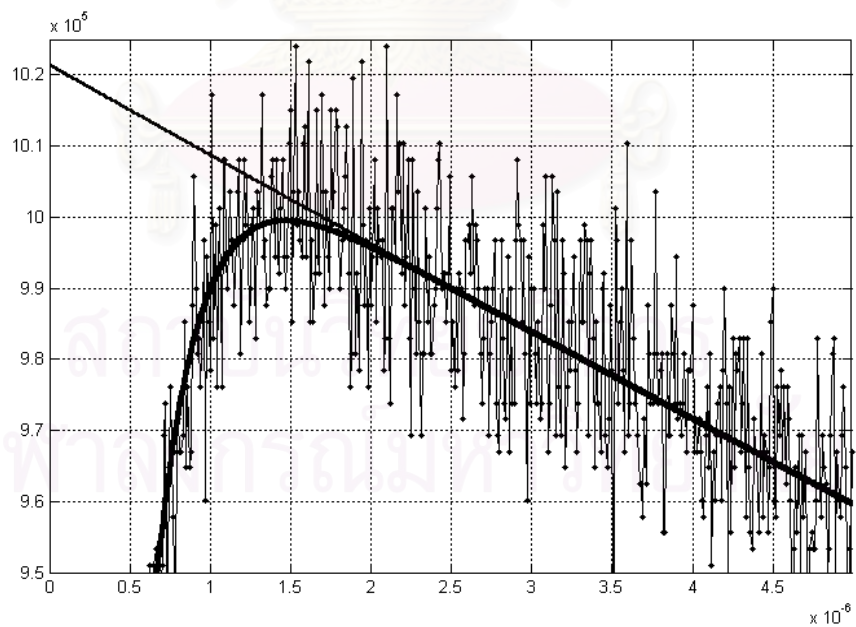
รูปที่ ก.19 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6



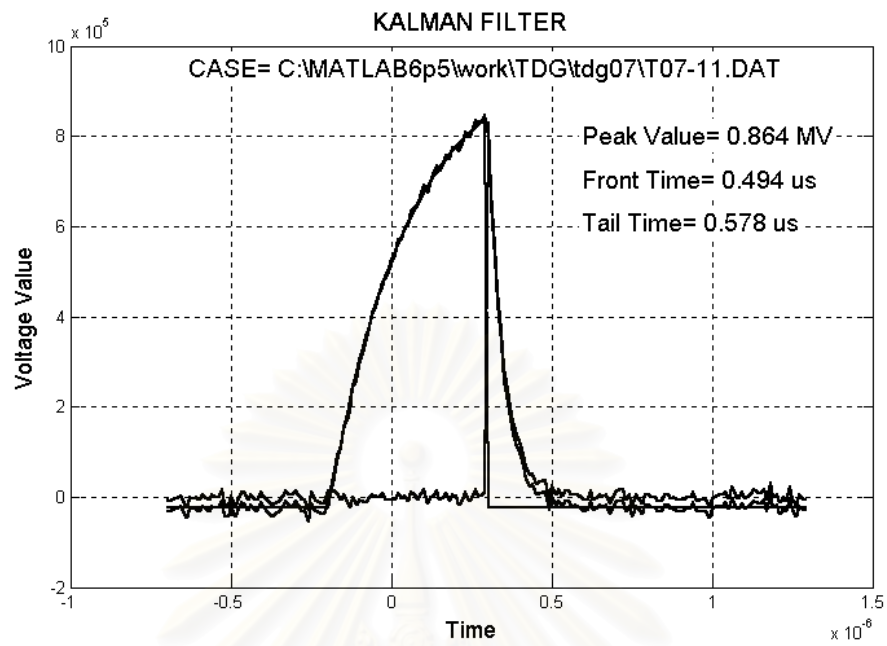
รูปที่ ก.20 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6 บริเวณค่ายอด



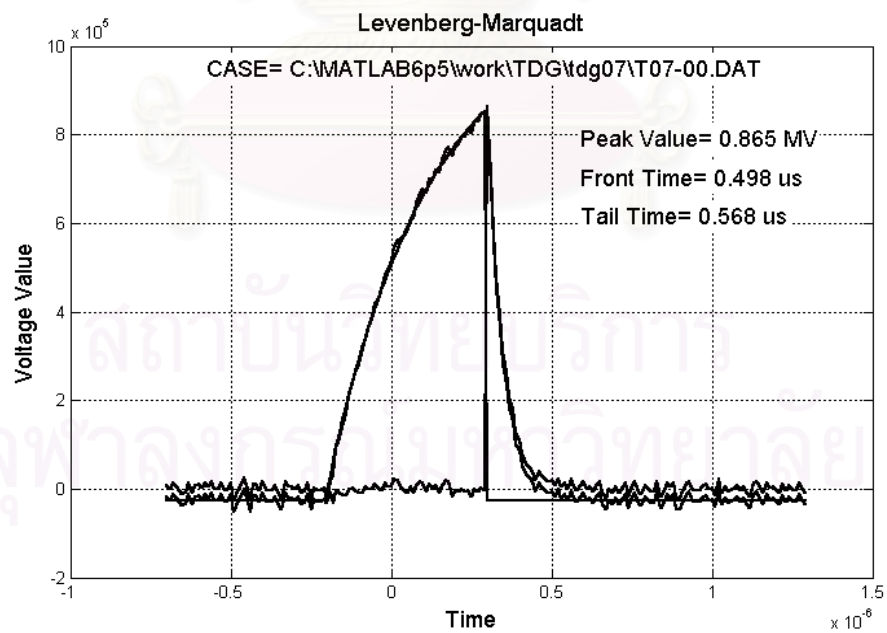
รูปที่ ก.21 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6



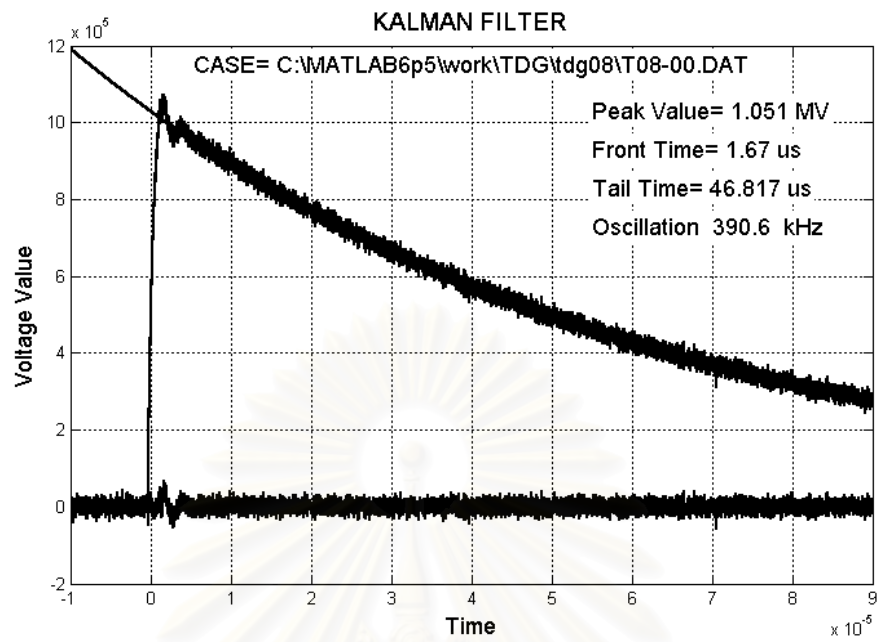
รูปที่ ก.22 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6 บริเวณค่ายอด



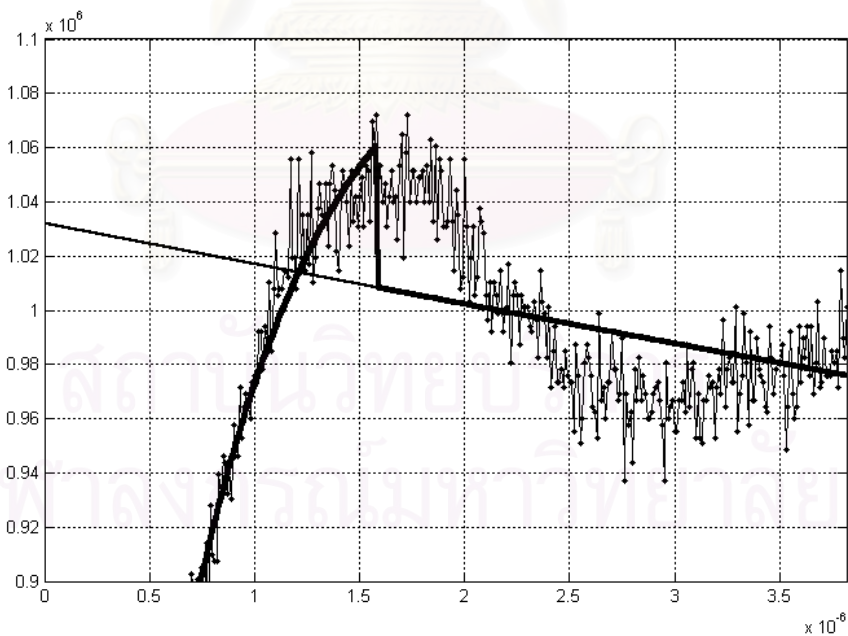
รูปที่ ก.23 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มนับกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 7



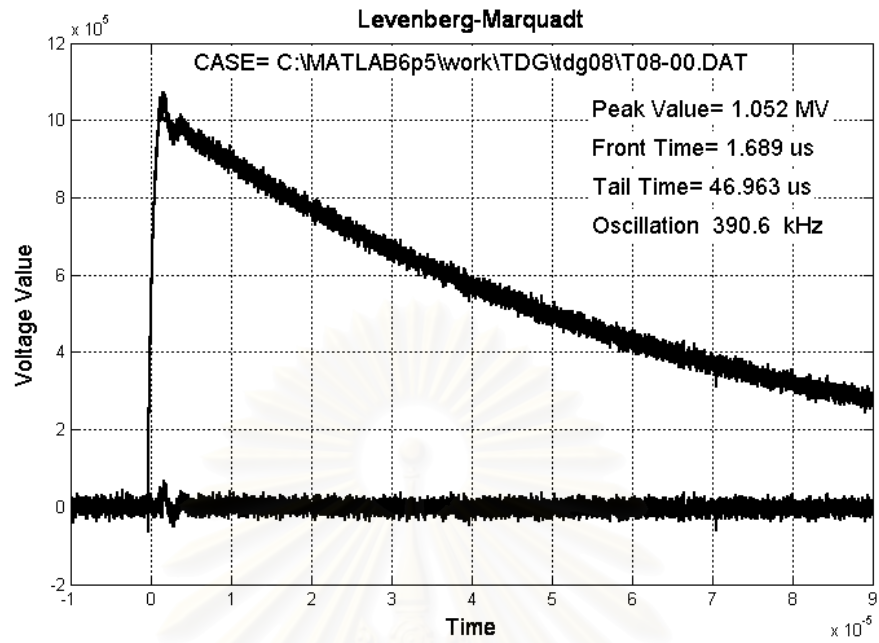
รูปที่ ก.24 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 7



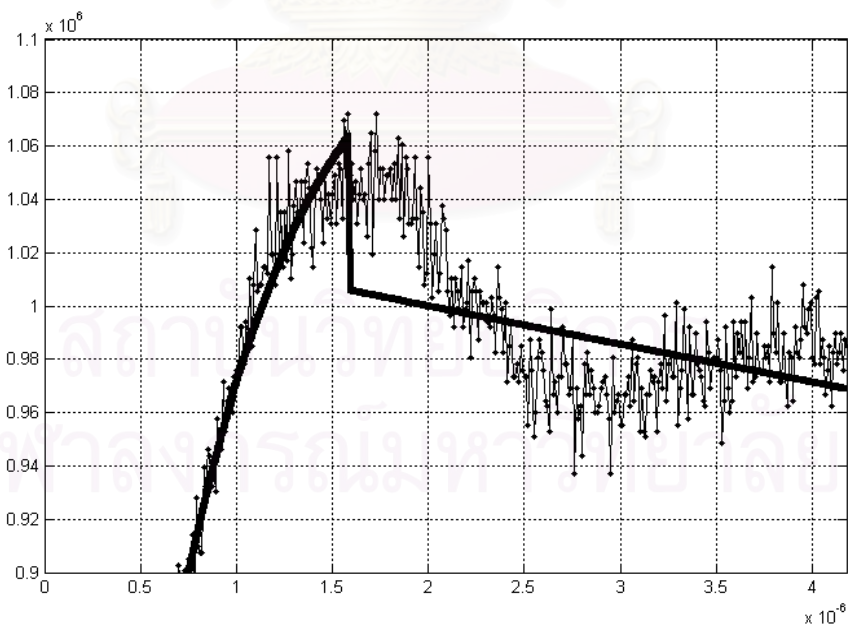
รูปที่ ก.25 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8



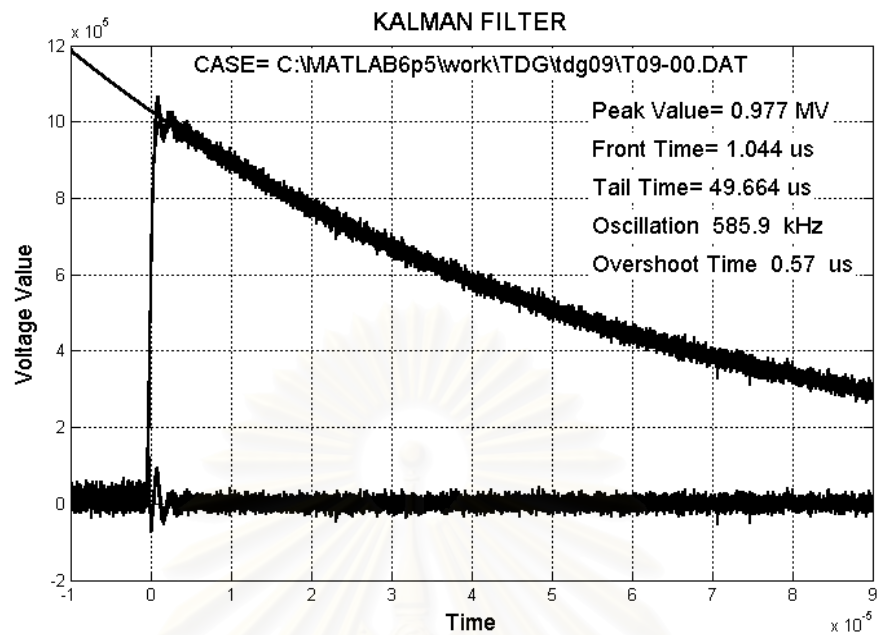
รูปที่ ก.26 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8 บริเวณค่ายอด



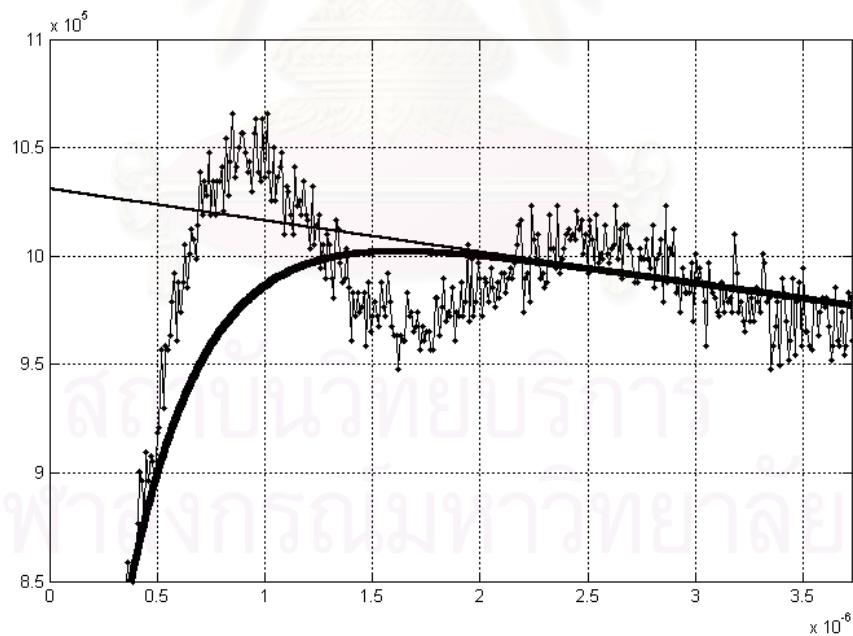
รูปที่ ก.27 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8



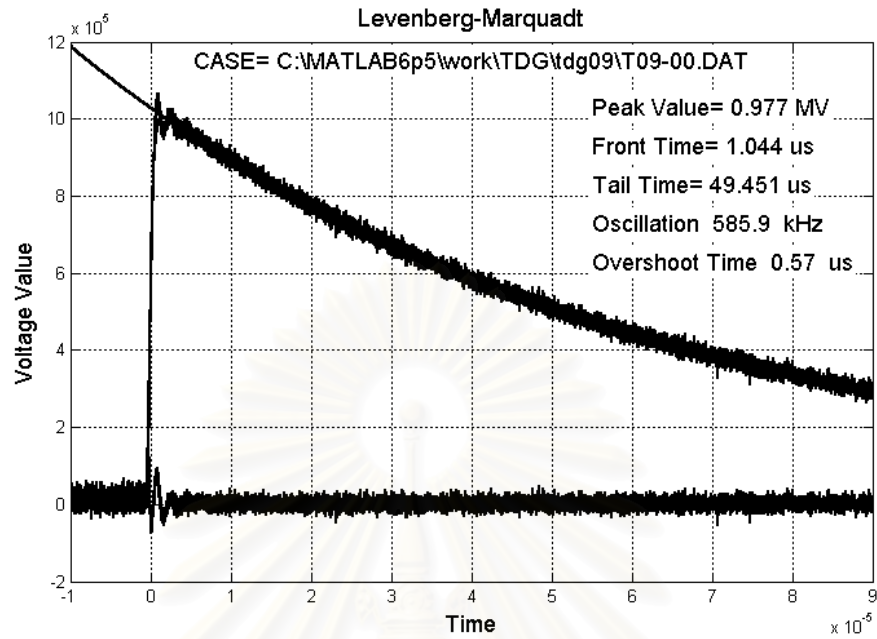
รูปที่ ก.28 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8 บริเวณค่ายอด



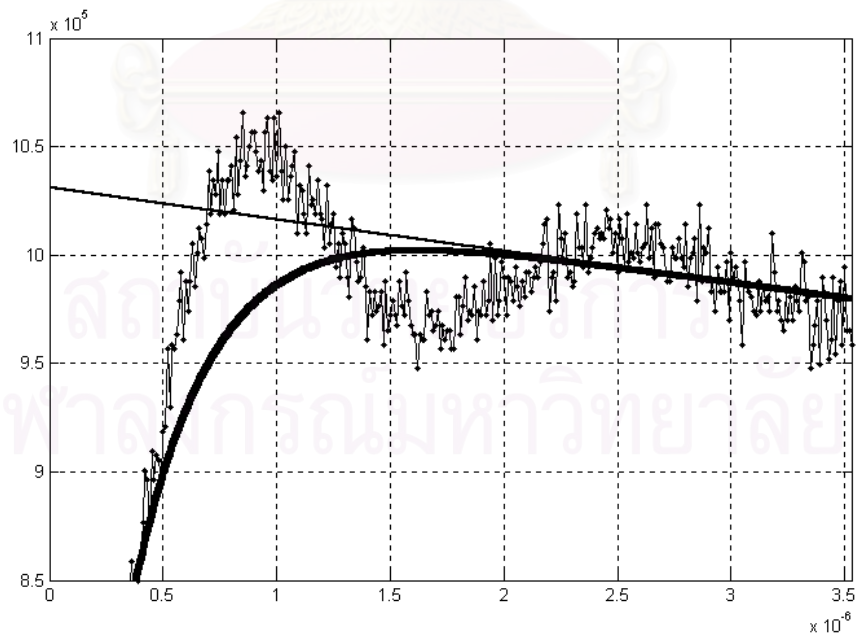
รูปที่ ก.29 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 9



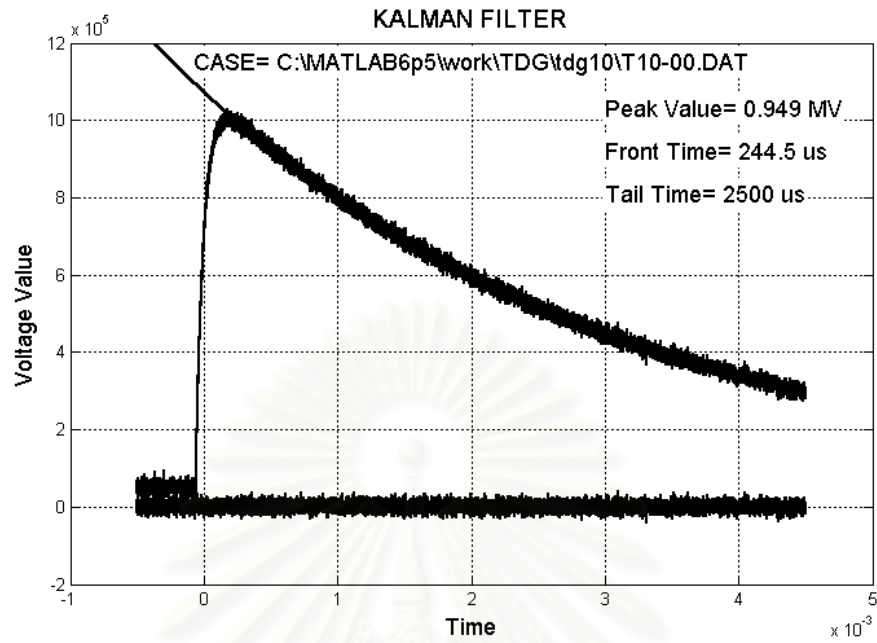
รูปที่ ก.30 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8 บริเวณค่ายอด



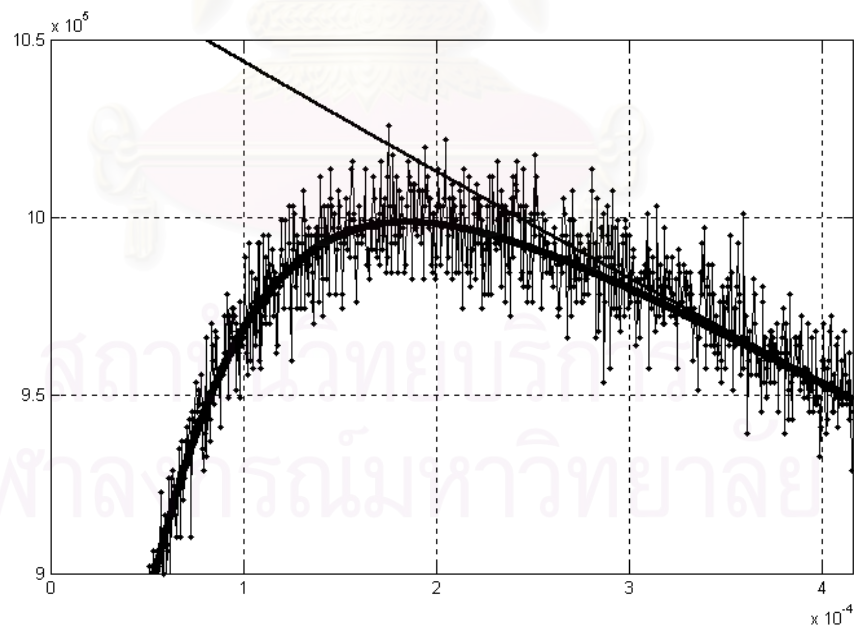
รูปที่ ก.31 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 9



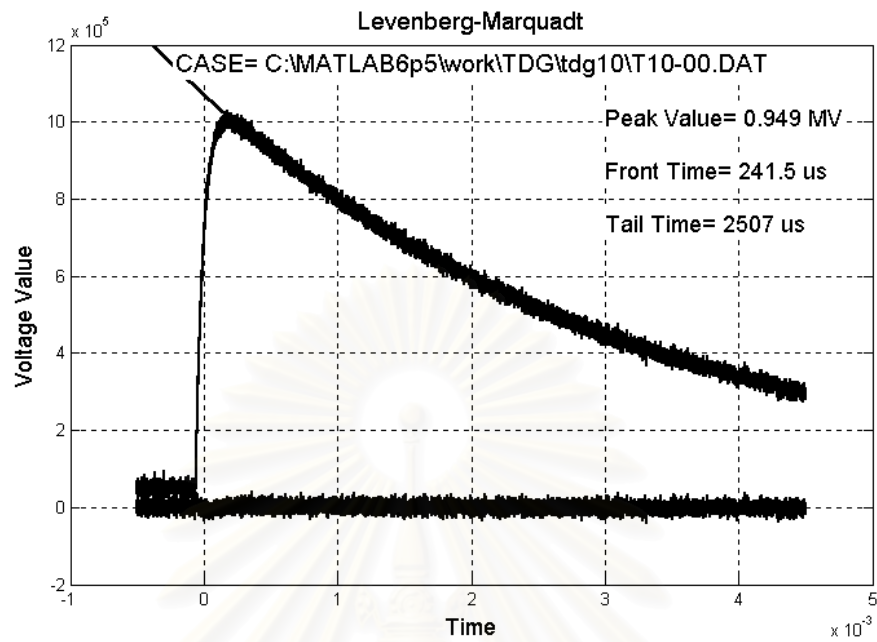
รูปที่ ก.32 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 9 บริเวณค่ายอด



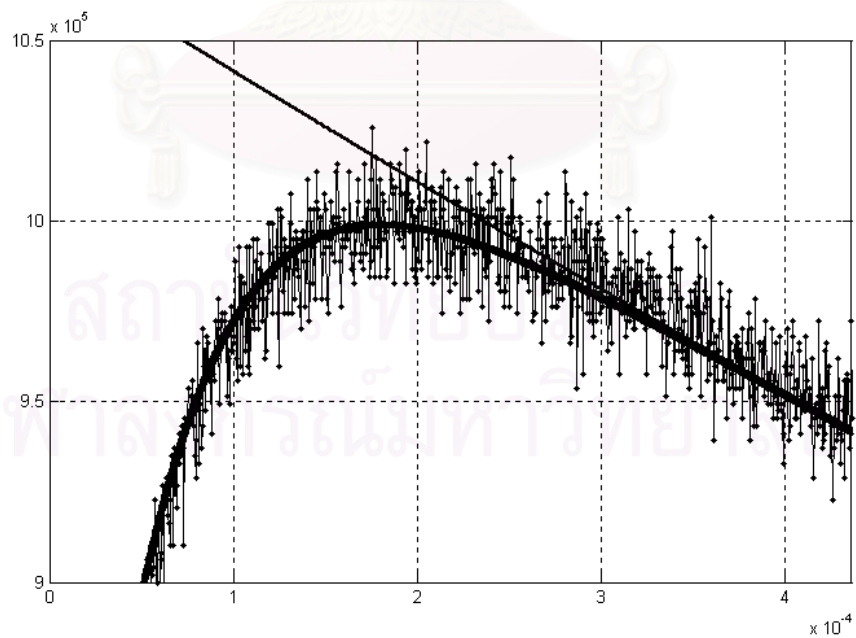
รูปที่ ก.33 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มนานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 10



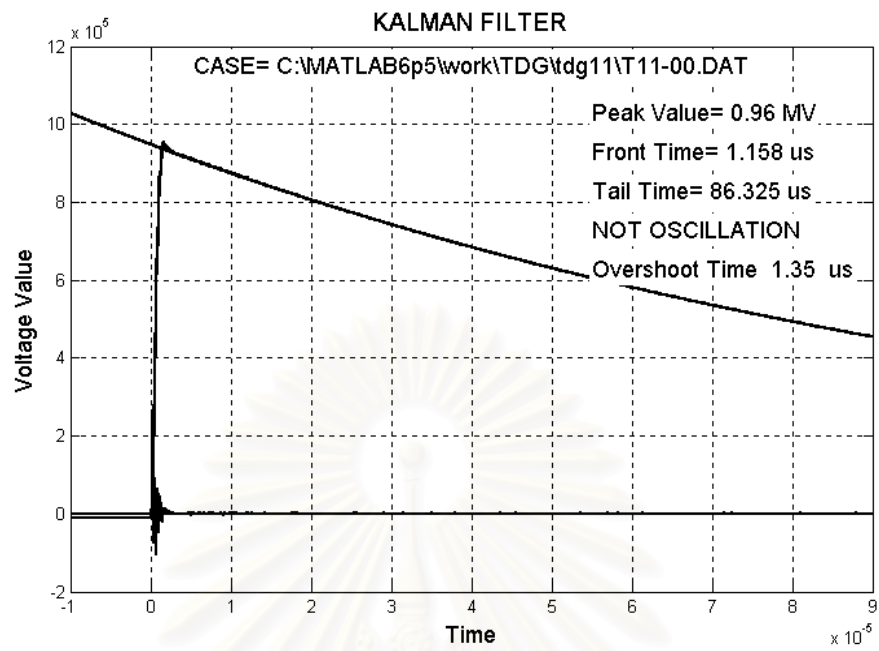
รูปที่ ก.34 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มนานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 10 บริเวณค่ายอด



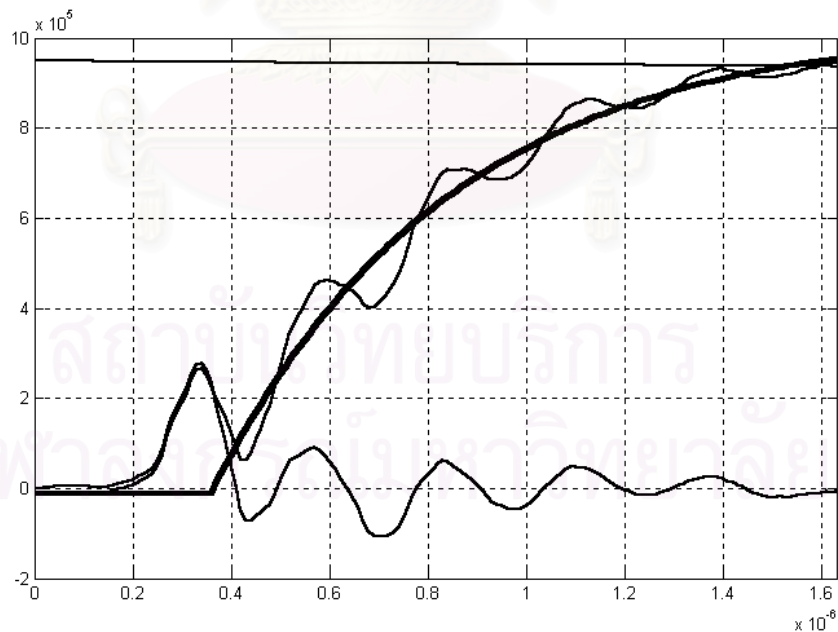
รูปที่ ก.35 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 10



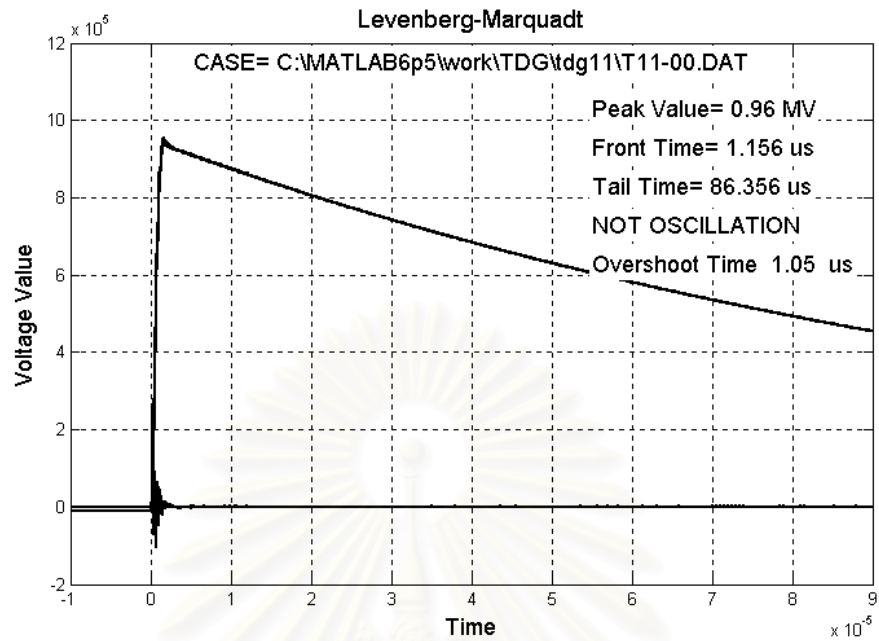
รูปที่ ก.36 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 10 บริเวณค่ายอด



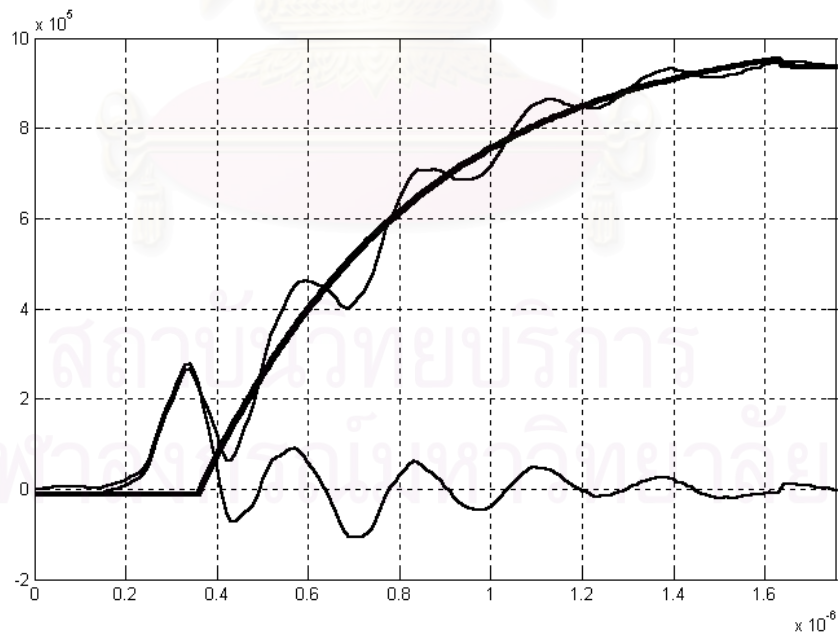
รูปที่ ก.37 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11



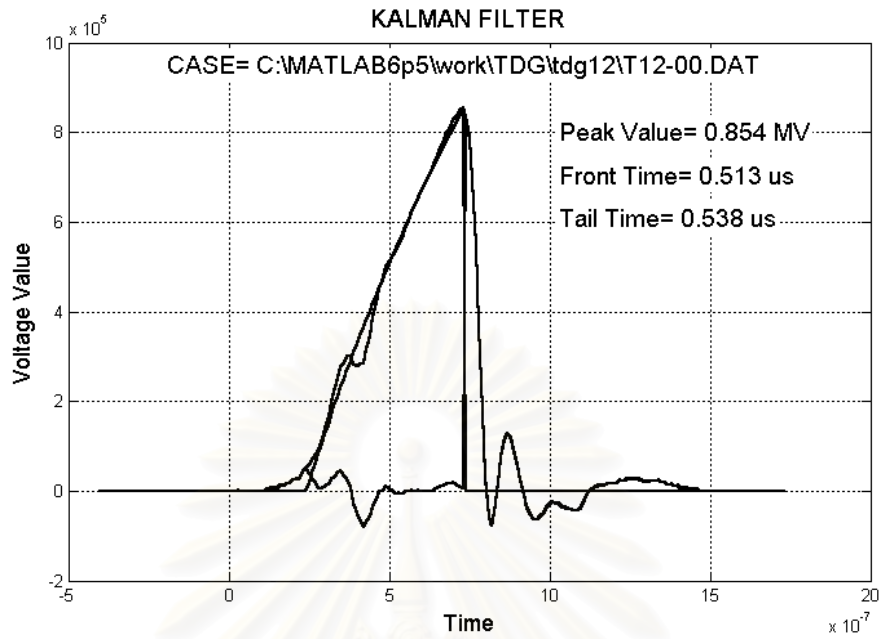
รูปที่ ก.38 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11 บริเวณหน้าคลื่น



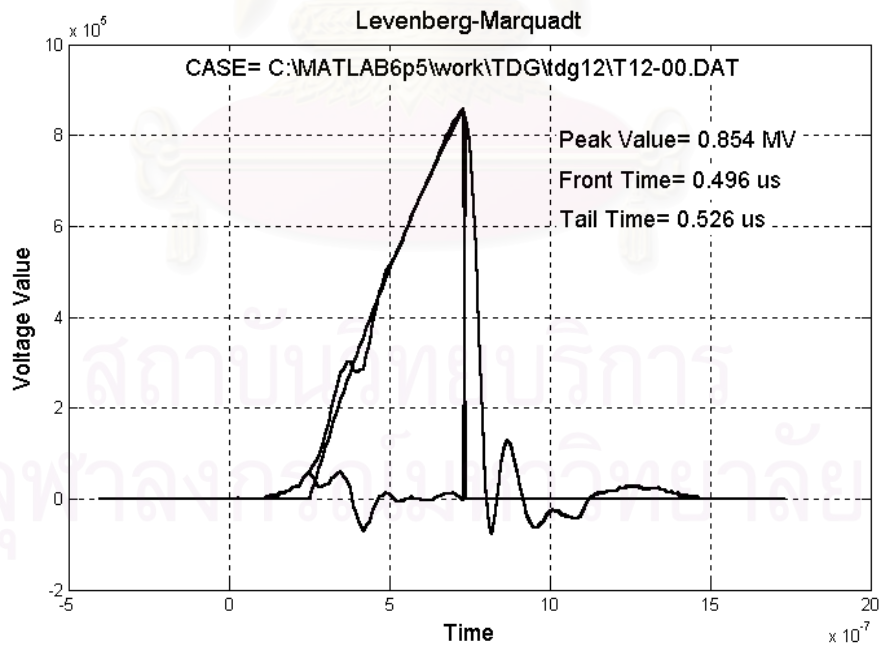
รูปที่ ก.39 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดต์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11



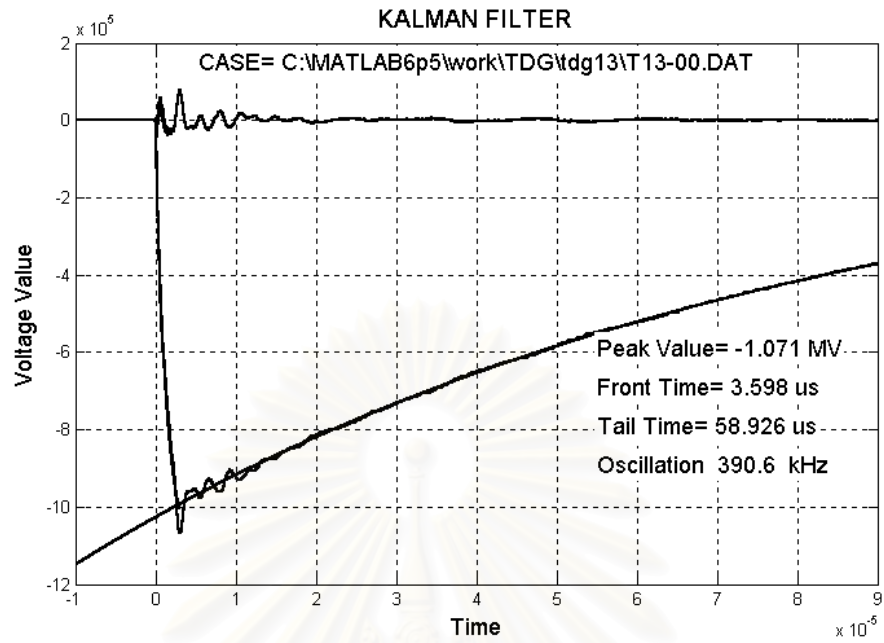
รูปที่ ก.40 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดต์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11 บริเวณหน้าคลื่น



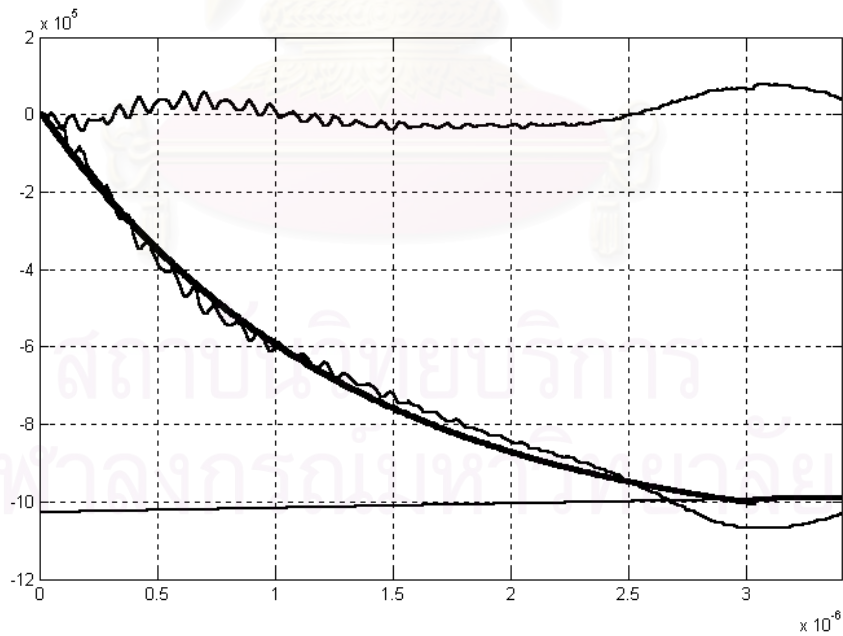
รูปที่ ก.41 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มนานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 12



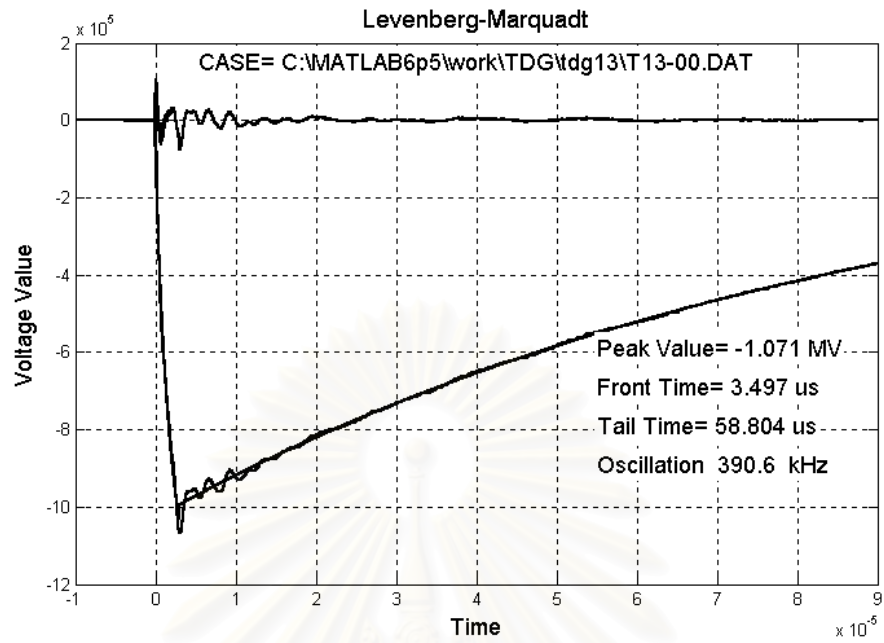
รูปที่ ก.42 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 12



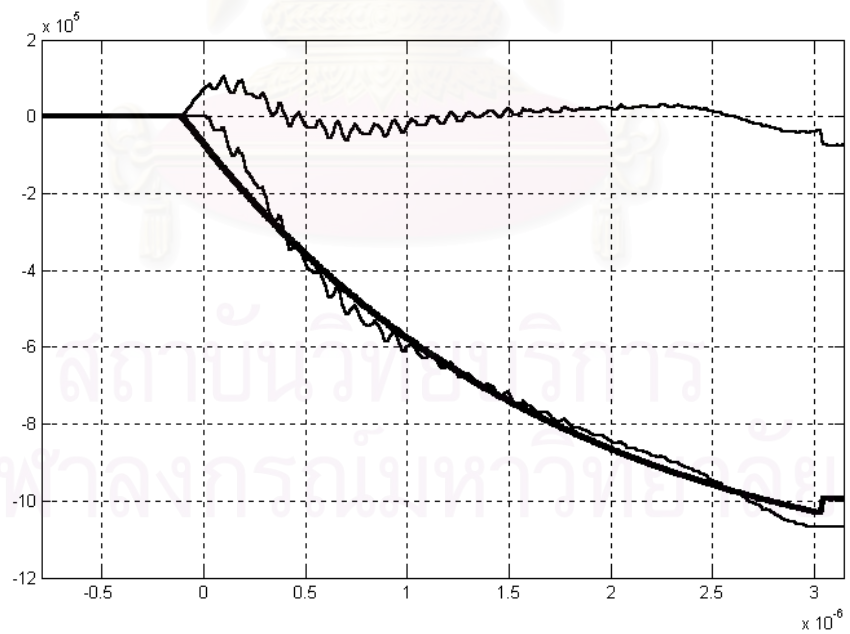
รูปที่ ก.43 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มนานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13



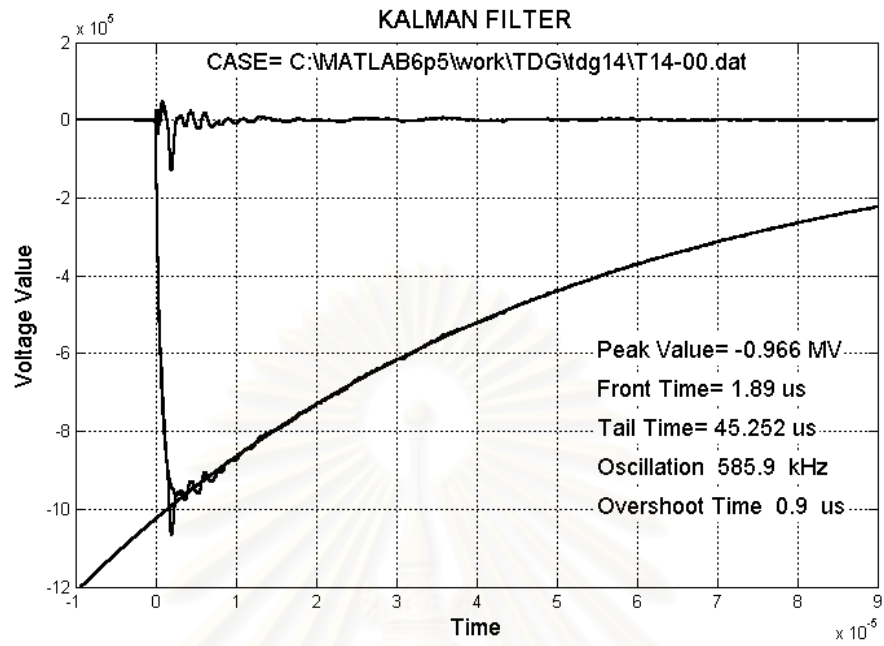
รูปที่ ก.44 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มนานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13 บริเวณหน้าคลื่น



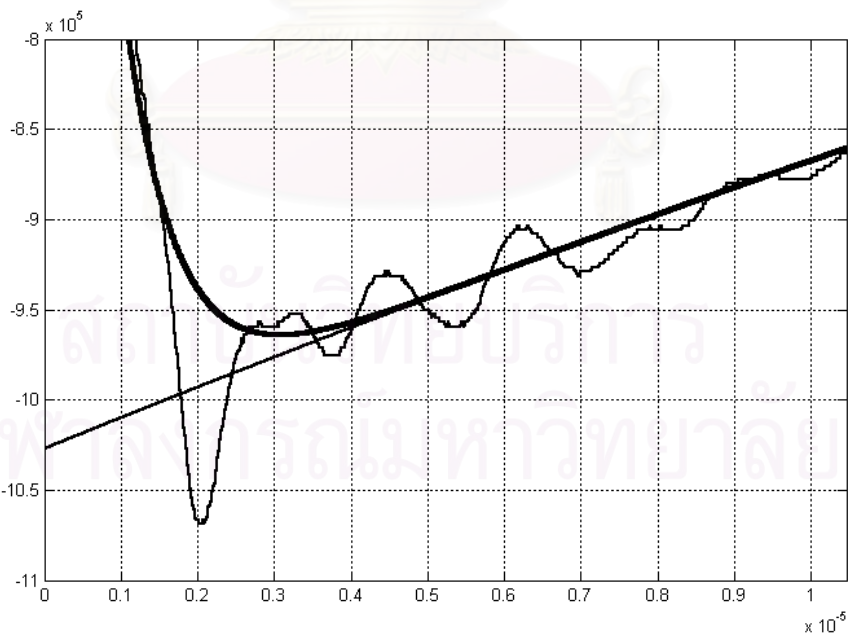
รูปที่ ก.45 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดตที่กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13



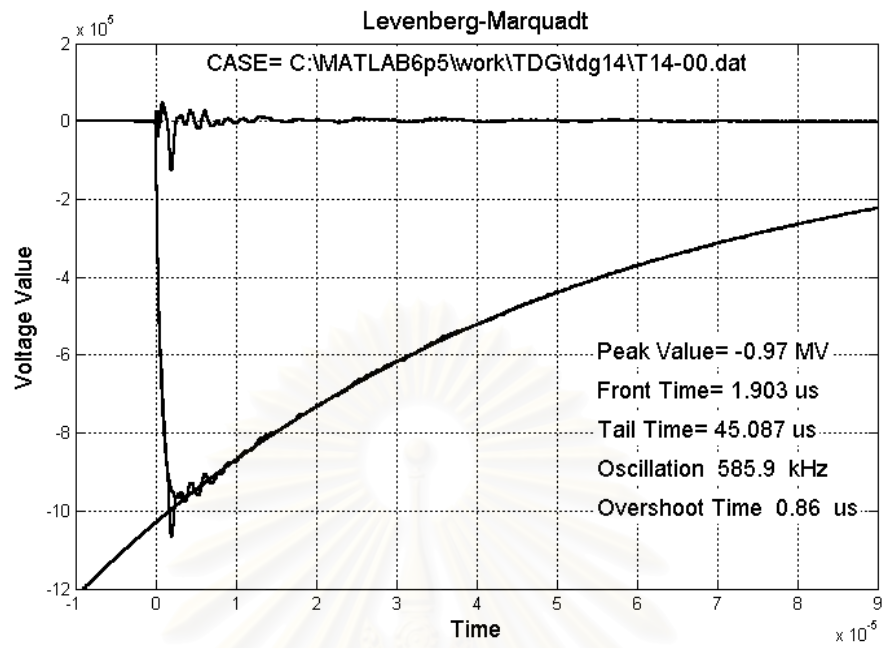
รูปที่ ก.46 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดตที่กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13 บริเวณหน้าคลื่น



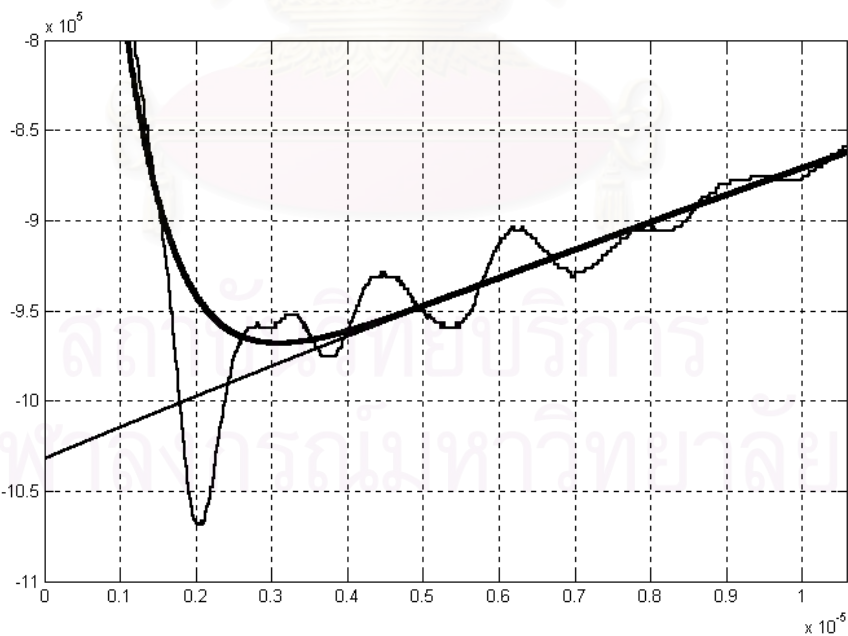
รูปที่ ก.47 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มนานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14



รูปที่ ก.48 ผลของวิธีตัวกรองคาล์มนานกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14 บริเวณค่ายอด



รูปที่ ก.49 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14



รูปที่ ก.50 ผลของวิธีการเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14 บริเวณค่ายอด

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนพดล โคตรพันธ์ เกิดวันที่ 6 พฤศจิกายน พ.ศ. 2520 ที่อำเภอโพธาราม จังหวัดหนองคาย สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อ พ.ศ. 2541 และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2545 โดยระหว่างการศึกษาในระดับปริญญา มหาบัณฑิต ได้รับทุนการศึกษาจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จังหวัด นครราชสีมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย