

การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อหาพารามิเตอร์ของแรงดันทดสอบอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-840-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

23 พ.ค. 2544

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE FOR DETERMINING LIGHTNING IMPULSE  
TEST VOLTAGE PARAMETERS



Mr. Sornnarong Suwantharak

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

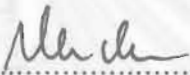
Academic Year 1999

ISBN 974-333-840-3

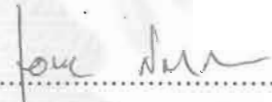
หัวข้อวิทยานิพนธ์      การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อหาพารามิเตอร์ของแรงดันทดสอบอิมพัลส์รูป  
คลื่นฟ้าผ่า  
โดย                              นายศรณรงค์ สุวรรณธารักษ์  
ภาควิชา                        วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา            อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์


---

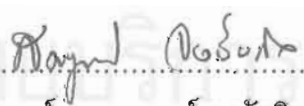
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย      อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัมย์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ จงชัยกิจ)

สถาบันวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศดรณรงค์ สุวรรณธนาภิรักษ์ : การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อหาพารามิเตอร์ของแรงดันทดสอบอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ( DEVELOPMENT OF A SOFTWARE FOR DETERMINING LIGHTNING IMPULSE TEST VOLTAGE PARAMETERS)

อ. ที่ปรึกษา : ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ , 115 หน้า. ISBN 974-333-840-3.

วิทยานิพนธ์นี้เสนออัลกอริทึมสำหรับการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่วัดได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคปโดยใช้แนวทางตามมาตรฐาน IEC 60-1 ทฤษฎีที่ใช้ในการหารูปคลื่นเฉลี่ยได้แก่ วิธีการประดิษฐ์ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นแบบกำลังสองน้อยสุด โดยมีเทคนิคของการเขียนได้แก่ การแบ่งการเขียนเป็น 2 ครั้งสำหรับรูปคลื่นเต็ม โดยเริ่มจากการเขียนส่วนหลังคลื่นเป็นอันดับแรก และเขียนส่วนหน้าคลื่นเป็นลำดับต่อมา สำหรับการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นสับที่หน้าคลื่น เทคนิคที่ใช้ได้แก่การตรึงพารามิเตอร์ของฟังก์ชันแบบจำลองบางค่าให้คงที่

อัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นดังกล่าวได้นำมาพัฒนาเป็นซอฟต์แวร์และนำไปทดสอบตามมาตรฐาน IEC 1083-2 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 11, 12, 13 ได้ถูกต้องสอดคล้องกับมาตรฐาน สำหรับพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 3 และ 8 สามารถปรับปรุงได้โดยการปรับการหาค่าฐานก่อนที่จะนำไปทำให้เป็นบรรทัดฐาน หรือการปรับพารามิเตอร์ของเอสซีฟิลเตอร์ให้เหมาะสม และการปรับการหาจุดกำเนิดของรูปคลื่นเพื่อเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยตามลำดับสำหรับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14 นั้น เนื่องจากเป็นรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบจริง เกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินค่าพารามิเตอร์ของผู้เขียนมาตรฐานอาจไม่ตรงกับเกณฑ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พารามิเตอร์บางค่าที่หาได้จึงมีความแตกต่างกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า .....ลายมือชื่อนิสิต   
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา   
ปีการศึกษา 2542 .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4070432021 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : TDG / LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE PARAMETERS / EXTENDED KALMAN FILTER / S.G. FILTER / NONLINEAR LEAST SQUARE FITTING


SORNNARONG SUWANTHANARAK : DEVELOPMENT OF A SOFTWARE FOR DETERMINING LIGHTNING IMPULSE TEST VOLTAGE PARAMETERS.

THESIS ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS, Dr. Sc.Techn. 115 pp.

ISBN 974-333-840-3.

This thesis presents an algorithm for analyzing parameters of full and chopped (on front) lightning impulse voltage, obtained from a digital oscilloscope, according to IEC 60-1 standard. Theory used to write a mean curve is " Nonlinear least square curve fitting method ". There are some techniques used to write this mean curve. For full wave, we divide curve fitting procedure into two stage – the first stage is tail wave part fitting, and the second one is front wave part fitting. To write a mean curve for chopped (on front) wave, technique applied is keeping some model function parameters fixed.

The algorithm developed as presented before is evolved into a software and tested with IEC 1083-2 standard. The result shows that the developed software can analyze parameters of reference waveform in case 1, 2, 3, 4, 6, 7, 11, 12, and 13 correctly corresponding to the standard. In the case of reference waveforms in case 3 and 8, we can improve by adjusting the base value finding procedure which occur before the normalization, adjusting the parameters of S.G. filter suitably, and adjusting the origin finding procedure which used to write a mean curve. Because the reference waveform case 14 is a measured one, the parameters judgement criteria used by the standard composer may differ from the one used in this thesis.

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่อนิสิต ..... 

สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... K. Petcharakas.

ปีการศึกษา ..... 2542 ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย สีลาวิทย์ และ อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ จงชัยกิจ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

อนึ่ง เนื่องจากทุนการศึกษาในระดับปริญญาโทที่ตนได้รับ การสนับสนุนจากศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจนทุกๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ศรณรงค์ สุวรรณนารักษ์  
มกราคม 2543

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของปัญหา.....	1
1.2 มาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้.....	2
1.3 ผลการศึกษาวิจัยในอดีต.....	2
1.4 การศึกษาวิจัยในครั้งนี้.....	5
1.5 วัตถุประสงค์.....	6
1.6 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์.....	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.8 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	7
2. ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์และรูปคลื่นมาตรฐาน.....	8
2.1 ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์.....	8
2.1.1 การกำหนดรูปร่างของแรงดันอิมพัลส์.....	8
2.1.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	9
2.1.3 โวลเตจติไวเตอร์และออสซิลโลสโคป.....	12
2.1.3.1 โวลเตจติไวเตอร์.....	12
2.1.3.2 ออสซิลโลสโคป.....	12
2.2 คลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน.....	12
2.3 การหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-1.....	13
2.3.1 อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม.....	13
2.3.2 อิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ.....	14
2.3.3 อิมพัลส์สวิตช์িংเต็ม.....	16

บทที่	หน้า
2.4 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มเมื่อมีการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินข้อบันทึกอยู่.....	16
3. การวิเคราะห์รูปคลื่นเพื่อหาพารามิเตอร์.....	18
3.1 หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปคลื่น.....	18
3.2 โปรแกรมที่ใช้.....	19
3.3 รูปแบบของข้อมูลเข้า.....	21
3.4 การจำแนกรูปคลื่นทั้ง 3 ชนิด.....	21
3.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์จากข้อมูลดิบ.....	23
3.6 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	29
3.6.1 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม.....	29
3.6.2 การเลือกค่าเริ่มต้นเพื่อนำไปประดิษฐ์ฟังก์ชัน.....	31
3.6.3 การเลือกจุดเพื่อใช้ในการประดิษฐ์รูปคลื่นเต็ม.....	36
3.6.4 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าดับ.....	37
3.7 การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง.....	38
4. การใช้ซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์.....	42
4.1 การใช้งานซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น.....	42
4.2 การทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอกับรูปคลื่นอ้างอิงตามมาตรฐาน.....	44
5. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	60
รายการอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	66
ก. โปรแกรม TDG.....	67
ข. ขอบเขตค่าของพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 1083-2.....	69
ค. ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์.....	71
ง. เวลาที่ใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น.....	81
จ. การประดิษฐ์ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด.....	82
ฉ. วงจรกรองแบบดิจิตอล.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	115



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เวลาหน้าคลื่น (เวลาถึงค่ายอด) และเวลาถึงกึ่งค่ายอดของคลื่นอิมพัลส์เต็มมาตรฐาน.....	13
3.1 ค่า M ที่ใช้สำหรับการกรองรูปคลื่นในเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปทำการวิเคราะห์ด้วย ข้อมูลดิบ ในที่นี้ใช้อันดับ 1.....	25
3.2 ค่าความแปรปรวนเริ่มต้นที่ใช้สำหรับอัลกอริทึมของคาล์มานฟิลเตอร์แบบขยาย.....	35
4.1 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 1 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม, คลื่นเรียบ).....	46
4.2 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 6 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม, มีสัญญาณรบกวน).....	47
4.3 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 3 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม, มีการแกว่งและไม่มีสัญญาณ รบกวน).....	48
4.4 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 8 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม, มีการแกว่งและ มีสัญญาณ รบกวน).....	49
4.5 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 4 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม, มีการแกว่งและไม่มีสัญญาณ รบกวน).....	50
4.6 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 9 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม, มีการแกว่งและมีสัญญาณ รบกวน).....	51
4.7 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 11 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มซึ่งวัดได้จากการวัด).....	52
4.8 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 13 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มซึ่งวัดได้จากการวัด).....	53
4.9 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 14 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มซึ่งวัดได้จากการวัด).....	54
4.10 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 2 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ, ไม่มีสัญญาณรบกวน).....	55
4.11 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 7 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ, มีสัญญาณรบกวน).....	56
4.12 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 12 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าสับซึ่งวัดได้จากการทดลอง).....	57
4.13 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 5 (อิมพัลส์สวิตชิงเต็ม, ไม่มีสัญญาณรบกวน).....	58
4.14 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 10 (อิมพัลส์สวิตชิงเต็ม, มีสัญญาณรบกวน).....	59
ข.1 ขอบเขตค่าของพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 1083-2.....	69
ข.2 ความหมายของค่าย่อและตัวเลขกรณีที่ระบุในตารางที่ ข.1.....	70
ง.1 เวลาโดยเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น.....	81

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์.....	8
2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ A.....	9
2.3 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ B.....	10
2.4 รูปสเก็ตสมการทางคณิตศาสตร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์.....	11
2.5 อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม.....	14
2.6 อิมพัลส์สับที่หน้าคลื่น.....	15
2.7 อิมพัลส์สับที่หลังคลื่น.....	15
2.8 อิมพัลส์สวิตชิงเต็ม.....	16
2.9 การวิเคราะห์คลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเมื่อมีการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกิน.....	17
3.1 อัลกอริทึมของโปรแกรมหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์.....	20
3.2 ทิศทางการค้นหาเพื่อหาจุดเริ่มต้นและเพื่อจำแนกรูปคลื่น.....	23
3.3 รูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นบริเวณค่ายอดของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8.....	26
3.4 รูปคลื่นเฉลี่ยส่วนหลังคลื่นเพื่อการคำนวณ $t_{50}$ ของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8.....	26
3.5 การเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นเพื่อวิเคราะห์การแกว่งที่หน้าคลื่นของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11.....	27
3.6 การเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นเพื่อวิเคราะห์การแกว่งที่หน้าคลื่นของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13.....	28
3.7 ผลการกรองช่วงหน้าคลื่นโดยใช้พารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1 และอันดับ 1 ของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8.....	28
3.8 การคำนวณ $t_{01}$ โดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันช่วงหน้าคลื่นของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6.....	32
3.9 การคำนวณ $t_{01}$ โดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันช่วงหน้าคลื่นของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 12.....	32
3.10 อัลกอริทึมของคาร์ลมานฟิลเตอร์แบบขยายสำหรับโปรแกรมที่นำเสนอ.....	33
3.11 การเลือกจุดเพื่อประดิษฐ์ฟังก์ชันส่วนหน้าคลื่น.....	37
3.12 การหาเวลาถึงตอนสับของรูปคลื่นสับ.....	39
3.13 ส่วนตกค้างของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 9.....	40
3.14 ส่วนตกค้างของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11.....	41
4.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรมวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์.....	42
4.2 ขั้นตอนแรกเริ่มจากการเปิดไฟล์ข้อมูลที่มีนามสกุล “dat”.....	43
4.3 โปรแกรมอ่านไฟล์ข้อมูล ทำให้เป็นบรรทัดฐานและแสดงผล.....	43

รูปที่	หน้า
4.4 โปรแกรมเสร็จสิ้นการคำนวณหาพารามิเตอร์และแสดงผล.....	44
5.1 ผลของการเลือกจุดบริเวณหน้าคลื่นในการประดิษฐ์ฟังก์ชัน.....	62
ก.1 หน้าจอแรกของโปรแกรม TDG.....	67
ค.1 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 2.....	71
ค.2 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 7.....	72
ค.3 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 12.....	72
ค.4 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1 บริเวณค่ายอด.....	73
ค.5 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6 บริเวณค่ายอด.....	73
ค.6 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 3 บริเวณค่ายอด.....	74
ค.7 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8 บริเวณค่ายอด.....	74
ค.8 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 4 บริเวณค่ายอด.....	75
ค.9 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 9 บริเวณค่ายอด.....	75
ค.10 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11 บริเวณค่ายอด.....	76
ค.11 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11 บริเวณหน้าคลื่น.....	76
ค.12 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13 บริเวณหน้าคลื่น.....	77
ค.13 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13 บริเวณค่ายอด.....	77
ค.14 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14 บริเวณค่ายอด.....	78
ค.15 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14 บริเวณหน้าคลื่น.....	78
ค.16 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5 บริเวณค่ายอด.....	79
ค.17 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5 บริเวณจุดเริ่มต้นจริง.....	79
ค.18 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 10 บริเวณจุดเริ่มต้นจริง.....	80
ค.19 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 10 บริเวณค่ายอด.....	80
จ.1 แสดงจุดที่ได้จากการประดิษฐ์ฟังก์ชัน.....	82
จ.2 ทิศทางการค้นหาของวิธี L.M.....	85
ฉ.1 วงจรกรองแบบผ่านต่ำในอุดมคติ.....	88
ฉ.2 ผลตอบสนองอิมพัลส์และขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแบบผ่านต่ำ ซึ่งออกแบบโดยวิธีหน้าต่างสี่เหลี่ยมที่ $N = 41$ และ $N = 121$ .....	90
ฉ.3 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของหน้าต่างสี่เหลี่ยม (ซ้าย) และหน้าต่างแฮมมิง (ขวา).....	91
ฉ.4 ขนาดผลตอบสนองทางความถี่ของหน้าต่างสี่เหลี่ยม (ซ้าย) และหน้าต่างแฮมมิง (ขวา).....	92
ฉ.5 การกรองของวงจรกรองชนิดทำให้รูปคลื่นเรียบที่ $d = 0,1$ และ 2 ตามลำดับ.....	92

รูปที่	หน้า
ฉ.6 การเปรียบเทียบขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของเอสจีฟิลเตอร์ที่สภาวะคงตัว ที่อันดับต่างๆที่ $N = 7$ และ $N = 15$ .....	103
ฉ.7 กระบวนการคำนวณของเอสจีฟิลเตอร์สำหรับค่า $L=10$ และ $N = 5$ .....	107
ฉ.8 อัลกอริทึมของคาร์ลมันฟิลเตอร์.....	112



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 1

### บทนำ

ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ดีจะต้องทำให้ผู้ใช้มั่นใจได้ว่าจะมีไฟฟ้าใช้ตลอดเวลาที่ระดับแรงดันคงที่ ฉะนั้น ระบบส่งจ่ายดังกล่าวจะต้องมีความเชื่อถือได้สูงและมีเสถียรภาพที่มั่นคง นั่นคือต้องมีระบบป้องกันการเกิดผิดปกติให้เกิดผลกระทบกระเทือนต่อระบบ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำมาใช้ต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วคราวทั้งจากภายในและภายนอก ทนต่อสภาวะอากาศทุกรูปแบบ มีอายุการใช้งานที่ยืนยาว และไม่เป็นสาเหตุให้เกิดความผิดปกติในระบบ เพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำมาใช้ในระบบมีคุณสมบัติตามต้องการ จึงจำเป็นต้องนำมาทดสอบ การทดสอบที่กล่าวถึงในที่นี้คือการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า

มาตรฐานได้กำหนดชนิดและขนาดแรงดันที่ใช้ในการทดสอบขึ้นอยู่กับระดับการฉนวนหรือระดับแรงดันที่จะนำอุปกรณ์นั้นๆไปใช้งาน ชนิดของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบได้แก่

- ก) แรงดันกระแสสลับ (Alternating voltage)
- ข) แรงดันกระแสตรง (Direct voltage)
- ค) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse voltage)
- ง) แรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง (Switching impulse voltage)

ขั้นตอนแรกของการทดสอบอุปกรณ์ด้วยแรงดันดังกล่าวได้แก่การเลือกขนาดแรงดันตามมาตรฐาน ซึ่งขึ้นกับแรงดันระบบที่นำไปใช้งาน จากนั้นจึงจ่ายแรงดันนั้นๆกับอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบและทำการวัดแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์นั้นเพื่อนำมาวิเคราะห์ การวัดแรงดันอิมพัลส์มีความพิเศษกว่าการวัดแรงดันสูงชนิดอื่น เนื่องจากแรงดันชนิดนี้มีแบนด์วิดท์กว้างและเวลาขึ้น (Rise time) เร็ว การวัดที่ต้องการทราบการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของรูปคลื่นชนิดนี้ทำโดยการใช้ออสซิลโลสโคป ประกอบกับโวลเตจดิไวเดอร์ ในอดีต ออสซิลโลสโคปที่ใช้วัดรูปคลื่นอิมพัลส์เป็นออสซิลโลสโคปที่ทำขึ้นมาโดยเฉพาะมีชื่อว่า "อิมพัลส์ออสซิลโลสโคป" และเป็นชนิดแอนะล็อก

#### 1.1 ที่มาของปัญหา

เนื่องจากออสซิลโลสโคปที่ใช้ในระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ในอดีตเป็นชนิดแอนะล็อก ส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์รูปคลื่นที่วัดได้จากระบบวัดนี้ได้แก่การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของรูปคลื่นนั้น โดยใช้ดุลพินิจของบุคลากร ปัจจุบัน ความสามารถในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของบุคลากรดังกล่าวสามารถรวมไว้ในระบบวัดโดยการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยประกอบกับการใช้ดิจิทัลออส

ซิลโลสโคป งานวิจัยฉบับนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการหาพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

## 1.2 มาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

เนื่องจากรูปคลื่นอิมพัลส์ที่วัดได้มีความเป็นสัญญาณสุ่มเนื่องจากสัญญาณรบกวนต่างๆ ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในแต่ละห้องทดลองนั้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผู้พัฒนาซอฟต์แวร์นั้นๆ วิธีหนึ่งที่จะทำให้ทราบว่าซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมานั้นมีความถูกต้องพอเพียงหรือไม่ คือการนำซอฟต์แวร์ดังกล่าวมาทดสอบ มาตรฐานสากล (IEC Recommendation) ซึ่งเป็นที่ยอมรับของนานาชาติ ได้ออกมาตรฐานที่ใช้สำหรับทดสอบซอฟต์แวร์ที่นำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์รูปคลื่นอิมพัลส์ ได้แก่ มาตรฐาน IEC 1083-2 [1] ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้มาตรฐานนี้และมาตรฐาน IEC 60-1 [2] เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์

ในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 1083-2 นั้น กล่าวไว้ว่า ซอฟต์แวร์ที่สอดคล้องกับมาตรฐานนี้จะต้องวิเคราะห์พารามิเตอร์ของรูปคลื่นอ้างอิง (Reference waveform) ที่สร้างมาจากโปรแกรมชื่อ TDG (Test Data Generator, มีให้มาพร้อมกับมาตรฐาน IEC 1083-2) เป็นจำนวน 15 รูปคลื่นให้ได้ค่าพารามิเตอร์อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด

## 1.3 ผลการศึกษาวิจัยในอดีต

T.R. McComb และ J.E. Lagnese (1991) [3] ได้ทำการศึกษาการคำนวณหาพารามิเตอร์ของคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มโดยการคำนวณจากรูปคลื่นซึ่งได้จากการประดิษฐ์ฟังก์ชัน (Curve fitting) โดยวิธี L.M. (Levenberg - Marquardt method) ฟังก์ชันแบบจำลอง (Model function) ที่ใช้ได้แก่

$$y(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1.3.1)$$

$$y(t) = A(1 - e^{-ct})(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1.3.2)$$

$$y(t) = A(1 - e^{-ct^2})(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1.3.3)$$

$$y(t) = A(1 + e^{-ct})(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1.3.4)$$

การคำนวณในที่นี้ไม่ได้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ นั่นคือ ผู้ทำการคำนวณต้องเลือกจุดเริ่มต้นที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟังก์ชัน ฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้ จำนวนจุดที่ใช้ และค่าเริ่มต้น  $c$  (ได้แก่สมการที่ 1.3.1 ถึง 1.3.4) เมื่อแบบจำลองฟังก์ชันที่ใช้มีการใช้พารามิเตอร์  $c$  ในการประดิษฐ์ฟังก์ชัน รูปคลื่นที่ใช้ทดสอบในครั้งนั้นได้แก่

- ก ) อิมพัลส์ฟ้าผ่าเรียบ
- ข ) อิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีการแกว่ง (Oscillation) ซึ่งเกิดจากความเหนี่ยวนำในวงจร
- ค ) อิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีการแกว่งเนื่องจากคลื่นจรและมีการหน่วง (Damp)
- ง ) อิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีการแกว่งเนื่องจากคลื่นจรที่เด่นชัด

ผลสรุปได้แก่ จากการสังเกตความผิดพลาดของการใช้ฟังก์ชันแบบจำลองต่างๆในการหาพารามิเตอร์ของคลื่นอิมพัลส์ ฟังก์ชันแบบจำลองทุกฟังก์ชันใช้ได้ดีกับรูปคลื่นข้อ ก ) สมการที่ (1.3.2) ใช้ได้ดีกับรูปคลื่นในข้อ ข ) สมการที่ (1.3.3) ใช้ได้ดีกับรูปคลื่นในข้อ ค ) และ ง )

Y.M.Li, J.Kuffel และ W.Janischewskyj (1993) [4] ได้เสนอวิธีการหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากรูปคลื่นเฉลี่ยที่เขียนโดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันด้วยการใช้แบบจำลองฟังก์ชัน

$$y(t) = A(e^{-a(t-t_0)} - e^{-b(t-t_0)}) \quad (1.3.5)$$

การประดิษฐ์รูปคลื่นดังกล่าวทำเป็น 2 ครั้ง ครั้งแรกหาพารามิเตอร์  $a$  และ  $A$  จากจุดช่วงหลังคลื่น ซึ่ง  $A$  คำนวณจากการประมาณ นั่นคือ จากสมการ

$$Ae^{-a(t-t_0)} = A'e^{-a(t-s)} \quad (1.3.6)$$

โดยที่  $A' = Ae^{a(t_0-s)}$  และ  $s$  เป็นช่วงเวลาการซัดตัวอย่าง (Sampling interval) ค่า  $A$  ได้จากการประมาณ  $A' \approx A$  การคำนวณครั้งหลังหาพารามิเตอร์  $b$  และ  $t_0$  จากการใช้จุดช่วงหน้าคลื่นในการประดิษฐ์ฟังก์ชัน

J.Pe'rez และ J.Marti'nez (1996) [5] เสนอวิธีเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยของคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยใช้คาร์ลมันฟิลเตอร์แบบขยาย ฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้ได้แก่

$$y(t) = A_0(e^{-a(t+t_0)} - Be^{-b(t+t_0)})(1 - B_1e^{-c(t+t_0)^d}) \quad (1.3.7)$$

วิธีการนี้ถูกนำไปทดสอบกับรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และที่ได้จากการวัดโดยไม่มีการวิเคราะห์การแกว่งหรือส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) ผลสรุปคือความผิดพลาดในการหาค่ายอดและพารามิเตอร์ทางเวลามีค่าน้อยกว่า 0.3 % และ 2 % ตามลำดับ

SATO Shuji (1997) [6] และคณะ ได้ศึกษาการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยด้วยการประดิษฐ์ฟังก์ชันแบบให้น้ำหนักโดยใช้วิธี L.M. และวิธีนิวตันโดยใช้ฟังก์ชันแบบจำลองสมการที่ (1.3.1) ได้ผลสรุปว่า การใช้วิธีนิวตันจำเป็นต้องให้ค่าเริ่มต้นที่เป็นจุดที่ใกล้เคียงจุดที่เป็นคำตอบ และไม่ควรมียุทธศาสตร์รบกวนเกิดขึ้นกับรูปคลื่นที่นำมาพิจารณา ในขณะที่วิธี L.M. สามารถใช้กับรูปคลื่นที่มีสัญญาณรบกวนได้ วิธีทั้งสองได้นำมาทดสอบกับรูปคลื่นอ้างอิงทุกรูปที่สร้างจากโปรแกรม TDG โดยใช้วิธีนิวตันกับรูปคลื่นที่ไม่มีสัญญาณรบกวน และใช้วิธี L.M. กับรูปคลื่นที่มีสัญญาณรบกวน ผลที่ได้สอดคล้องกับมาตรฐาน แต่การตั้งค่าช่วงเวลาในการชักตัวอย่างในที่นี้ไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับรูปคลื่นที่พิจารณา

Oliveira V.R. และ Miranda G.C. (1997) [7] ได้เสนอการใช้ เอสจีฟิลเตอร์ซึ่งเป็นวงจรกรองแบบดิจิทัล (Digital filter) ชนิดหนึ่งในการเขียนรูปคลื่นที่เรียบขึ้น และได้นำมาทดสอบกับรูปคลื่นที่สร้างมาจากโปรแกรม TDG ในกรณีที่มีการแกว่งบริเวณหน้าคลื่น บริเวณค้ำยอด และมีส่วนพุ่งเกินบริเวณค้ำยอด แต่ไม่ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์จากรูปคลื่นที่เขียนโดยวิธีดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบว่าสอดคล้องกับมาตรฐานหรือไม่ ผลสรุปได้แก่การใช้วิธีดังกล่าวให้ผลดีเมื่อพิจารณาจากการสังเกตด้วยบุคคล และยังสามารถนำมาใช้เป็นวิธีเริ่มต้นก่อนการนำไปหารูปคลื่นเฉลี่ย

F.Garnacho และคณะ (1997) [8] ได้เสนอกระบวนการในการหาพารามิเตอร์ของคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้าในกรณีที่คลื่นนั้นมีการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกิน การพิจารณาเริ่มต้นจากการที่ต้องทราบว่ารูปคลื่นที่นำมาพิจารณาที่มีการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินหรือไม่ ในกรณีนี้ได้เสนอว่าต้องพิจารณาจากส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งจำเป็นต้องมีการหารูปคลื่นเฉลี่ยก่อน หรือการหาการแกว่งนั้นโดยตรงโดยการใช้วิธี FFT ถ้ามีการแกว่งที่ส่วนตกค้างนั้นให้เขียนรูปคลื่นเฉลี่ยผ่านการแกว่งนั้น (รูปคลื่นเฉลี่ยในที่นี้อาจมีส่วนพุ่งเกินซ้อนทับอยู่) เพื่อนำมาวิเคราะห์ส่วนพุ่งเกินต่อไป การวิเคราะห์ส่วนพุ่งเกินพิจารณาจากรูปคลื่นที่ได้จากการประดิษฐ์เพียงในส่วนหลังคลื่น โดยพิจารณาค้ำยอด ถ้าค้ำยอดสูงกว่าเส้นที่ได้จากการประดิษฐ์ดังกล่าว ถือว่ามีส่วนพุ่งเกิน การคำนวณพารามิเตอร์จากข้อมูลดิบทำการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่น (Local mean curve) โดยวิธีประดิษฐ์ฟังก์ชันหรือการใช้วงจรกรองแบบดิจิทัลช่วย

J.Pe'erez และ J.Marti'nez (1998) [9] ได้เสนอการวิเคราะห์ส่วนพุ่งเกินของคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้าโดยใช้คาร์ลมันฟิลเตอร์ สิ่งที่น่าเสนอได้แก่การเริ่มจากการวิเคราะห์ว่ารูปคลื่นที่บันทึกได้มีส่วนพุ่งเกินหรือไม่โดยวิธีที่ได้จากการนำเสนอของ F.Garnacho และคณะ (1997) จากนั้นใช้คาร์ลมันฟิลเตอร์เขียนรูปคลื่นเฉลี่ย 2 รูปโดยใช้สมการที่ 1.3.7 รูปแรกเป็นรูปคลื่นเฉลี่ยแทนคลื่นอิมพัลส์ที่มีส่วนพุ่งเกินซ้อนทับอยู่ ในที่นี้ ค่า B มีค่าเป็นลบ รูปที่สองเป็นรูปคลื่นเฉลี่ยแทนคลื่นอิมพัลส์ที่ไม่มีส่วนพุ่งเกิน ในที่นี้ ค่า B มีค่าบวก สุดท้ายได้แก่การคำนวณช่วงเวลาการเกิดของส่วนพุ่งเกินโดยพิจารณาจากรูปคลื่นเฉลี่ยทั้ง 2 ดังกล่าว



Arne P. Brede (1999) [10] และคณะได้นำเสนอฟังก์ชันแบบจำลองใหม่เพื่อนำไปประดิษฐ์ในการหารูปคลื่นเฉลี่ยของคลื่นนิมพัลส์ฟ้าผ่า ฟังก์ชันดังกล่าวได้แก่

$$ก) y(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + B(1 - \cos(\omega t)) \cdot e^{-ct}$$

$$ข) y(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + B\sin(\omega t) \cdot e^{-ct}$$

$$ค) y(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + B(1 - \cos(\omega t)) \cdot e^{-ct} + C\sin(\omega t) \cdot e^{-ft}$$

การทดสอบทำโดยประดิษฐ์ฟังก์ชันแบบจำลองทั้งสามโดยเทียบกับฟังก์ชันแบบจำลองในสมการ (1.3.1) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ฟังก์ชันแบบจำลองจากสมการ (1.3.1) ให้ความผิดพลาดสูงสุดและฟังก์ชันแบบจำลองที่นำเสนอให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Leopoldo Angrisani และคณะ (1999) [11] ได้เสนอวิธีการใช้วิธีเวฟเล็ทช่วยหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นนิมพัลส์ฟ้าผ่าที่สร้างจากโปรแกรม TDG ผลการทดลองให้ผลสอดคล้องกับมาตรฐาน ยกเว้นรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 4,9 และ 14 ซึ่งต้องนำวิธีดังกล่าวมาพัฒนาต่อไป

Toshiji Kato และ Tomoyuki Akahane (1999) [12] ได้เสนอวิธีการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยของคลื่นนิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยใช้วิธีเทคนิคนั้น ซึ่งรูปคลื่นเฉลี่ยที่เขียนขึ้นมีความเหมาะสมหรือไม่เมื่อเทียบจากการสังเกตของบุคคล ขึ้นอยู่กับการเลือกพารามิเตอร์บางค่าของวิธีนี้โดยไม่ได้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ นั่นคือ เลือกโดยบุคลากร จากการนำวิธีนี้ไปทดสอบกับรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14 ซึ่งสร้างจากโปรแกรม TDG ผลที่ได้คือค่ายอดไม่สอดคล้องกับมาตรฐาน วิธีนี้ยังต้องการการพัฒนาต่อไป

## 1.4 การศึกษาวิจัยในครั้งนี

เนื่องจากงานวิจัยในอดีตพยายามหาวิธีการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยของคลื่นนิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อใช้ในการหาพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน วิธีที่พบมากที่สุดได้แก่วิธีการประดิษฐ์ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมเมื่อเราทราบรูปร่างทางคณิตศาสตร์ของรูปคลื่นที่วัดได้ แต่สิ่งที่สำคัญและจำเป็นที่สุดในการคำนวณด้วยวิธีการประดิษฐ์ฟังก์ชัน ได้แก่การเลือกค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมและการเลือกจุดเพื่อนำไปประดิษฐ์ฟังก์ชัน ซึ่งไม่มีบทความใดเปิดเผยถึงการวิเคราะห์สิ่งดังกล่าวนี้ นอกจากนี้ บางงานวิจัยในอดีตกล่าวถึงการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยในการวิเคราะห์รูปคลื่นตัดโดยใช้ฟังก์ชันแบบจำลองเดียวกับกรณีรูปคลื่นเต็ม แต่ไม่มีบทความใดกล่าวถึงการวิเคราะห์ เนื่องจากคลื่นตัดที่โปรแกรม TDG สร้างขึ้นมาเป็นคลื่นตัดช่วงหน้าคลื่น ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับคลื่นเต็มในที่นี้จึงใช้ไม่ครบทุกพารามิเตอร์ กล่าวคือ การนำฟังก์ชันแบบจำลองสำหรับรูปคลื่นเต็มมาประยุกต์ใช้กับรูปคลื่นตัดต้องมีการดัดแปลงบางส่วน

ดังนั้น สิ่งที่ต้องทำการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงได้แก่

- ก ) เลือกฟังก์ชันแบบจำลองที่เหมาะสม
- ข ) วิเคราะห์หาค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมในการประดิษฐ์ฟังก์ชัน
- ค ) วิเคราะห์การหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นตัด (ช่วงหน้าคลื่น)
- ง ) ทำการรวบรวมข้อมูลเพื่อพัฒนาโปรแกรมที่ทำงานได้โดยอัตโนมัติ
- จ ) เวลาที่ใช้คำนวณของโปรแกรมต้องอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

## 1.5 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาโปรแกรม ที่สามารถใช้หาพารามิเตอร์ของแรงดันทดสอบอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ซึ่งได้แก่ ค่ายอด เวลาหน้าคลื่น เวลาหลังคลื่น ที่บันทึกได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคปแบบ 8 หรือ 10 บิต ได้อย่างถูกต้อง

## 1.6 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

เนื่องจากรูปคลื่น 15 รูปคลื่นจากมาตรฐาน IEC1083-2 มีทั้งคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า อิมพัลส์สวิตชิ่ง และอิมพัลส์กระแส ซึ่งรูปคลื่นทั้ง 3 มีรูปร่างต่างกัน ทั้งนี้ อัลกอริทึมที่ใช้สำหรับรูปคลื่นทั้ง 3 ประเภทนี้มีความต่างกันขึ้นอยู่กับรูปร่างของรูปคลื่นนั้นๆ การนำไปใช้ในการทดสอบที่ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยส่วนมากแล้ว จะใช้คลื่นอิมพัลส์เต็ม (Full impulse wave) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจำกัดการศึกษาเฉพาะรูปคลื่นเต็มจำนวน 8 รูปคลื่น

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การหาพารามิเตอร์โดยการใช้ซอฟต์แวร์มีข้อดีคือค่าที่คำนวณได้มีความสม่ำเสมอและมีความถูกต้องมากขึ้น เราสามารถนำอัลกอริทึมที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปประยุกต์ใช้กับการหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์กระแส และสามารถพัฒนาต่อโดยการเชื่อมต่อกับดิจิตอลออสซิลโลสโคปเพื่อนำไปใช้งานได้จริง ทำให้ระบบวัดมีความเชื่อมั่นได้สูงขึ้น

## 1.8 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทแบ่งเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงระบบวัดแรงดันอิมพัลส์และแสดงรูปร่างของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ (ทางทฤษฎี) และตามมาตรฐาน รวมทั้งการหาพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60-1 บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ต่างๆที่มีในมาตรฐาน IEC 1083-2 โดยทฤษฎีที่ใช้ได้แก่ วงจรกรองแบบผ่านต่ำ (Lowpass filter) วงจรกรองชนิดทำให้เรียบ (Smoothing filter) คาล์มานฟิลเตอร์ และการประดิษฐ์ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นแบบกำลังสองน้อยสุด (Nonlinear least square curve fitting) ได้กล่าวในภาคผนวก จ และ ฉ บทที่ 4 กล่าวถึงการนำโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาคำนวณหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นที่สร้างจากโปรแกรม TDG พร้อมทั้งแสดงผลลัพธ์ บทที่ 5 กล่าวถึง สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

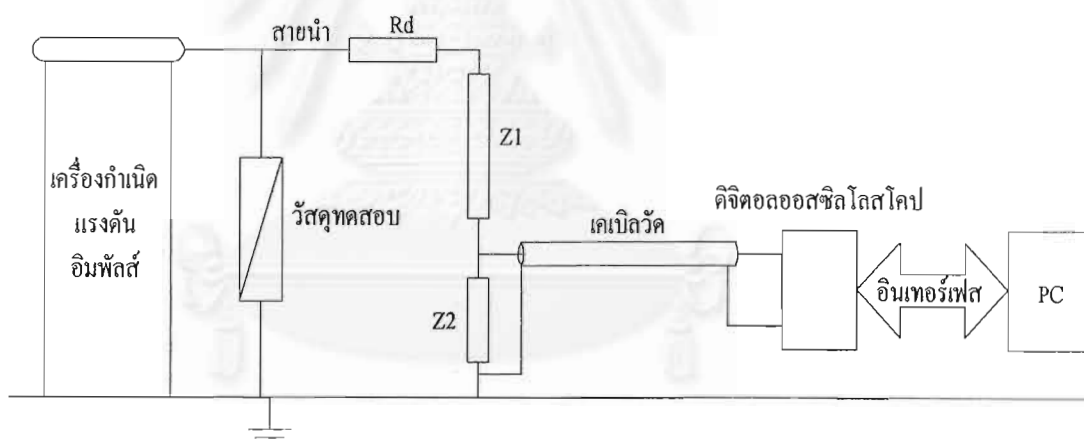
## บทที่ 2

### ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์และรูปคลื่นมาตรฐาน

เนื่องจากการวิเคราะห์รูปคลื่นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการรูปคลื่นที่ทราบการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นตามเวลา ดังนั้นการวัดแรงดันอิมพัลส์ที่เราสามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามเวลาทำได้ทางเดียว โดยการใช้ออสซิลโลสโคปประกอบกับโวลเทจดีไวเดอร์ ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักได้แก่

- ก) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage Generator)
- ข) โวลเทจดีไวเดอร์
- ค) ออสซิลโลสโคป

ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

## 2.1 ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

### 2.1.1 การกำหนดรูปร่างของแรงดันอิมพัลส์ [13]

แรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง แรงดันชนิดแรกเป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันที่เกิดจากเหตุภายนอกได้แก่ฟ้าผ่า แรงดันชนิดหลังเป็นแรงดันที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือ

เกิดจากการทำงานของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบ รูป ลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นจากห้องทดลอง ตามมาตรฐาน IEC กำหนดด้วย

ก ) ขนาดแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอด (Peak value) ของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่รูปคลื่นที่วัดได้มีคลื่นระลอก ซึ่งเกิดจากการแกว่ง (Oscillation) บริเวณยอดคลื่น มาตรฐานได้กำหนดแนวทางในการวิเคราะห์หาค่ายอดซึ่งจะกล่าวต่อไป

ข ) ขั้วของแรงดัน

ค ) เวลาหน้าคลื่น (Front time:  $T_1$ , สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า) หรือเวลาถึงค่ายอด (Time to peak :  $T_p$ , สำหรับแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์) หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มจากศูนย์จนถึงค่ายอด

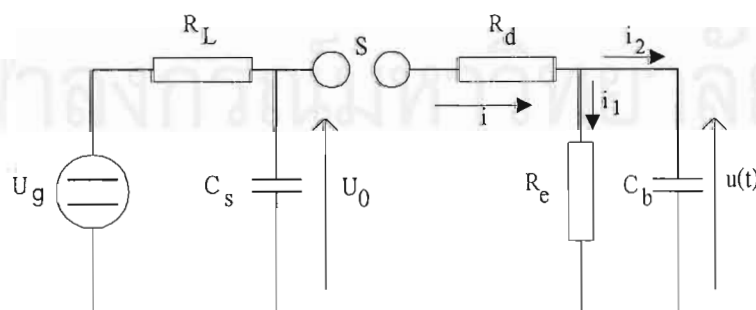
ง ) เวลาถึงกึ่งค่ายอด (Time to half-value :  $T_2$ ) หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มจากศูนย์ ผ่านค่ายอด จนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

จ ) เวลาถึงตอนสับ (Time to chopping :  $T_c$ , สำหรับรูปคลื่นตัดเท่านั้น) ในบางกรณีที่เกิดจนวนของอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบทนต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปไม่ได้ จึงเกิดการสปาร์คผ่าน เกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรคดาวนั้นผ่าทะลุทำให้เกิดลัดวงจร ณ.จุดนั้น รูปคลื่นที่วัดได้จึงไม่ใช่รูปคลื่นเต็ม ไม่สามารถกำหนดด้วยเวลาหลังคลื่นได้ จึงกำหนดด้วยเวลาคืนตัดแทน

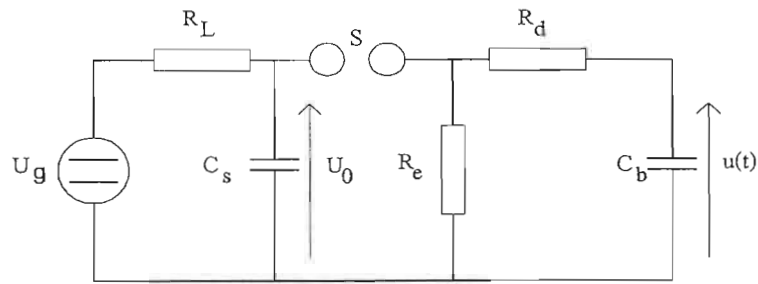
### 2.1.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ [13]

โดยทั่วไปแรงดันอิมพัลส์มักสร้างจากวงจร RC โดยอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ แล้วคายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลา (Time constant) ให้ได้รูปคลื่นตามที่ต้องการ

วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มี 2 แบบดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ A



รูปที่ 2.3 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ B

ความหมายในรูปวงจร A และ B

- $U_g$  = แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย
- $U_0$  = แรงดันอัดประจุกระแสตรง
- $C_s$  = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์
- $C_b$  = โหลดตัวเก็บประจุ (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)
- $R_L$  = ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
- $R_d$  = ความต้านทานหน่วง
- $R_e$  = ความต้านทานปล่อยประจุ
- $U(t)$  = แรงดันอิมพัลส์ที่แปรตามเวลา
- $S$  = สปาร์คแกป

การทำงานของเริ่มจากการที่แรงดันอัดประจุ  $U_g$  ป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ ผ่านความต้านทาน  $R_L$  จนกระทั่งได้แรงดันที่ต้องการ  $U_0$  ซึ่งแรงดันที่ต้องการนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของสปาร์คแกป  $S$  ที่ปรับค่าได้เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้มากน้อยตามต้องการ เมื่อเกิดการสปาร์คแล้ว ตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$  จะถ่ายทอดประจุผ่านตัวต้านทาน  $R_d$  ไปยังโหลดตัวเก็บประจุ  $C_b$  ความเร็วของการถ่ายทอดประจุนี้สามารถปรับได้ที่ตัวต้านทาน  $R_d$  ซึ่งมีผลต่อเวลาหน้าคลื่น เมื่อ  $C_s$  ถ่ายประจุให้  $C_b$  เต็มที่แล้ว ประจุนี้ก็จะดีสชาร์จออกไปสู่ตัวต้านทาน  $R_e$  จะเห็นได้ว่า ความเร็วของการดีสชาร์จดังกล่าวขึ้นอยู่กับขนาดของตัวต้านทาน  $R_e$  ซึ่งมีผลต่อเวลาหลังคลื่น

ในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะใช้วงจรที่ได้กล่าวมาเป็นวงจรสร้าง ในกรณีที่ต้องการแรงดันสูงมาก เราอาจใช้วงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์หลายชั้นโดยการนำวงจรอิมพัลส์พื้นฐานหลายๆชั้นมาต่อกันตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ (Marx's Circuit) สำหรับการสร้างแรงดัน

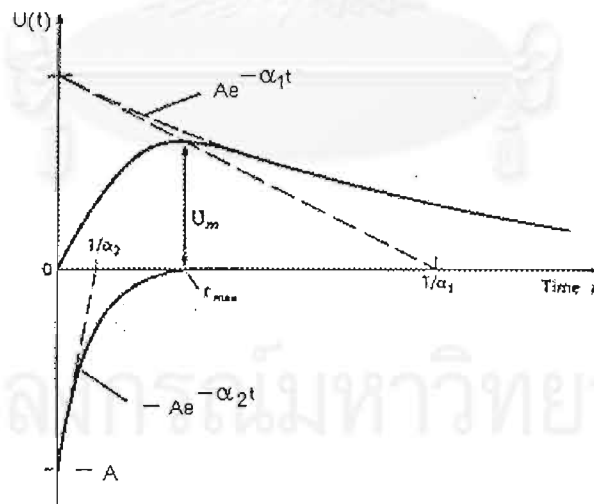
อิมพัลส์สวิตชิ่งโดยทั่วไปสร้างจากวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์พื้นฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้นโดยการปรับค่า  $R_d$  และ  $R_e$  เพื่อให้ได้รูปร่างลักษณะที่ต้องการ

การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จากวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 แสดงให้เห็นว่าแรงดันอิมพัลส์  $U(t)$  ที่ได้มีรูปร่างเป็นฟังก์ชันดังนี้

$$U(t) = A(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (2.1.1)$$

โดยที่  $A$  เป็นค่าคงที่ขึ้นกับขนาดแรงดัน,  $1/\alpha_1$  และ  $1/\alpha_2$  เป็นค่าคงตัวเวลา

เราสามารถนำความรู้นี้ช่วยในการหารูปร่างของคลื่นอิมพัลส์ที่บันทึกได้จากดิฟเฟอเรนเชียลลอสมัลโคปโดยวิธีประดิษฐ์ฟังก์ชันดังจะกล่าวในบทต่อไป รูปร่างของแรงดันอิมพัลส์จากสมการ (2.1.1) แสดงดังภาพสเก็ตในรูป 2.4 จะเห็นว่า เราสามารถปรับค่าคงตัวเวลาเพื่อให้ได้รูปร่างของแรงดันที่ต้องการ ในทางปฏิบัติ ค่าคงตัวเวลาเหล่านี้ขึ้นอยู่กับค่าของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในวงจรกำเนิด ในการทดสอบใดๆ มาตรฐานได้กำหนดรูปคลื่นมาตรฐานสำหรับใช้ในการทดสอบ ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันใช้งานจริง เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ต้องสร้างแรงดันให้มีรูปร่างสอดคล้องกับที่มาตรฐานกำหนดโดยการปรับค่าของอุปกรณ์ไฟฟ้าดังกล่าว จึงจะสามารถใช้ทดสอบได้



รูปที่ 2.4 รูปร่างเกิดสมการทางคณิตศาสตร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์

### 2.1.3 โวลเตจดีไวเดอร์และออสซิลโลสโคป

เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์และออสซิลโลสโคปไม่ได้อยู่ในขอบเขตเกี่ยวข้องกับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ จึงขอกล่าวโดยคร่าว ๆ ดังนี้

#### 2.1.3.1 โวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ซึ่งทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้เครื่องมือวัดแรงดันต่ำวัดได้ โดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูงต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัด แล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่เพียงส่วนน้อยออกมาวัด เครื่องมือวัดแรงดันต่ำที่นำมาต่อเข้ากับดีไวเดอร์นั้นต้องเป็นเครื่องมือที่ใช้พลังงานน้อยที่สุดหรือมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงมาก ๆ เพื่อให้การวัดเป็นไปอย่างเที่ยงตรงที่สุด

#### 2.1.3.2 ออสซิลโลสโคป

การเลือกแบนด์วิธของออสซิลโลสโคปขึ้นกับชนิดของรูปคลื่นที่ต้องการวัด เนื่องจากชนิดของรูปคลื่นอิมพัลส์ที่มีแบนด์วิธกว้างที่สุดได้แก่คลื่นอิมพัลส์สับ ดังนั้นออสซิลโลสโคปที่ใช้วัดคลื่นอิมพัลส์จึงต้องมีแบนด์วิธกว้าง ในอดีตออสซิลโลสโคปที่ใช้วัดรูปคลื่นอิมพัลส์เป็นแบบแอนะล็อกที่สร้างขึ้นมาโดยเฉพาะ และการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นต้องใช้บุคลากร ซึ่งทำให้พารามิเตอร์ที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอ ปัจจุบันมีการนำดิจิตอลออสซิลโลสโคปมาใช้ในห้องทดลองมากขึ้น เนื่องจากดิจิตอลออสซิลโลสโคปสมัยใหม่มีความสามารถหลายอย่าง ทั้งยังสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเพื่อนำข้อมูลที่วัดได้มาประมวลผลทางคณิตศาสตร์โดยใช้ซอฟต์แวร์

## 2.2 คลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน

คลื่นอิมพัลส์มาตรฐานเป็นรูปคลื่นที่มาตรฐานกำหนดรูปร่างไว้สำหรับการทดสอบ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวกำหนดรูปคลื่นมีดังนี้

ก ) ค่ายอด ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันใช้งานของอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบ ที่ระดับแรงดันใช้งานน้อยกว่า 300 kV เราจะทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่ระดับแรงดันมากกว่าหรือเท่ากับ 300 kV เราจะทดสอบอุปกรณ์นั้นด้วยแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าและอิมพัลส์สวิตซ์ ซึ่ง สำหรับการเลือกขนาดของค่ายอดแรงดันขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่จะนำอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ ไปใช้งานซึ่งมาตรฐานได้กำหนดเป็นตารางไว้แล้ว เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้



เกี่ยวข้องกับการเลือกค่ายอดของแรงดันทดสอบ จึงไม่ขอกว่าในที่นี้ ในการสร้างรูปคลื่นให้มีค่ายอดตามมาตรฐาน มาตรฐานกำหนดให้มีความผ่อนผัน (Tolerance) สำหรับค่านี้ 3%

ข ) สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆสำหรับคลื่นอิมพัลส์เต็มตามมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เวลาหน้าคลื่น (เวลาถึงค่ายอด) และเวลาถึงกึ่งค่ายอดของคลื่นอิมพัลส์เต็ม มาตรฐาน

รูปคลื่น	$T_1$ (หรือ $T_p$ )( $\mu$ sec)	$T_2$ ( $\mu$ sec)
แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	$1.2 \pm 0.36$	$50 \pm 10$
แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง	$250 \pm 50$	$2500 \pm 1500$

## 2.3 การหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-1 [2]

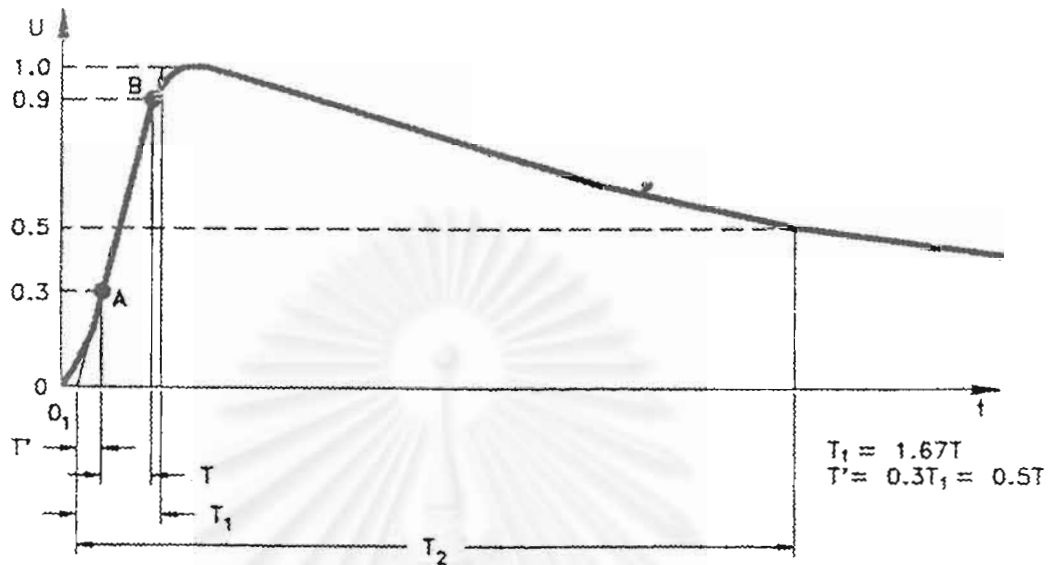
### 2.3.1 อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม (Full lightning impulse)

อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มแสดงดังรูป 2.5 จากรูป พารามิเตอร์ต่างๆคำนวณดังนี้

ก ) ค่ายอดคือค่ายอดของรูปคลื่นเต็ม

ข ) เวลาหน้าคลื่น =  $1.67T$  โดยที่  $T$  เป็นผลต่างของเวลาที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 30% ของค่ายอดกับ และ เวลาที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 90% ของค่ายอด ทั้งนี้สมมุติว่าจุดเริ่มต้นเป็นจุดที่แรงดันมีค่าเป็นศูนย์โดยคำนวณจากเส้นตรงที่ลากผ่านจุด 2 จุดที่นำมาคำนวณค่า  $T$  ดังกล่าว เราเรียกจุดเริ่มต้นนี้ว่าจุดเริ่มต้นเสมือน (Virtual Origin ,  $O_1$ )

ค ) เวลาถึงกึ่งค่ายอด เป็นเวลาจากจุดเริ่มต้นเสมือน ผ่านค่ายอด จนถึงจุดที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 50% ของค่ายอด



รูปที่ 2.5 อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

### 2.3.2 อิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ (Chopped lightning impulse)

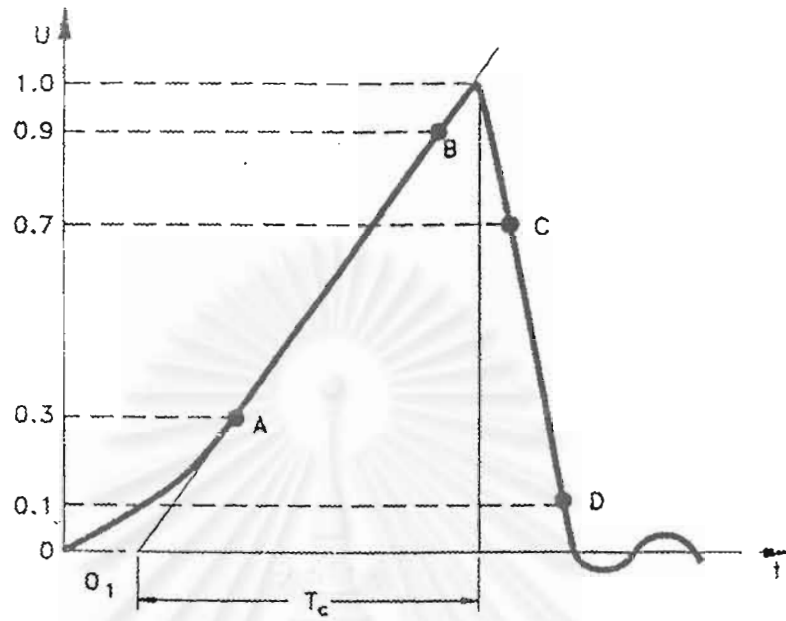
อิมพัลส์ฟ้าผ่าสับมี 2 ชนิดได้แก่ อิมพัลส์สับที่หน้าคลื่นและ อิมพัลส์สับที่หลังคลื่น ดังแสดงในรูป 2.6 และ 2.7 จากรูป พารามิเตอร์ต่างๆคำนวณดังนี้

ก) ค่ายอดคือค่ายอดของรูปคลื่นสับ

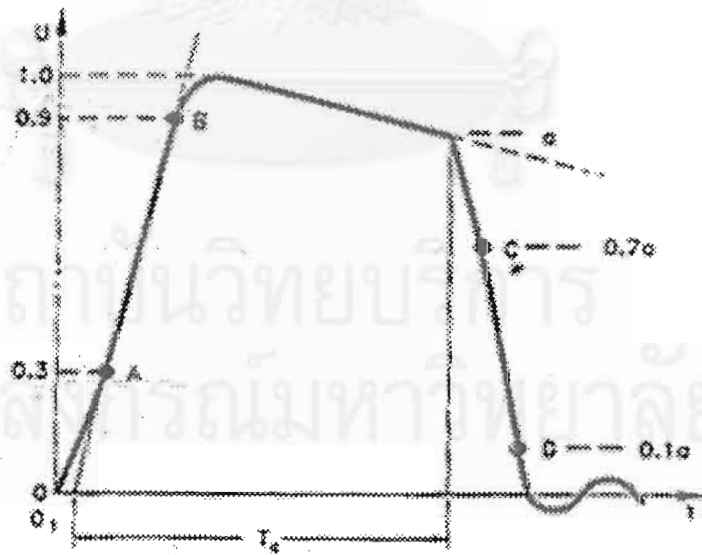
ข) เวลาหน้าคลื่นคำนวณเช่นเดียวกับคลื่นเต็ม

ค) เวลาถึงตอนสับคือช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือนจนถึงเวลาที่เริ่มเกิดเบรคดาว์นของฉนวนเมื่อฉนวนนั้นทนแรงดันไม่ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 อิมพัลส์สับที่หน้าคลื่น

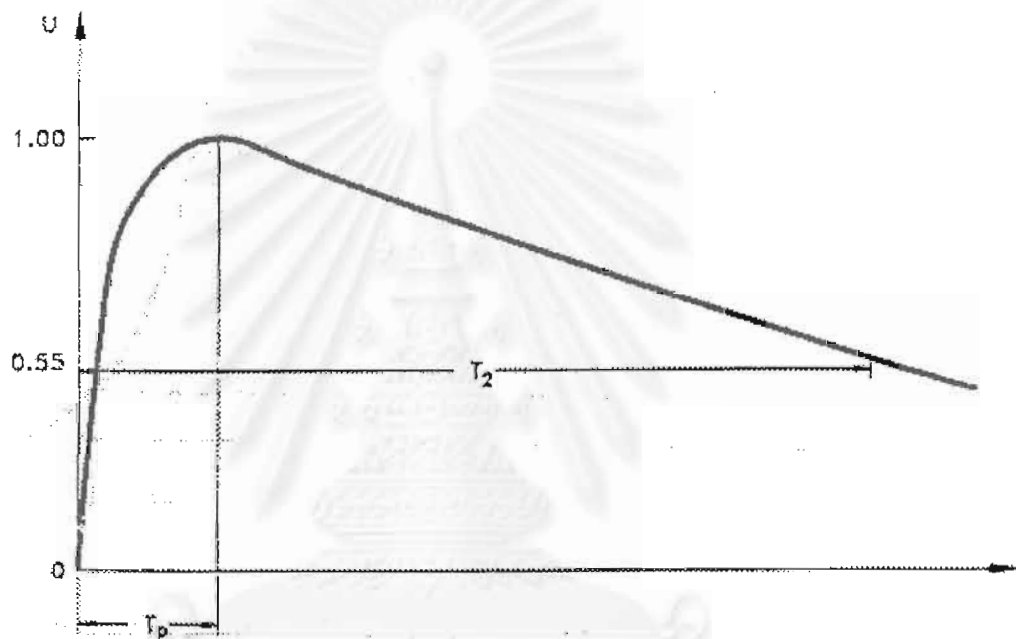


รูปที่ 2.7 อิมพัลส์สับที่หลังคลื่น

### 2.3.3 อิมพัลส์สวิตชิ่งเต็ม (Full switching impulse)

อิมพัลส์สวิตชิ่งเต็มแสดงดังรูป 2.8 จากรูป พารามิเตอร์ต่างๆคำนวณดังนี้

- ก) ค่ายอดคือค่ายอดของรูปคลื่นตัด
- ข) เวลาถึงค่ายอด คือช่วงเวลาระหว่างจุดเวลาเริ่มต้นจริง (Real Origin) กับจุดเวลาที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับค่ายอด
- ง) เวลาถึงกึ่งค่ายอด คือช่วงเวลาระหว่างจุดเวลาเริ่มต้นจริง ผ่านค่ายอด จนถึงจุดที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 50% ของค่ายอด



รูปที่ 2.8 อิมพัลส์สวิตชิ่งเต็ม

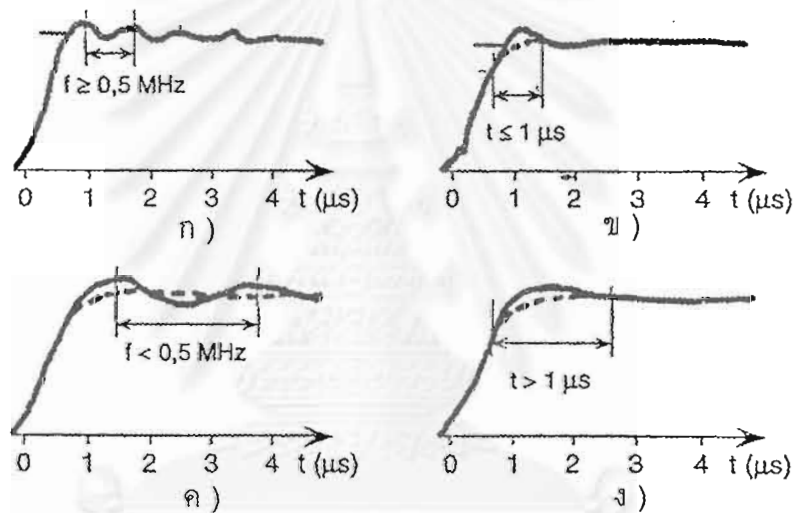
## 2.4 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มเมื่อมีการแกว่ง (Oscillation) หรือส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) ช้อนทับอยู่ [2]

เนื่องจากการคำนวณที่มาของสมการทางคณิตศาสตร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในหัวข้อ 2.1.3 ไม่ได้คำนึงถึงค่าความเหนี่ยวนำในวงจร ในทางปฏิบัติแล้ว รูปคลื่นที่บันทึกได้มักต่างจากทฤษฎีเนื่องจากวงจรมีความเหนี่ยวนำในวงจร ซึ่งมีผลให้เกิดการแกว่ง หรือส่วนพุ่งเกินที่

บริเวณค่ายอดของรูปคลื่น มาตรฐานยังได้ให้แนวทางในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆของรูปคลื่นนิมพัลส์ไฟฟ้าในกรณีเช่นนี้ดังนี้

ก) ในกรณีที่ความถี่ของการแกว่งมากกว่าหรือเท่ากับ 500 kHz หรือช่วงเวลาของการเกิดของส่วนพุ่งเกินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1  $\mu\text{sec}$  การคำนวณพารามิเตอร์ให้คำนวณจากรูปคลื่นเฉลี่ย (Mean Curve) ที่ลากผ่านการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินนั้น ดังรูปที่ 2.9 ก) และ ข)

ข) ในกรณีที่ความถี่ของการแกว่งน้อยกว่า 500 kHz หรือช่วงเวลาของการเกิดของส่วนพุ่งเกินนานกว่า 1  $\mu\text{sec}$  การคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆให้ประเมินจากข้อมูลดิบ สังเกตรูปที่ 2.9 ค) และ ง)



รูปที่ 2.9 การวิเคราะห์คลื่นนิมพัลส์ไฟฟ้าเมื่อมีการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกิน

## บทที่ 3

### การวิเคราะห์รูปคลื่นเพื่อหาพารามิเตอร์

อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับการวิเคราะห์รูปคลื่นในที่นี้ใช้แนวทางในการหาพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60-1 ดังได้กล่าวในบทที่ 2 ในการทดสอบโปรแกรมที่ใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น ในที่นี้ทดสอบด้วยมาตรฐาน IEC 1083-2 รูปคลื่นอ้างอิงสำหรับทดสอบซอฟต์แวร์ซึ่งสร้างจากโปรแกรม TDG ตามมาตรฐาน IEC 1083-2 นั้นมีจำนวน 15 รูปคลื่น ประกอบด้วย 1. คลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม 2. คลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ 3. คลื่นอิมพัลส์สวิตชิง 4. คลื่นอิมพัลส์กระแส เนื่องจากคลื่นอิมพัลส์กระแสเป็นรูปคลื่นชนิดเดียวที่มีรูปร่างทางคณิตศาสตร์ต่างกับรูปคลื่นชนิดอื่นในจำนวน 4 ชนิดดังกล่าว ในขณะที่คลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าและคลื่นอิมพัลส์สวิตชิงสามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เดียวกันโดยการเปลี่ยนค่าคงตัวเวลาให้เหมาะสมกับรูปร่างการพัฒนาในเบื้องต้นจึงเน้นที่การพัฒนาการหาพารามิเตอร์ของคลื่นอิมพัลส์ทั้ง 2 ชนิดดังกล่าวเป็นหลัก และเราสามารถนำแนวทางของอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์กับรูปคลื่นอิมพัลส์กระแสได้ในภายหลัง ทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้วิเคราะห์รูปคลื่นเหล่านี้กล่าวไว้ในภาคผนวก จ ถึงภาคผนวก ฉ เนื้อหาในบทนี้จะนำทฤษฎีดังกล่าวมาประยุกต์เพื่อวิเคราะห์รูปคลื่นดังกล่าวข้างต้น

#### 3.1 หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปคลื่น

การวิเคราะห์รูปคลื่นเพื่อหาพารามิเตอร์ตามมาตรฐานซึ่งได้กล่าวในบทที่ 2 มีสองประเภท ได้แก่ การวิเคราะห์พารามิเตอร์จากข้อมูลดิบ (Raw data) และการวิเคราะห์พารามิเตอร์จากรูปคลื่นเฉลี่ย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลของการพิจารณาความถี่การแกว่งหรือช่วงเวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน

หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์จากข้อมูลดิบได้แก่การหาพารามิเตอร์จากรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่น (Local mean curve) บริเวณจุดที่ต้องการ ในการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยในที่นี้ใช้วงจรกรองชนิดทำให้รูปคลื่นเรียบช่วยในการวิเคราะห์ ทฤษฎีและหลักการของวงจรกรองชนิดนี้กล่าวในเรื่องของวงจรกรองแบบดิจิตอลในภาคผนวก ฉ

ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์จากรูปคลื่นเฉลี่ย เราจำเป็นต้องเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยครอบคลุม (Global mean curve) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ในการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยดังกล่าว โดยทั่วไปเราสามารถใช่วงจรกรองแบบดิจิตอลช่วยในการเขียน แต่เนื่องจากดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 เรามีความรู้ล่วงหน้าว่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ใดๆที่ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีรูปร่างทาง

คณิตศาสตร์เป็นผลต่างของฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอมที่มีเวลาคงตัวต่างกัน เราจึงอาศัยความรู้ที่ช่วยโดยใช้วิธีประดิษฐ์ฟังก์ชัน (Curve fitting) ทฤษฎีของวิธีการประดิษฐ์ฟังก์ชันกล่าวไว้ในภาคผนวก จ นอกจากนี้ การหาค่าเริ่มต้นเพื่อใช้ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันมีความสำคัญ ในที่นี้ใช้คาร์ลมานฟิลเตอร์ช่วยในการหาค่าเริ่มต้น ซึ่งทฤษฎีกล่าวในภาคผนวก ฉ

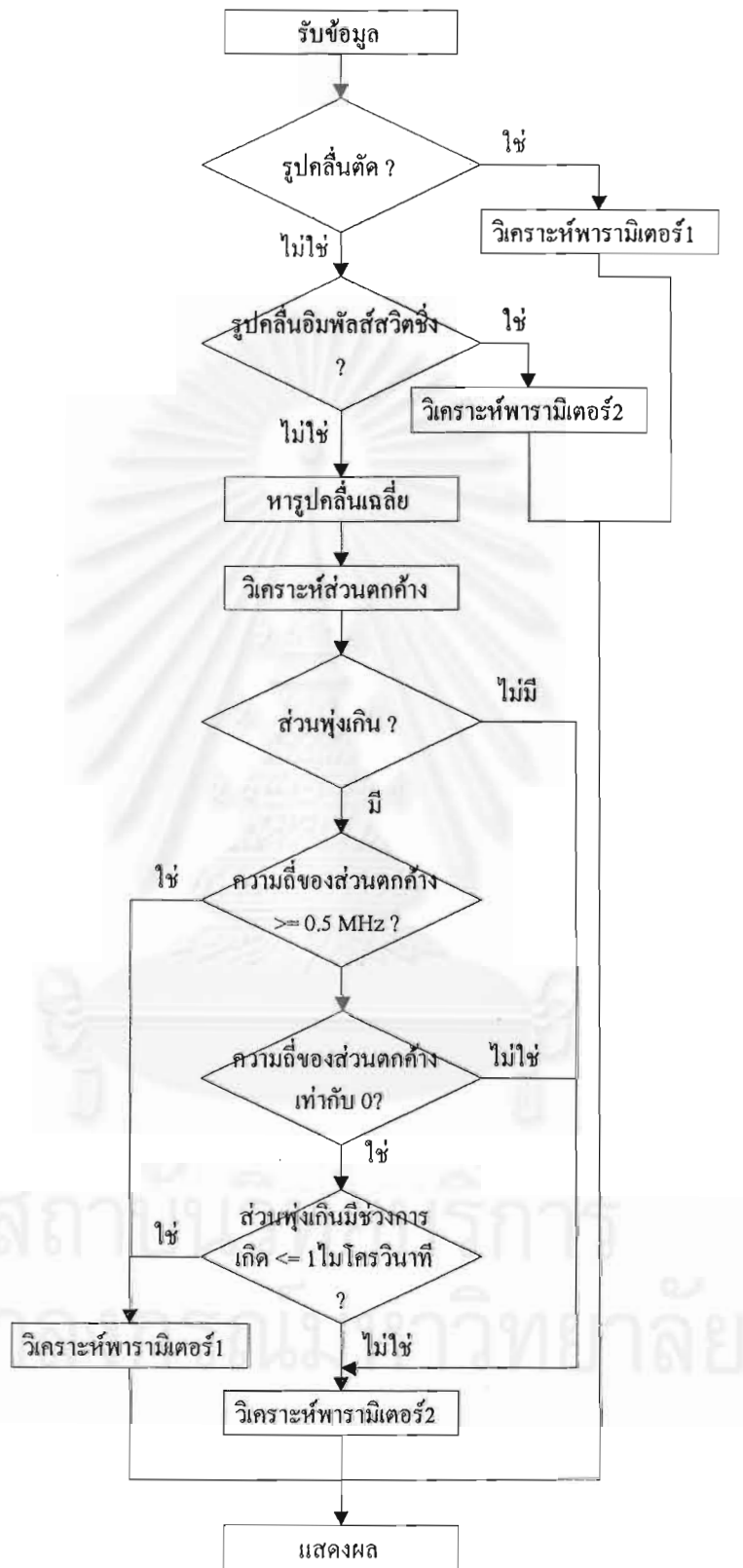
ก่อนที่จะตัดสินใจว่าควรวิเคราะห์พารามิเตอร์ด้วยวิธีใดใน 2 วิธีข้างต้น จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเสียก่อน ในการวิเคราะห์ส่วนตกค้างในที่นี้ใช้วิธี FFT (Fast Fourier Transform) โดยการพิจารณาขนาดของผลตอบสนองทางความถี่

การวิเคราะห์พารามิเตอร์โดยการวิเคราะห์ส่วนพุ่งเกินหรือการแกว่งที่ได้กล่าวข้างต้นเป็นการวิเคราะห์ของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม เนื่องจากมาตรฐานไม่มีข้อกำหนดสำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตช์ซึ่งในกรณีที่มีการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินซ้อนทับอยู่ และ โปรแกรม TDG สร้างรูปคลื่นอ้างอิงสำหรับอิมพัลส์สวิตช์ซึ่งเป็นรูปคลื่นที่ไม่มีการแกว่งและส่วนพุ่งเกิน ดังนั้น การหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตช์ในที่นี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์จากข้อมูลดิบเท่านั้นโดยไม่มี การวิเคราะห์การแกว่งและส่วนพุ่งเกินดังกล่าว ส่วนในกรณีของรูปคลื่นสับ จะใช้รูปคลื่นเฉลี่ยครอบคลุมในการหาพารามิเตอร์

อัลกอริทึมหลักที่ใช้แสดงดังรูป 3.1 โดยที่ “ วิเคราะห์พารามิเตอร์ 1 “ เป็นการหาพารามิเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเฉลี่ยและ “ วิเคราะห์พารามิเตอร์ 2 “ เป็นการหาพารามิเตอร์โดยใช้การวิเคราะห์จากข้อมูลดิบ

## 3.2 โปรแกรมที่ใช้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรม LabWindows เวอร์ชัน 5.01 สำหรับวินโดว 95 ซึ่งใช้ภาษาซีเป็นฐานในการเขียน เนื่องจากโปรแกรมนี้อาศัยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ให้เลือกใช้เป็นจำนวนมาก ทั้งยังสามารถสร้างให้เป็นโปรแกรมเดี่ยวทำงานได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ใดๆ และยังสามารถนำไปเชื่อมต่อกับดิจิตอลออสซิลโลสโคปผ่านทางพอร์ทขนาน เพื่อนำข้อมูลที่วัดได้จริงมาใช้งานได้ด้วย



รูปที่ 3.1 อัลกอริทึมของโปรแกรมหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์



### 3.3 รูปแบบของข้อมูลเข้า

เนื่องจากข้อมูลเข้าสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มาจากโปรแกรม TDG โดยการตั้งค่าต่างๆ ในโปรแกรมแล้วเก็บเป็นไฟล์ข้อมูล ดังนั้น ทุกครั้งที่นำรูปคลื่นมาทดสอบจึงต้องเรียกจากไฟล์ดังกล่าว เพื่อให้สอดคล้องกับค่าที่สามารถตั้งได้ที่ดิจิทัลออสซิลโลสโคป การตั้งค่าจึงเป็นดังนี้

ก ) จำนวนบิต : ค่าที่ตั้งไว้เท่ากับ 8 บิต แต่โปรแกรมที่เขียนขึ้นสามารถใช้กับค่า 10 บิต เช่นกัน

ข ) จำนวนจุดข้อมูล : ข้อมูลที่รับเข้ามาทั้งหมดตั้งค่าไว้ที่ 10000 จุด

ค ) จำนวนพรีทริก : จำนวนพรีทริกเท่ากับ 10 % ของจำนวนจุดข้อมูล

ง ) ระดับสัญญาณรบกวนภายใน (Internal noise) : มาตรฐาน IEC 60-2 [14] ได้กำหนดระดับสัญญาณรบกวนแทรกสอดภายใน (Internal interference) ไว้ว่าต้องน้อยกว่า 1 % ดังนั้นรูปคลื่นที่สามารถตั้งค่าสัญญาณรบกวนดังกล่าวนี้ได้จะตั้งค่าไว้มากที่สุด 1 %

จ ) อัตราการชกตัวอย่าง (Sampling rate) : สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า มาตรฐาน IEC 1083-1 [15] ได้กำหนดวิธีการหาอัตราการชกตัวอย่างไว้ดังนี้

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

โดยที่  $T_x$  เป็นช่วงเวลาระหว่าง  $T_{30}$  และ  $T_{90}$  เนื่องจากรูปคลื่นสับเป็นรูปคลื่นที่มี  $T_x$  สั้นสุด เราจึงใช้รูปคลื่นสับ (สับที่หน้าคลื่น) เป็นตัวกำหนดอัตราการชกตัวอย่าง รูปคลื่นสับที่ใช้ในทางปฏิบัติมีเวลาถึงตอนสับไม่น้อยกว่า 500 nS ดังนั้น

$$T_x = 0.6 \times 500 \times 10^{-9}$$

$$\text{อัตราการชกตัวอย่าง} \geq 100 \text{ MHz}$$

จึงตั้งอัตราการชกตัวอย่างไว้ที่ 100 MHz สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซิ่ง เนื่องจากมาตรฐานไม่ได้กำหนดอัตราการชกตัวอย่างขั้นต่ำของรูปคลื่นชนิดนี้ ผู้เขียนจึงใช้อัตราการชกตัวอย่างที่ทำให้แสดงรูปคลื่นช่วงหลังคลื่นได้ถึงอย่างน้อยเวลาที่รูปคลื่นมีขนาด 50 % ของค่ายอด ในที่นี้ใช้อัตราการชกตัวอย่าง 2 MHz

### 3.4 การจำแนกรูปคลื่นทั้ง 3 ชนิด

พิจารณารูปที่ 3.1 ส่วนแรกของอัลกอริทึมเป็นการรับข้อมูลเต็มหน่วยเข้า การรับข้อมูลในที่นี้รวมถึงการทำขนาดแรงดันและเวลาให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalize) และทำการจำแนกว่ารูป

คลื่นที่รับเข้ามาเป็นรูปคลื่นชนิดใดใน 3 ประเภทได้แก่ คลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม คลื่นอิมพัลส์สวิตซิ่งเต็ม หรือคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ

การทำขนาดให้เป็นบรรทัดฐานได้แก่การนำขนาดของรูปคลื่น ณ. เวลาต่างๆ  $A(t)$  ทำให้เป็นบรรทัดฐานโดยใช้สมการ

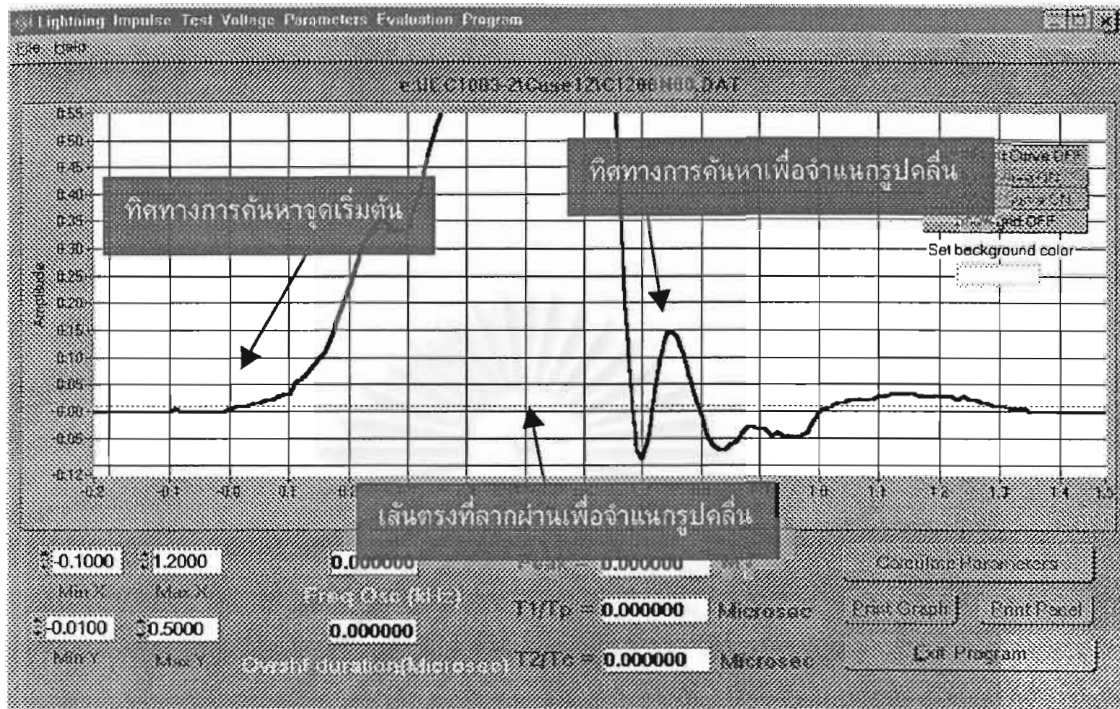
$$A(t)_{\text{Normalized}} = (A(t) - \text{base}) / \text{peak}$$

โดยที่ base ได้แก่ค่าที่คาดว่าเป็นขนาดออฟเซ็ทของรูปคลื่น ในที่นี้คำนวณจากการเฉลี่ยทางเลขคณิตจากข้อมูลจำนวน 50 % แรกของจำนวนพริทริก จำนวนพริทริกในที่นี้ใช้ 1000 จุด ดังนั้น การเฉลี่ยดังกล่าวจึงใช้ข้อมูลจำนวน 500 จุดในการคำนวณ ส่วน peak เป็นขนาดที่คาดว่าเป็นค่ายอดของรูปคลื่น ซึ่งการหาจะกล่าวต่อไป และการปฏิบัติการใด ๆ กับรูปคลื่นหลังจากนี้ จะใช้รูปคลื่นที่ผ่านการทำเป็นบรรทัดฐานแล้วเท่านั้น

การพิจารณาว่ารูปคลื่นที่รับเข้ามาเป็นรูปคลื่นสับหรือไม่อาศัยหลักการคือ เมื่อลากเส้นตรงที่มีขนาดมากกว่าศูนย์เล็กน้อยผ่านไปตามแกนเวลา ถ้าตัดจุด 2 จุด ถือว่ารูปคลื่นนั้นเป็นรูปคลื่นสับ ถ้าตัด 1 จุดถือว่าเป็นรูปคลื่นเต็ม ขั้นตอนต่อไปเป็นการพิจารณาว่ารูปคลื่นนั้นเป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซิ่งหรือไม่โดยการหาผลต่างของเวลาที่ค่ายอดและเวลาซึ่งมีขนาดเป็นศูนย์ (โดยประมาณ) หากผลต่างนั้นมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $100 \mu\text{sec}$  ถือว่ารูปคลื่นนั้นเป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซิ่งเต็ม นอกนั้น ถือว่าเป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

การเลือกจุดกำเนิด (โดยประมาณ) ของรูปคลื่นหรือเวลาซึ่งรูปคลื่นมีขนาดเท่ากับศูนย์มีความสำคัญในการจำแนกรูปคลื่น และในการประดิษฐ์ฟังก์ชัน การหาจุดดังกล่าวเริ่มจากการหาจุดซึ่งเป็นค่ายอดโดยประมาณก่อน จุดที่คาดว่าจะจะเป็นค่ายอดในที่นี้ใช้จุดสูงสุดของรูปคลื่นที่ผ่านการทำเป็นบรรทัดฐานแล้ว การเลือกจุดกำเนิดในเบื้องต้น เริ่มจากจุดที่คาดว่าจะจะเป็นค่ายอดดังกล่าว ทำการค้นหาทางซ้ายมือของแกนเวลา และให้หยุดเมื่อพบขนาดของรูปคลื่นที่มีค่าลบหรือศูนย์ จุดที่ใช้ได้แก่จุดก่อนหน้าที่จะหยุด 1 จุด พิจารณารูปที่ 3.2 แสดงทิศทางที่ใช้ในการหาจุดเริ่มต้น และทิศทางการค้นหาเพื่อจำแนกรูปคลื่นสับดังที่จะได้กล่าวต่อไป

ในการจำแนกชนิดของรูปคลื่น ดังที่ได้กล่าวข้างต้น วิธีที่ใช้ได้แก่การลากเส้นตรงผ่านรูปคลื่นดังรูป 3.2 ขนาดของเส้นตรงที่ใช้ในที่นี้ได้แก่ 0.5 % ของค่าที่คาดว่าเป็นค่ายอด ในบางกรณีที่สัญญาณรบกวนภายในอาจมีค่ามากกว่า 0.5 % ดังกล่าว เนื่องจากสัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณสุ่ม การลากเส้นในช่วงเวลาก่อนที่จะถึงค่ายอดของรูปคลื่น อาจมีการตัดมากกว่า 1 จุด การลากเส้นตรงตัดรูปคลื่นสับจึงอาจตัดมากกว่า 2 จุด ในที่นี้จึงใช้วิธีเริ่มลากเส้น 0.5 % จากค่าที่คาดว่าเป็นค่ายอด แล้วทำการค้นหาทางขวามือดังแสดงในรูป 3.2 หากพบจุดตัดถือว่ารูปคลื่นที่พิจารณาเป็นรูปคลื่นสับ หากไม่พบจุดตัดถือว่ารูปคลื่นเต็ม



รูปที่ 3.2 แสดงทิศทางการค้นหาเพื่อหาจุดเริ่มต้นและเพื่อจำแนกรูปคลื่น

### 3.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์จากข้อมูลดิบ

การวิเคราะห์พารามิเตอร์จากข้อมูลดิบที่กล่าวถึงเป็นการ “ วิเคราะห์พารามิเตอร์ 2 ” จาก รูป 3.1 การวิเคราะห์ดังกล่าวเป็นการประเมินขนาดของแรงดันที่จุดเวลาใด ๆ ที่ต้องการใช้หา พารามิเตอร์ตามมาตรฐานดังได้กล่าวในบทที่ 2 ในกรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า การวิเคราะห์ นี้จะกระทำหลังจากการวิเคราะห์การแกว่งหรือส่วนพุ่งเกิน เมื่อความถี่การแกว่งหรือช่วงเวลา การเกิดของส่วนพุ่งเกินที่วิเคราะห์ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องทำการวิเคราะห์เช่นนี้ตามมาตรฐาน ใน กรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์จึง จะกระทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์จากข้อมูลดิบทันที

เนื่องจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์จากข้อมูลดิบได้แก่การเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นบริเวณ จุดที่ต้องการทราบค่าและหาค่าที่ต้องการจากรูปคลื่นเฉลี่ยนั้น การเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นมี หลายวิธีเช่น การประดิษฐ์ฟังก์ชันในบริเวณที่สนใจ เนื่องจากการวิเคราะห์ในที่นี่ต้องการค่าที่ ใกล้เคียงกับค่าจริงของรูปคลื่นมากที่สุด การประดิษฐ์ฟังก์ชันอาจให้ค่าที่คลาดเคลื่อนได้ซึ่งขึ้น อยู่กับการเลือกจุดในการประดิษฐ์ วิธีที่ใช้ในที่นี่ได้แก่การนำวงจรกรองแบบดิจิตอลเข้ามาช่วย ซึ่งจะกล่าวต่อไป

ในกรณีของรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้า เนื่องจากรูปคลื่นที่รับมาเป็นข้อมูลเต็มหน่วย และดิจิทัลลอออสซิลโลสโคปมีความละเอียดค่าหนึ่งในการบันทึกข้อมูล ดังนั้นข้อมูลที่รับเข้ามาจึงมีส่วนประกอบดังนี้

$$y = x + q + n$$

โดยที่  $y$  เป็นสัญญาณที่บันทึกได้จากดิจิทัลลอออสซิลโลสโคป

$x$  เป็นสัญญาณรูปคลื่นอิมพัลส์ที่บันทึกได้จริงจากระบบวัด

$q$  เป็นสัญญาณรบกวนเกิดจากการควอนไทซ์

$n$  เป็นสัญญาณรบกวนแทรกสอดภายใน และการแกว่งที่หน้าคลื่น

ขณะนี้เราต้องการ  $x$  โดยการกำจัด  $q$  และ  $n$  ออกไป การลดผลของ  $q$  ทำได้โดยการเพิ่มอัตราการซุ่มตัวอย่าง, เพิ่มจำนวนบิตของอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ หรือทำการเฉลี่ย การลดผลของ  $n$  ทำได้โดยการเฉลี่ย เนื่องจากผู้เขียนใช้อัตราการซุ่มตัวอย่างและจำนวนบิตของดิจิทัลลอออสซิลโลสโคปคงที่ ดังนั้นการลดผลของสัญญาณรบกวนทั้งสองทำได้โดยการเฉลี่ยเท่านั้น การเฉลี่ยในที่นี้เขียนไว้วงจรกรองชนิดทำให้เรียบ (ภาคผนวก ฉ) ช่วยในการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่น พารามิเตอร์ที่ต้องการของวงจรกรองชนิดทำให้เรียบได้แก่ อันดับ  $d$  และความกว้างของหน้าต่างเคลื่อนที่  $N$  แต่ในที่นี้ใช้ค่า  $M$  โดยที่  $M = (N-1) / 2$  การเฉลี่ยดังกล่าวมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณรบกวน เมื่อสัญญาณรบกวนมีขนาดมาก การเฉลี่ยต้องใช้หน้าต่างเคลื่อนที่ที่กว้างและใช้อันดับต่ำ ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การเฉลี่ยกระทำที่หน้าคลื่นต่างจากการกระทำที่หลังคลื่น เนื่องจากช่วงหน้าคลื่นมีความชันมากกว่าและจำนวนจุดน้อยกว่าช่วงหลังคลื่นมาก การใช้อันดับต่ำเกินไปหรือความกว้างของหน้าต่างเคลื่อนที่มากเกินไปจะทำให้ความชันส่วนหน้าคลื่นลดลงได้ เป็นผลให้การประเมินพารามิเตอร์ต่างๆผิดพลาด เนื่องจากวงจรกรองทำให้เรียบเป็นวงจรกรองชนิดผ่านต่ำนั่นเอง

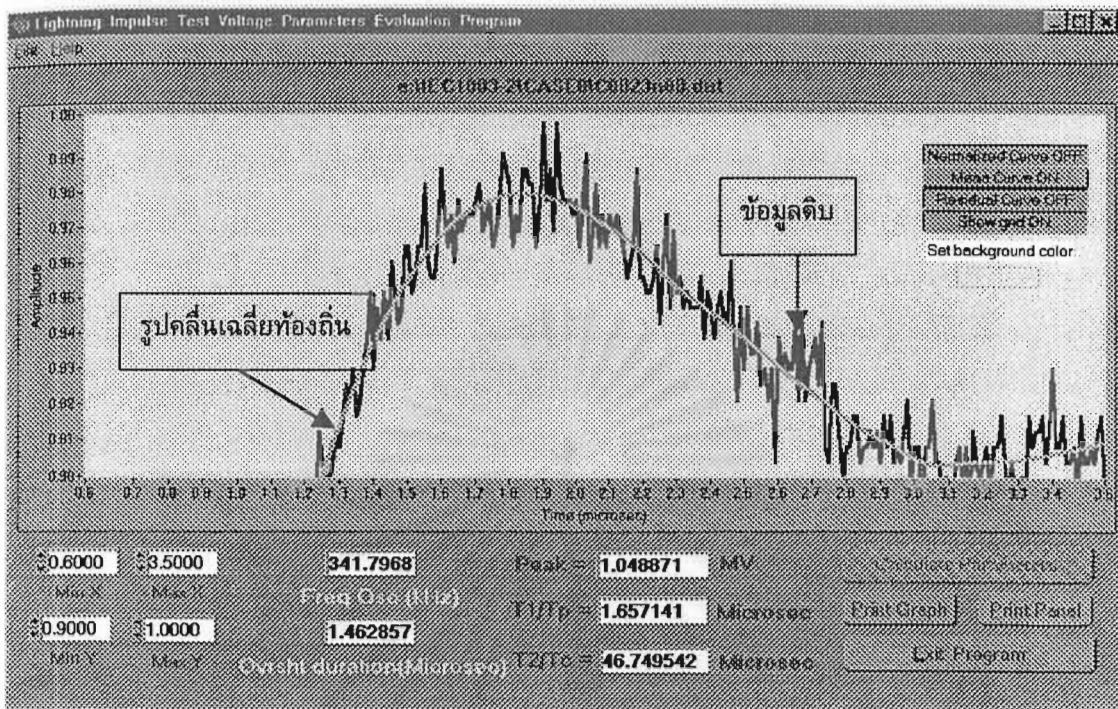
เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับรูปคลื่นมีขนาดต่างกันไม่แน่นอนเนื่องจากเป็นสัญญาณสุ่ม ดังกล่าวข้างต้น การเลือกพารามิเตอร์ของวงจรกรองชนิดทำให้เรียบขึ้นอยู่กับขนาดสัญญาณรบกวน จากการสังเกต การเลือกพารามิเตอร์ในที่นี้จะใช้ค่าดังตารางที่ 3.1 โดยพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma$  ซึ่งคำนวณจากจำนวนจุด 50 % ของจำนวนพรีทริก จำนวนพรีทริกในที่นี้เท่ากับ 1000 จุด ดังนั้นจึงใช้ 500 จุดแรกในการคำนวณ

ตารางที่ 3.1 ค่า  $M$  ที่ใช้สำหรับการกรองรูปคลื่นในเบื้องต้นก่อนนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลดิบ ในที่นี้ใช้อันดับ 1

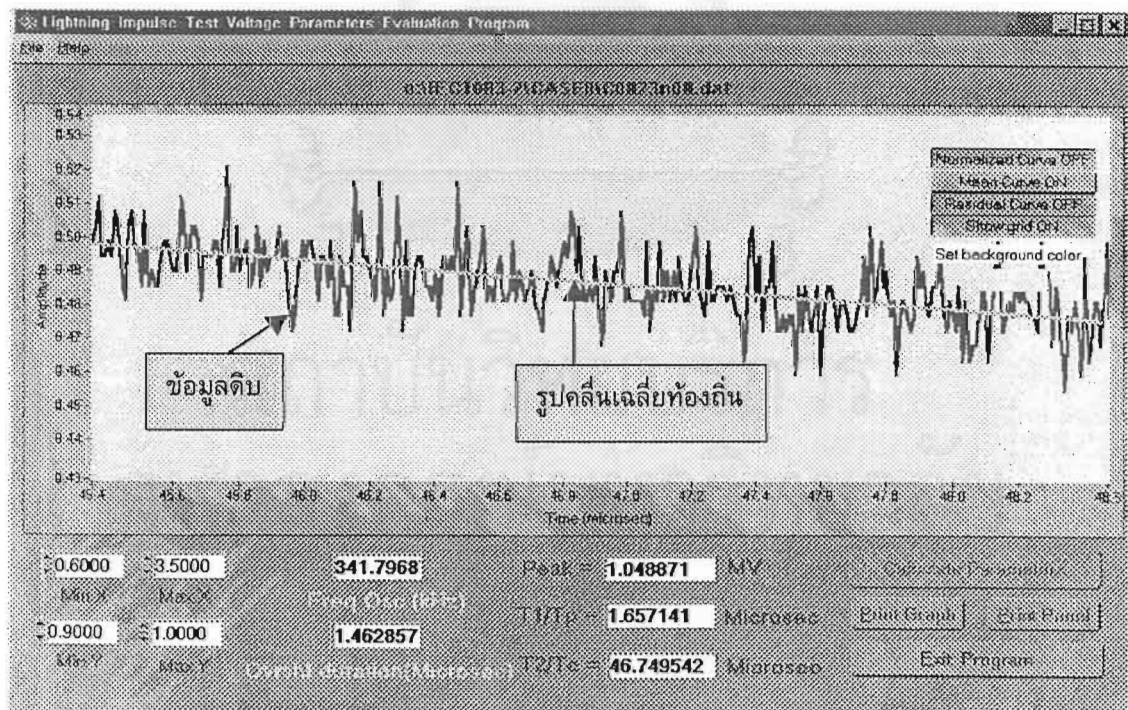
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma$	$M$
$0 \leq \sigma < 0.002$	2
$0.002 \leq \sigma < 0.004$	3
$0.004 \leq \sigma < 0.006$	4
$0.006 \leq \sigma < 0.008$	5
$0.008 \leq \sigma < 0.01$	6
$\sigma$ เป็นค่าอื่นๆ	8
หมายเหตุ : ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว	

ขั้นแรกของการวิเคราะห์รูปคลื่นจากข้อมูลดิบ คือการกำจัดสัญญาณรบกวนบางส่วน โดยใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 3.1 และอันดับ 1 ขั้นตอนต่อมาเป็นการวิเคราะห์ค่ายอดและช่วงหลังคลื่น

ดังได้กล่าวข้างต้น พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำรูปคลื่นให้เรียบในส่วนหน้าคลื่น ยอดคลื่น และหลังคลื่นมีค่าต่างกัน จากการสังเกต พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวงจรกรองชนิดทำให้เรียบในการคำนวณค่ายอดได้แก่  $M = 150$  , อันดับ 2 สำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตชิ่ง และ  $M = 40$  , อันดับ 2 สำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์ฟิวส์ ในการคำนวณเวลาที่ขนาดมีค่าเท่ากับ 50% เมื่อผ่านค่ายอดมาแล้ว เนื่องจากช่วงหลังคลื่นมีความชันของรูปคลื่นน้อยกว่าช่วงหน้าคลื่นมาก การใช้วงจรกรองชนิดทำให้เรียบนั้น เราจึงสามารถเลือกค่า  $M$  มาก และอันดับต่ำได้ และเนื่องจากอัลกอริทึมของฟังก์ชันของวงจรกรองชนิดทำให้เรียบที่พัฒนาขึ้นใช้หลักการเรียกฟังก์ชันย่อยหลายฟังก์ชัน จากการทดลองใช้ค่า  $M$  มากกว่า 180 จะเกิดปัญหาเนื่องจากสแตกล้น (Stack overflow) ดังนั้น พารามิเตอร์ของวงจรกรองชนิดทำให้เรียบที่ใช้ในที่นี้ได้แก่  $M = 160$  และอันดับ 1 สำหรับรูปคลื่นเต็มทั้งสอง พิจารณารูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดงการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นบริเวณค่ายอด และส่วนหลังคลื่นที่บริเวณขนาดของรูปคลื่นเท่ากับ 50 % ของรูปคลื่นอ้างอิงกรณี 8 ค่ายอดที่ต้องการในที่นี้ใช้ค่ายอดจากรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นนั้น ในการคำนวณ  $t_{50}$  ใช้การประมาณค่าในช่วง (Interpolation) จากรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นเช่นเดียวกัน

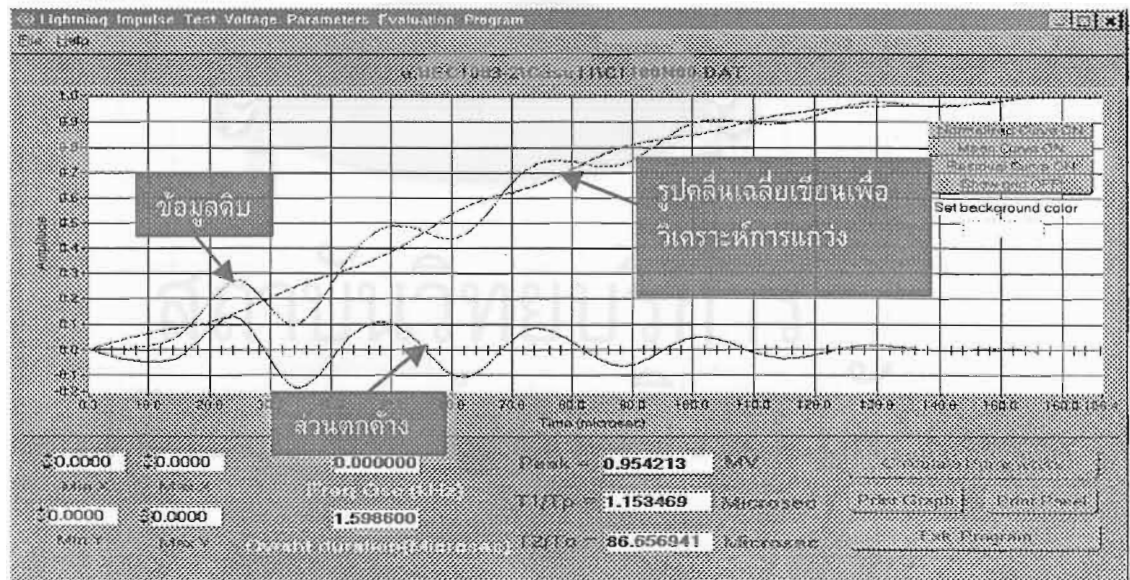


รูปที่ 3.3 รูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นบริเวณค่ายอดของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8

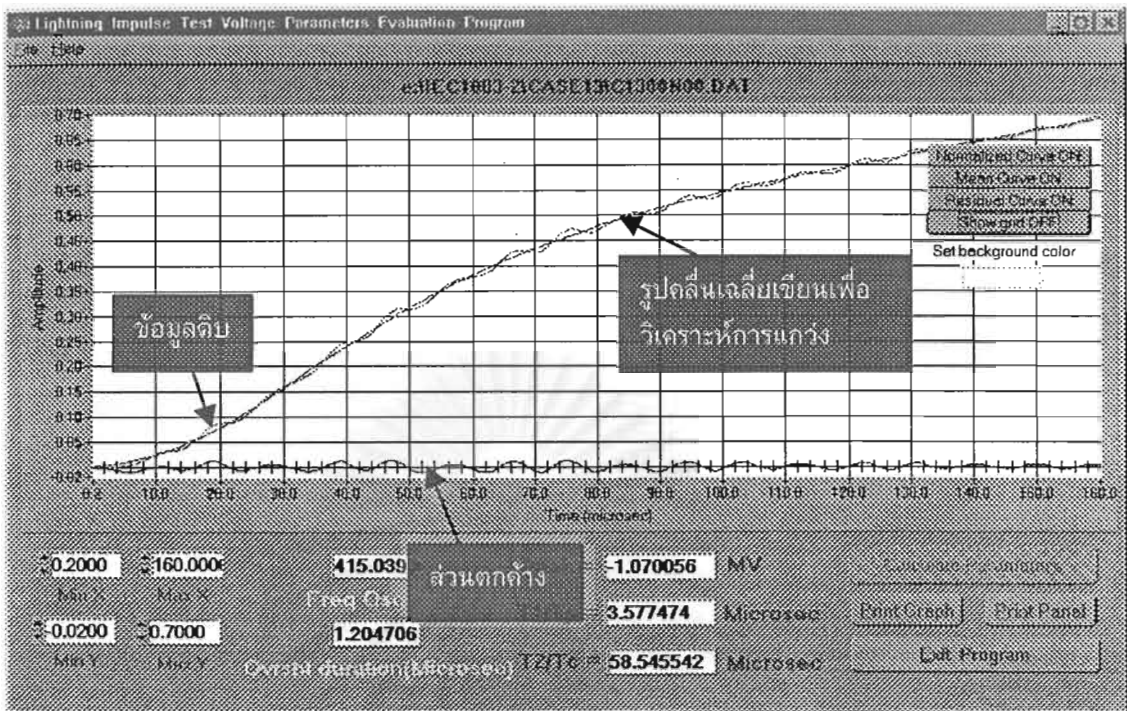


รูปที่ 3.4 รูปคลื่นเฉลี่ยส่วนหลังคลื่นเพื่อการคำนวณ  $t_{50}$  ของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8

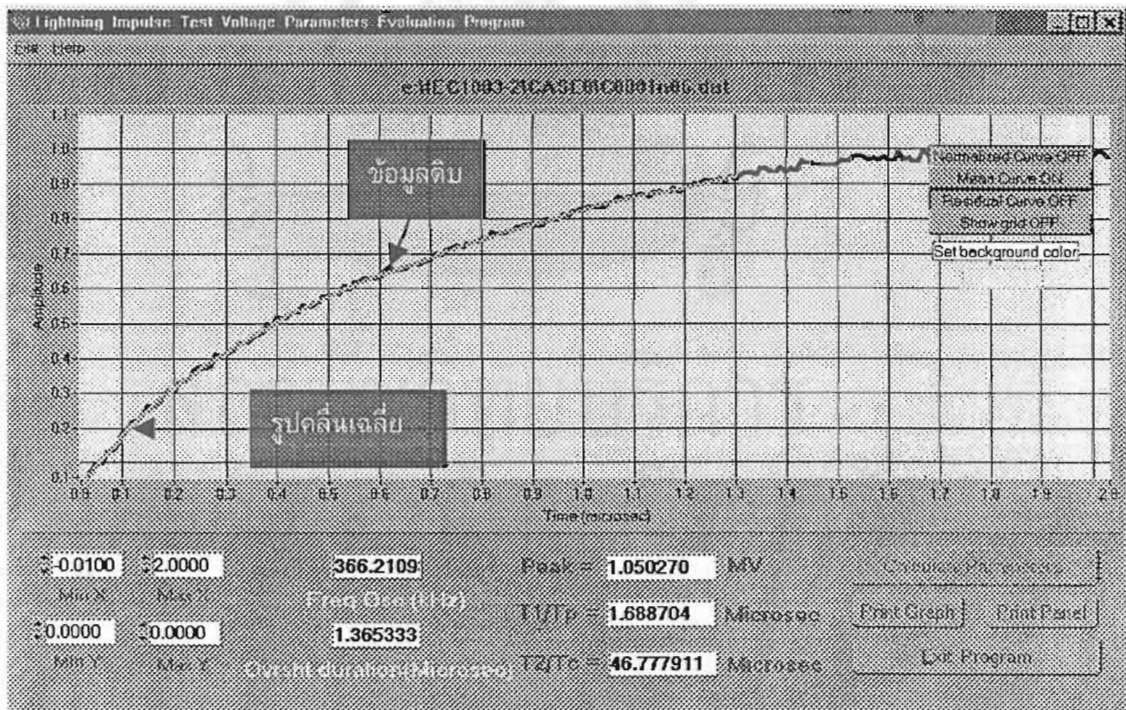
ในการวิเคราะห์เวลาหน้าคลื่นนั้น ในบางกรณี หน้าคลื่นมีการแกว่งที่สามารถตรวจจับได้ การวิเคราะห์จึงเริ่มจากการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นผ่านการแกว่งดังกล่าวเพื่อนำส่วนตกค้างของหน้าคลื่นมาวิเคราะห์ว่ามีส่วนประกอบของความถี่ที่เด่นชัดอยู่หรือไม่ พิจารณารูปที่ 3.5 และ 3.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยดังกล่าวที่นี้ได้แก่  $M = 40$  และ อันดับ 4 สำหรับทั้งรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าและอิมพัลส์สวิตชิง การวิเคราะห์ว่ามีการแกว่งที่หน้าคลื่นหรือไม่ทำได้โดยการพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของส่วนตกค้าง เมื่อพบว่าการแกว่งที่หน้าคลื่น จะใช้พารามิเตอร์  $M = 50$  และ อันดับ 4 ในการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นอีกครั้งหนึ่งเพื่อวิเคราะห์เวลาหน้าคลื่น รูปที่ 3.5 เป็นช่วงหน้าคลื่นของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11 ซึ่งมองเห็นส่วนตกค้างค่อนข้างชัดเจน การวิเคราะห์ทางความถี่ในที่นี้ใช้วิธี FFT จากรูปดังกล่าวพบว่าการแกว่งเกิดขึ้นที่หน้าคลื่น รูปที่ 3.6 เป็นช่วงหน้าคลื่นของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13 รูปคลื่นดังกล่าวเป็นรูปคลื่นที่ได้จากการวัด จะเห็นว่ามีการแกว่งเล็กน้อยเกิดขึ้น ซึ่งในที่นี้ไม่สามารถตรวจจับได้ การคำนวณ  $t_{30}$  และ  $t_{50}$  ใช้การคำนวณโดยวิธีการประมาณค่าในช่วงเช่นเดียวกับการคำนวณ  $t_{50}$  ซึ่งรูปคลื่นที่ใช้ในการคำนวณ  $t_{30}$  และ  $t_{50}$  ดังกล่าวใช้รูปคลื่นที่ได้จากการกรองโดยใช้พารามิเตอร์ตามตาราง 3.1 ข้างต้นโดยไม่มีการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นเพิ่มเติม ทั้งนี้ ถือว่ารูปคลื่นที่ได้จากการใช้พารามิเตอร์ตามตาราง 3.1 ดังกล่าวเป็นรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นสำหรับการคำนวณหน้าคลื่น พิจารณารูปที่ 3.7 แสดงช่วงหน้าคลื่นซึ่งทำการกรองโดยพารามิเตอร์ตามตาราง 3.1 ของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8



รูปที่ 3.5 การเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นเพื่อวิเคราะห์การแกว่งที่หน้าคลื่นของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11



รูปที่ 3.6 การเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นเพื่อวิเคราะห์การแกว่งที่หน้าคลื่นของรูปคลื่นอ้างอิง กรณีที่ 13



รูปที่ 3.7 ผลการกรองช่วงหน้าคลื่นโดยใช้พารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1 และ อันดับ 1 ของรูปคลื่นอ้างอิงกรณี 8



### 3.6 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

#### 3.6.1 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

จากบทที่ 2 เราทราบว่ารูปคลื่นอิมพัลส์  $y(t)$  ใดๆในทางทฤษฎีสามารถแทนด้วยสมการ

$$y(t) = A(e^{-at} - e^{-bt})$$

โดยการปรับพารามิเตอร์ในสมการให้มีรูปร่างต่างๆ ในทางปฏิบัติ รูปคลื่นที่วัดได้อาจไม่มีรูปร่าง เช่นเดียวกับที่สร้างจากสมการดังกล่าวเลยก็ทีเดียว เช่น ในช่วงหน้าคลื่น รูปคลื่นที่วัดได้ในทางปฏิบัติอาจจะมีลักษณะโค้งเว้า (Convex) ในขณะที่ ช่วงหน้าคลื่นของรูปคลื่นซึ่งได้จากสมการดังกล่าว มีลักษณะโค้งนูน (Concave) ดังนั้นเพื่อความยืดหยุ่นได้สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าใดๆ สมการดังกล่าวจึงถูกดัดแปลงเป็น

$$y(t) = (Ae^{-a(t+t_01)} - Be^{-b(t+t_02)})(1 - e^{-c(t+t_02)})^d \quad (3.6.1)$$

โดยที่เทอม  $(1 - e^{-c(t+t_02)})^d$  ช่วยในการปรับบริเวณหน้าคลื่นให้มีลักษณะโค้งเว้า การหารูปคลื่นเฉลี่ยจึงเป็นการหาพารามิเตอร์ทั้ง 8 ตัวจากสมการ (3.6.1) นั่นคือ  $A, B, a, b, c, t_01, t_02$  และ  $d$  โดยการใช้ทฤษฎีการประดิษฐ์ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นซึ่งใช้เกณฑ์กำลังสองน้อยสุดดังได้กล่าวในภาคผนวก จ

สังเกตว่าสมการ (3.6.1) แตกต่างจากสมการ (1.3.7) ซึ่งเป็นผลงานวิจัยในอดีต ตรงที่สมการที่ (1.3.6) ใช้เวลาเลื่อน (Time Shift) เพียงค่าเดียวได้แก่  $t_0$  สมการที่ผู้เขียนดัดแปลงขึ้น มีแนวคิดที่ต้องการให้ฟังก์ชันแบบจำลองมีความยืดหยุ่นมากที่สุดโดยสามารถแบ่งการประดิษฐ์ฟังก์ชันเป็นหลายส่วนซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ต้องการมีถึง 8 ตัว ปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งของการประดิษฐ์ฟังก์ชันได้แก่การหาค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์เหล่านี้ที่จะทำให้การวิเคราะห์โดยทฤษฎีการทำให้เหมาะสมที่สุดมีค่าตอบลู่ออกเข้าสู่จุดต่ำสุดครอบคลุม (Global minimum) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การคำนวณหาพารามิเตอร์ทั้ง 8 ตัวในครั้งเดียวเพื่อที่จะสร้างให้เป็นค่าเริ่มต้นของปัญหามีความยาก เนื่องจากปริภูมิ (Space) ของค่าเริ่มต้นดังกล่าวมีขนาดใหญ่มาก วิธีหนึ่งที่จะช่วยในการหาค่าเริ่มต้นได้แก่การลดปริภูมิของพารามิเตอร์ที่เป็นค่าเริ่มต้นให้เล็กลง

จากการสังเกตรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ จะเห็นว่าการคำนวณรูปคลื่นอาจแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ส่วนหน้าคลื่นและส่วนหลังคลื่น เนื่องจากในการคำนวณขนาดของรูปคลื่น ณ ช่วงเวลาส่วนหลังคลื่น ส่วนของสมการที่ใช้สร้างหน้าคลื่นมีค่าเข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นเราจึงลดปริภูมิของพารา

มิเตอร์ที่ใช้ได้โดยการทำการประดิษฐ์ฟังก์ชัน 2 ครั้ง ได้แก่การเริ่มต้นด้วยการประดิษฐ์ส่วนหลังเคลื่อนก่อนด้วยสมการ

$$y_{\text{tail}}(t) = Ae^{-a(t+t_{01})} \quad (3.6.2)$$

จากนั้นจึงประดิษฐ์ช่วงหน้าเคลื่อนด้วยพารามิเตอร์ที่เหลือ การประดิษฐ์ฟังก์ชันโดยแยกเป็นการประดิษฐ์ 2 ครั้งที่มีความแตกต่างจากงานวิจัยในอดีตตรงที่ ในการประดิษฐ์ช่วงหลังเคลื่อนจากงานวิจัยในอดีตมีการประมาณจากสมการที่ (1.3.6) นั่นคือการใช้สมการ

$$y_{\text{tail}}(t) \approx Ae^{-a(t+s)}$$

โดยที่  $s$  เป็นช่วงเวลากการชักตัวอย่าง การประดิษฐ์ทางเคลื่อนโดยใช้สมการ (3.6.2) ที่นำเสนอมีความถูกต้องสูงกว่าการประดิษฐ์ในอดีต เนื่องจากการแยกการประดิษฐ์เป็น 2 ครั้งในที่นี้มีความเป็นอิสระต่อกัน

จะเห็นว่า การประดิษฐ์หลังเคลื่อนในครั้งแรกใช้พารามิเตอร์ทั้งหมดเพียง 3 ตัว ได้แก่  $A, a$  และ  $t_{01}$  การประดิษฐ์หน้าเคลื่อนในครั้งหลังใช้พารามิเตอร์เพียง 4 ตัว ได้แก่  $B, b, t_{02}$  และ  $c$  สำหรับพารามิเตอร์  $d$  ผู้เขียนจะตั้งค่าไว้ต่างหาก เนื่องจาก  $d$  เป็นเลขชี้กำลังที่เราต้องการให้มีค่าบวกหรือศูนย์ หากนำเข้าไปรวมเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่ง จะทำให้มีปัญหาต่อการคำนวณ เพราะว่าการคำนวณแต่ละรอบของอัลกอริทึมการประดิษฐ์ฟังก์ชันมีการปรับปรุ่ค่าของพารามิเตอร์ทุกตัว ในบางครั้งการปรับปรุ่ค่าของพารามิเตอร์ดังกล่าวทำให้  $d$  มีค่าเป็นเลขทศนิยมในขณะเดียวกับที่ฐานเป็นลบ จึงก่อให้เกิดปัญหาในการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์

ดังนั้นในอัลกอริทึมของการหารูปคลื่นเฉลี่ยจึงประกอบด้วย การประดิษฐ์ฟังก์ชันแบบจำลองจำนวน 3 ฟังก์ชัน ได้แก่

$$y(t) = (Ae^{-a(t+t_{01})} - Be^{-b(t+t_{02})}) \quad (3.6.3)$$

$$y(t) = (Ae^{-a(t+t_{01})} - Be^{-b(t+t_{02})})(1 - e^{-c(t+t_{02})}) \quad (3.6.4)$$

$$y(t) = (Ae^{-a(t+t_{01})} - Be^{-b(t+t_{02})})(1 - e^{-c(t+t_{02})})^2 \quad (3.6.5)$$

และจะใช้เกณฑ์กำลังสองน้อยสุดของความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากฟังก์ชันนั้นกับข้อมูลดิบในการเลือกแบบจำลองเพื่อเป็นตัวแทนของรูปคลื่นเฉลี่ย การใช้ฟังก์ชันแบบจำลองทั้งสามยัง

เพิ่มความเชื่อถือได้กับโปรแกรม หากค่าเริ่มต้นของฟังก์ชันใดที่นำไปประดิษฐ์แล้วไม่เหมาะสม ยังมีฟังก์ชันแบบจำลองอีก 2 ฟังก์ชันที่นำมาแทนได้

### 3.6.2 การเลือกค่าเริ่มต้นเพื่อนำไปประดิษฐ์ฟังก์ชัน

การเลือกค่าเริ่มต้นเพื่อที่จะนำไปประดิษฐ์ฟังก์ชันมีความสำคัญอย่างยิ่งซึ่งเป็นการกำหนดว่าผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นจุดต่ำสุดครอบคลุมหรือจุดต่ำสุดท้องถิ่น (Local minimum) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเราคาดหวังว่าจะได้จุดต่ำสุดครอบคลุมจากการเลือกค่าเริ่มต้นที่เหมาะสม

ค่าเริ่มต้นที่ใช้ในที่นี้พัฒนาจากแนวความคิดที่ว่า รูปคลื่นที่บันทึกได้เป็นรูปคลื่นเต็มมาตรฐาน พารามิเตอร์  $\alpha_1, \alpha_2$  จากสมการ (2.1.1) หรือ  $a, b$  จากสมการข้างต้นที่ทำให้สมการนั้นมีรูปร่างเป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐานได้แก่  $\alpha_1$  (หรือ  $a$ ) =  $1/(68.5 \mu\text{sec})$  และ  $\alpha_2$  (หรือ  $b$ ) =  $1/(0.405 \mu\text{sec})$  ตามลำดับ

ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันส่วนหางคลื่นค่าเริ่มต้นที่ใช้จึงได้แก่  $A = 1$ ,  $a = 1/(68.5 \mu\text{sec})$  และ  $t_{01}$  คำนวณจากการประดิษฐ์ฟังก์ชันเชิงเส้นในส่วนของรูปคลื่นใกล้ๆกับจุดเริ่มต้น ทั้งนี้โปรแกรมย่อยที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันทุกชนิด ผู้เขียนใช้ไลบรารีของโปรแกรม LabWindows ช่วยในการคำนวณ รูปที่ 3.8 และ 3.9 แสดงการคำนวณค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์  $t_{01}$  ด้วยการประดิษฐ์ฟังก์ชันเชิงเส้นโดยใช้จำนวนจุด 20 จุด รูปที่ 3.9 แสดงรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6 ในกรณีนี้ ส่วนหน้าคลื่นมีลักษณะโค้งนูน รูปที่ 3.9 แสดงกรณีที่ส่วนหน้าคลื่นมีลักษณะโค้งเว้า ในที่นี้เป็นรูปคลื่นกรณีที่ 12

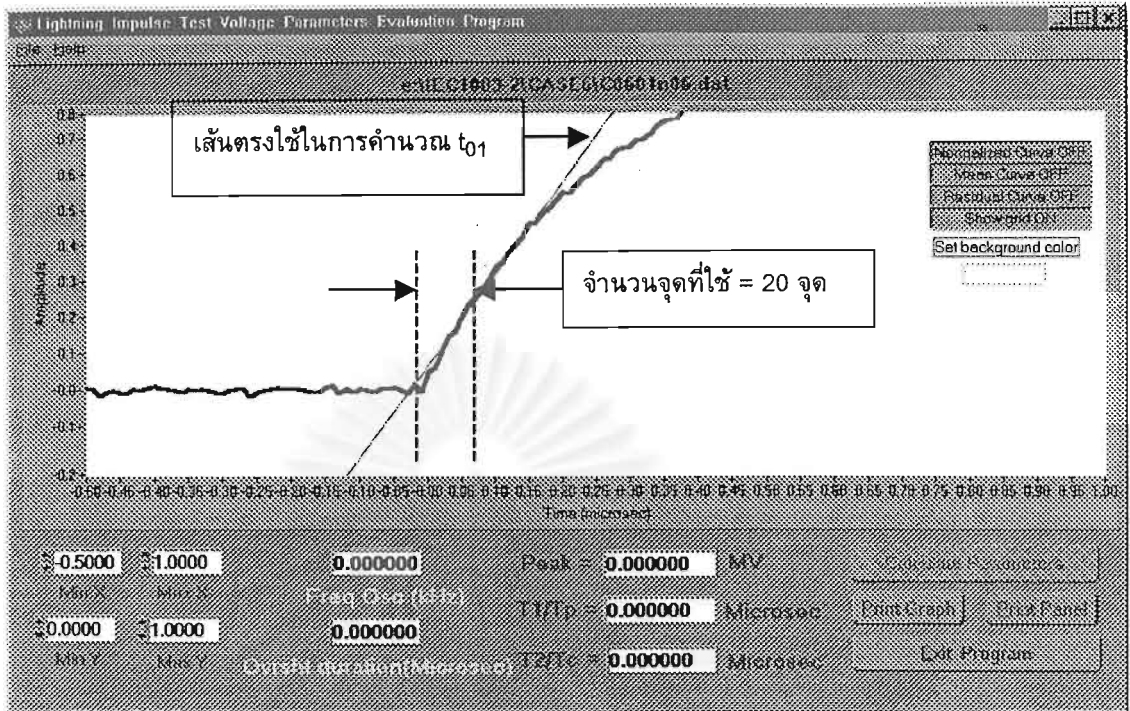
สำหรับการหาค่าเริ่มต้นสำหรับการประดิษฐ์ส่วนหน้าคลื่น เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองจากสมการ (3.6.4) และ (3.6.5) มี 4 พารามิเตอร์ เพื่อความมั่นใจยิ่งขึ้น ผู้เขียนใช้คาร์ลมานฟิลเตอร์ช่วยในการหาค่าเริ่มต้นดังกล่าว

หน้าที่หลักของคาร์ลมานฟิลเตอร์ได้แก่การนำข้อมูลที่ได้จากการวัด ณ.เวลาปัจจุบันไปปรับปรุงเวกเตอร์สเตตในปัจจุบันและทำนายเวกเตอร์สเตตในอนาคต เราอาศัยหลักการนี้โดยการนำค่าเริ่มต้นใดๆที่ตั้งขึ้นให้คาร์ลมานฟิลเตอร์ช่วยปรับปรุงให้ดีขึ้น

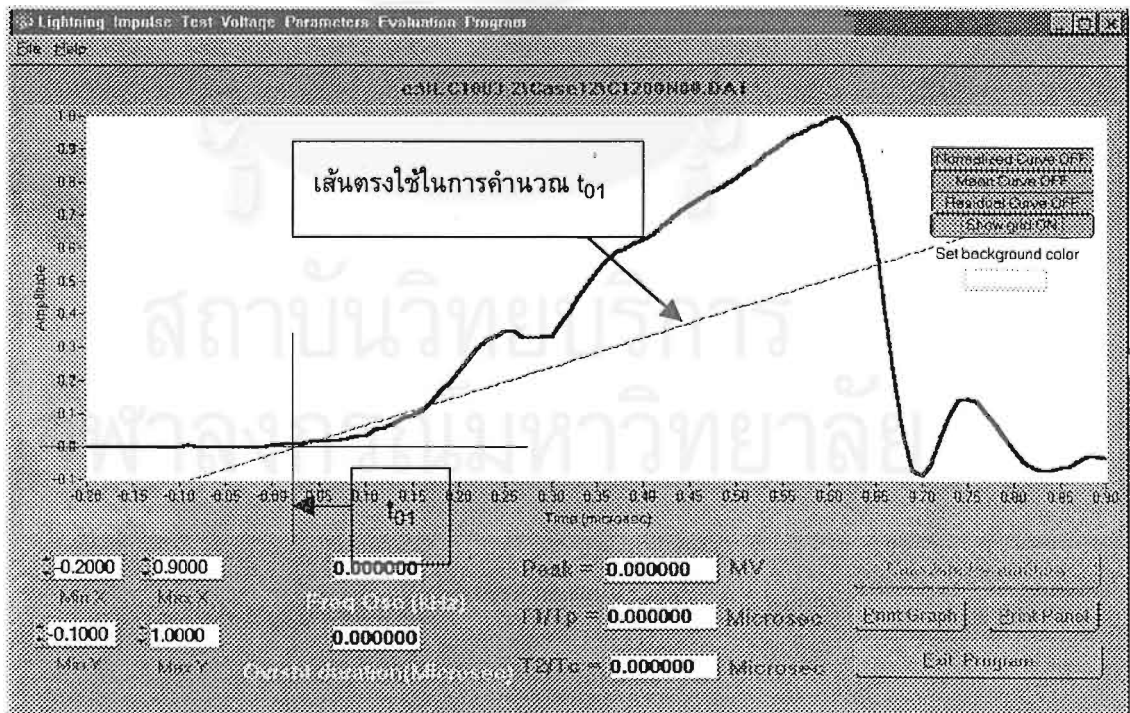
เราสามารถนำทฤษฎีของคาร์ลมานฟิลเตอร์ในภาคผนวก ฉ มาประยุกต์ใช้ได้โดยการสร้างสมการสเตตขึ้นมา 2 สมการดังนี้

$$x_{k+1} = \Phi x_k \quad (3.6.6)$$

$$z_k = M(x_k, t_k) + N_k \quad (3.6.7)$$



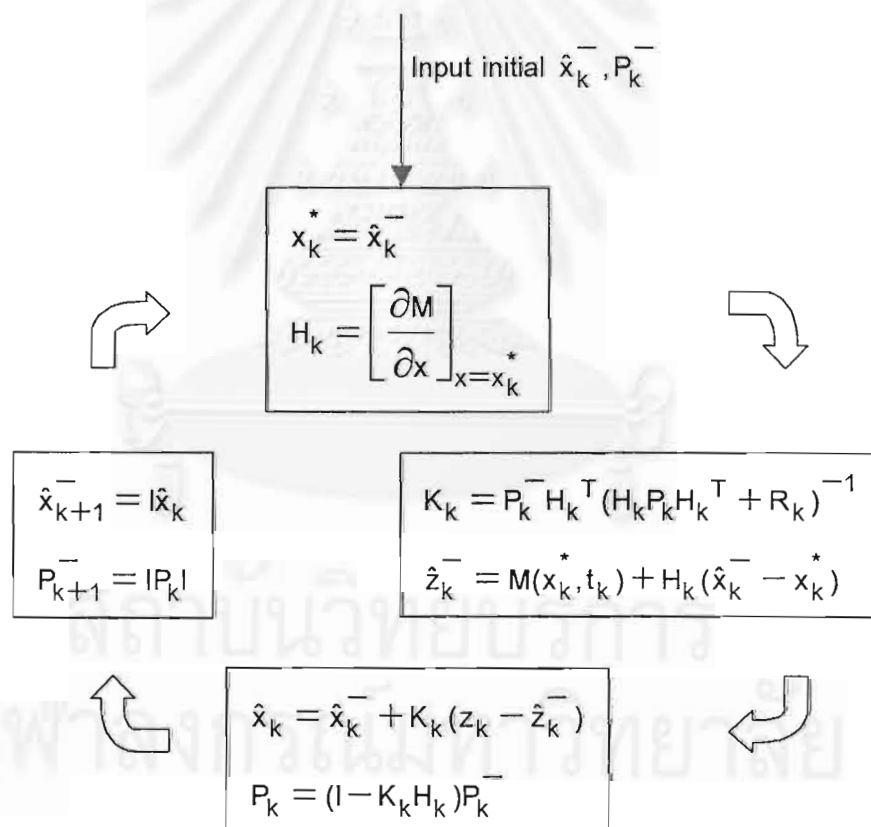
รูปที่ 3.8 การคำนวณ  $t_{01}$  โดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันช่วงหน้าคลื่นของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6



รูปที่ 3.9 การคำนวณ  $t_{01}$  โดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันช่วงหน้าคลื่นของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 12

โดยที่	$x_k, x_{k+1}$	เป็นเวกเตอร์สแตตของตัวแปรสุ่ม (Random variable)
	$\Phi$	เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix)
	$z_k$	เป็นค่าที่ได้จากการวัดที่เวลา $t_k$
	$M(x_k, t_k)$	เป็นฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้ในที่นี้เป็นสมการ (3.6.3) หรือ (3.6.4) หรือ (3.6.5)
	$N_k$	เป็นสัญญาณรบกวนทั้งหมด

เนื่องจากฟังก์ชันแบบจำลอง  $M(x_k, t_k)$  ในที่นี้ไม่เป็นเชิงเส้น ในการใช้งานจึงต้องประมาณฟังก์ชันนี้ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์และคาล์มานฟิลเตอร์ที่ใช้เป็นชนิดขยาย ให้  $x_k^*$  เป็นแนววิถีระบุขั้นตอนการทำงานของวงคาล์มานฟิลเตอร์แบบขยายแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 อัลกอริทึมของคาล์มานฟิลเตอร์แบบขยายสำหรับโปรแกรมที่นำเสนอ

โดยที่  $K_k$  คือค่าลิมิตบน  
 $P_k$  คือเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาด  
 $R_k$  คือความแปรปรวนของ  $N_k$   
 $I$  คือเมตริกซ์เอกลักษณ์

ค่าเริ่มต้นสำหรับค่าลิมิตบนฟิลเตอร์ควรเป็นค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมและทำให้ค่าลิมิตบนฟิลเตอร์ลู่เข้า ค่าเริ่มต้นที่ค่าลิมิตบนฟิลเตอร์ต้องการได้แก่

- ก) ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ 4 ตัวที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันส่วนหน้าคลื่น นั่นคือ  $B, b, c$  และ  $t_{02}$   
 ข) เมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาด ( $P_k$ ) ของพารามิเตอร์ในข้อ ก)  
 ค) ค่า  $R_k$  นั่นคือความแปรปรวนของ  $N_k$  ดังกล่าวข้างต้น

ค่าเริ่มต้นที่ใช้สำหรับข้อ ก) ข้างต้นได้แก่  $B = 1$ ,  $b = 1/(0.405 \mu \text{sec})$   $t_{02}$  ในที่นี้ใช้ค่าเดียวกับ  $t_{01}$  นั่นคือ คำนวณจากการประดิษฐ์ฟังก์ชันเชิงเส้นในส่วนของรูปคลื่นใกล้เคียงกับจุดเริ่มต้นของรูปคลื่น และจากการสังเกต ค่า  $c$  สำหรับสมการ (3.6.4) ได้แก่  $10^5$  ค่า  $c$  สำหรับสมการ (3.6.5) ได้แก่  $10^{12}$

ค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์  $P_k$  หรือ  $P_k^-$  คำนวณได้จากสมการที่ได้กล่าวในภาคผนวก ฉ ดังนี้

$$P_k^- = E[(x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T]$$

เนื่องจากไม่มีการวัดใดๆขณะเริ่มต้น ในที่นี้ จึงให้  $\hat{x}_k^-$  มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น เมตริกซ์  $P_k$  คือเมตริกซ์ซึ่งบรรจุค่าความแปรปรวนของพารามิเตอร์แต่ละตัวในแนวทแยงหลักนั่นเอง

ค่าความแปรปรวนของพารามิเตอร์ใดๆสามารถคำนวณได้โดยให้พารามิเตอร์แต่ละตัวซึ่งในที่นี้เป็นสมาชิกของเวกเตอร์สเตต  $x_k$  มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution) อยู่ในช่วง  $[x_{i1}, x_{i2}]$  ดังนั้นความแปรปรวน  $\sigma^2$  ของพารามิเตอร์แต่ละตัวคำนวณได้จาก

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{12} (x_{i2} - x_{i1})^2 \quad (3.6.8)$$

ค่าความแปรปรวนของพารามิเตอร์ทั้งหลายสำหรับค่าลิมิตบนฟิลเตอร์แสดงดังตาราง 3.2 โดยที่  $t_{init}$  ได้จากการคำนวณค่าเริ่มต้นของ  $t_{01}$  หรือ  $t_{02}$

ตารางที่ 3.2 ค่าความแปรปรวนเริ่มต้นที่ใช้สำหรับอัลกอริทึมของคาร์ลมานฟิลเตอร์แบบขยาย

พารามิเตอร์	ค่าขอบล่าง $x_{i2}$	ค่าขอบบน $x_{i1}$	ค่าความแปรปรวน
$t_{01}, t_{02}$	$t_{init} - 1 \mu\text{sec}$	$t_{init} + 1 \mu\text{sec}$	$0.3333 \times 10^{-12}$
B	0.5	1.5	0.0833
b	$0.1 \times 10^6$	$10 \times 10^6$	$8.1675 \times 10^{12}$
c สำหรับสมการ (3.6.4)	$0.1 \times 10^5$	$10 \times 10^5$	$8.1675 \times 10^{10}$
c สำหรับสมการ (3.6.5)	$0.1 \times 10^{12}$	$10 \times 10^{12}$	$8.1675 \times 10^{24}$

สำหรับค่า  $R_k$  สามารถคำนวณโดยให้  $N_k$  เป็นสัญญาณรบกวนสุ่มซึ่งมีการกระจายแบบสม่ำเสมออยู่ในช่วง  $[-KU_{peak}, KU_{peak}]$  ซึ่งค่าแปรปรวนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_k = \frac{1}{3} K^2 U_{peak}^2 \quad (3.6.9)$$

เนื่องจากมาตรฐานได้กำหนดสัญญาณรบกวนภายในมีค่าได้มากที่สุด 1 % และขนาดของส่วนพุ่งเกินมีค่าไม่เกิน 5 % ในขณะที่ค่าสูงสุดของรูปคลื่นที่ทำเป็นบรรทัดฐานแล้วมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นค่า  $N_k$  ในที่นี้จึงใช้  $K$  เท่ากับ 0.06 และ  $U_{peak}$  เท่ากับ 1  $R_k$  ในที่นี้จึงมีค่าเท่ากับ  $1.2 \times 10^{-3}$

หลังจากให้ค่าเริ่มต้นกับคาร์ลมานฟิลเตอร์และคำนวณต่อเนื่องไปจนกระทั่งพบข้อมูลตัวสุดท้ายของรูปคลื่นแล้ว เราสามารถนำค่าประเมินของพารามิเตอร์ที่ข้อมูลตัวสุดท้ายนี้ไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นของวงในในรอบต่อไป นั่นคือหนึ่งรอบใหญ่ประกอบด้วยวงย่อยจำนวนเท่ากับจำนวนจุดของรูปคลื่น ในการหาค่าเริ่มต้นของการประดิษฐ์ฟังก์ชันส่วนหน้าคลื่นในที่นี้ หนึ่งรอบใหญ่เท่ากับจำนวนวงย่อยซึ่งเป็นจำนวนจุดที่นำมาประดิษฐ์ฟังก์ชันส่วนหน้าคลื่น

เกณฑ์ที่ใช้สำหรับการหยุด (Stopping criteria) ของคาร์ลมานฟิลเตอร์มี 2 ลักษณะได้แก่

ก) เมื่อครบจำนวนรอบที่กำหนด

ข) เมื่อค่าสัมบูรณ์ของความแปรปรวนใน 2 รอบติดกันมีค่าน้อยกว่า  $\epsilon$  โดยที่  $\epsilon$  เป็นค่าใดๆที่กำหนดขึ้นตามความประสงค์ ความหมายของเกณฑ์หยุดในที่นี้คือ เมื่อเวกเตอร์สเตตมีค่าตอบลู่อเข้า ความแปรปรวนของแต่ละตัวแปรในเวกเตอร์สเตตนั้นจะลู่อเข้าเช่นกัน

ในการหาค่าเริ่มต้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้เกณฑ์ในข้อ ก) เนื่องจากวิธีหลักในการคำนวณพารามิเตอร์ของฟังก์ชันแบบจำลองคือการประดิษฐ์ฟังก์ชัน การหาค่าเริ่มต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าซึ่งนำไปเข้าอัลกอริทึมในการประดิษฐ์ฟังก์ชันแล้ว ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ลู่อเข้า

หาจุดต่ำสุดซึ่งหวังว่าเป็นจุดต่ำสุดครอบคลุม นั่นคือ ค่าเริ่มต้นดังกล่าวไม่ต้องการเป็นค่าที่ถูกตั้งที่สุด แต่เป็นค่าที่นำมาแทนในแบบจำลองฟังก์ชันแล้วมีความใกล้เคียงกับข้อมูลดิบเท่านั้น จากการทดลอง การใช้เกณฑ์ในข้อ ข ) ใช้เวลามาก ดังนั้นจึงใช้เกณฑ์ในข้อ ก) จากการสังเกต จึงตั้งจำนวนรอบใหญ่ที่ใช้สำหรับรูปคลื่นเต็มจำนวน 250 รอบ

### 3.6.3 การเลือกจุดเพื่อใช้ในการประดิษฐ์รูปคลื่นเต็ม

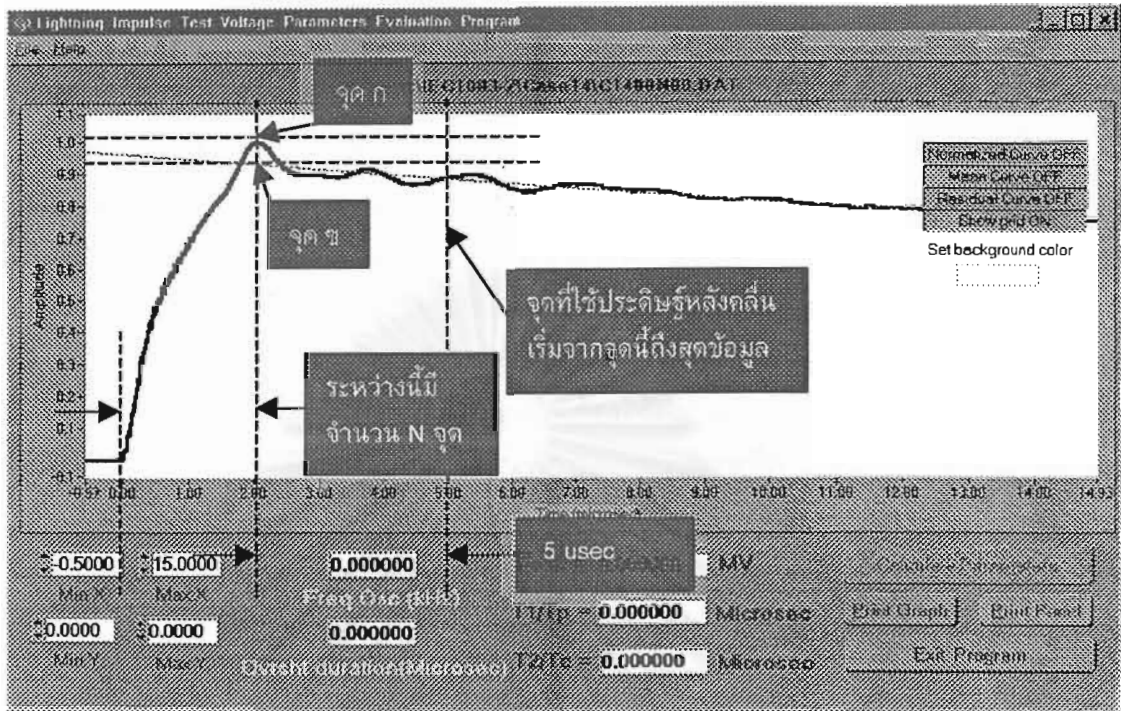
เนื่องจากเราไม่ทราบว่ารูปลักษณ์ที่รับเข้ามามีการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินหรือไม่ ในการเลือกจุดเพื่อนำไปประดิษฐ์ส่วนหางคลื่น เราพยายามเลือกจุดที่คาดว่าไม่ใช่ส่วนพุ่งเกินหรือการแกว่ง ในที่นี้จุดเริ่มต้นได้แก่จุดซึ่งห่างจากจุดที่คาดว่าเป็นค่ายอดไปทางขวามือ 5  $\mu\text{sec}$  (500 จุด) จากจุดนั้นจนถึงสิ้นสุดข้อมูลเข้า พิจารณารูปที่ 3.11 แสดงการเลือกจุดเพื่อใช้ประดิษฐ์หน้าคลื่นและหลังคลื่น

การเลือกจุดเพื่อใช้ในการประดิษฐ์ส่วนหน้าคลื่นในที่นี้กระทำหลังจากประดิษฐ์หลังคลื่นเรียบร้อยแล้ว ซึ่งจะใช้ข้อมูลของรูปคลื่นที่ได้จากการประดิษฐ์ดังกล่าวมาช่วยในการเลือกจุด การเลือกจุดมีความซับซ้อน เนื่องจากเราต้องการรูปลักษณ์ที่เหมาะสมผ่านการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกิน ซึ่งเป็นผลให้การวิเคราะห์ส่วนตกค้างมีความถูกต้อง ในที่นี้ การเลือกจุดสำหรับการประดิษฐ์หน้าคลื่นพิจารณาตั้งนี้ พิจารณารูปที่ 3.11 พิจารณาผลต่างของขนาดที่จุด ก และจุด ข โดยขนาดที่จุด ก ได้แก่ค่าที่คาดว่าเป็นค่ายอด ขนาดที่จุด ข ได้แก่ ค่าของสมการที่ได้จากการประดิษฐ์หลังคลื่น ณ.เวลาที่คาดว่าเป็นค่ายอด (จุด ก) หากค่าสัมบูรณ์ของผลต่างดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 0.01 จะถือว่าเป็นรูปคลื่นที่ไม่มีส่วนพุ่งเกิน และจำนวนจุดที่ใช้ได้แก่ 0.9N จุด โดย N เป็นจำนวนจุดที่อยู่ระหว่างจุดที่คาดว่าเป็นจุดเริ่มต้นของรูปคลื่นและจุดที่คาดว่าเป็นค่ายอด นอกจากนั้นถือว่ามีส่วนพุ่งเกิน

กรณีที่มีส่วนพุ่งเกิน จะนำมาพิจารณาต่อว่าค่าสัมบูรณ์ของผลต่างนั้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 หรือไม่ ถ้าใช่ จำนวนจุดที่ใช้ได้แก่ 0.95N ถ้าไม่ใช่ แสดงว่าขนาดของส่วนพุ่งเกินมีค่าสูง จำนวนจุดที่ใช้ในกรณีนี้เท่ากับ 0.99N ตัวเลขต่างๆที่ใช้ในที่นี้ได้จากการสังเกต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.11 แสดงการเลือกจุดเพื่อประดิษฐ์ฟังก์ชัน

### 3.6.4 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ

การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นสับในที่นี้หมายถึงรูปคลื่นสับที่หน้าคลื่นเท่านั้น เนื่องจากรูปคลื่นสับดังกล่าวมีส่วนรูปคลื่นเพียงช่วงหน้าคลื่น การคำนวณจึงเน้นที่การหาฟังก์ชันแบบจำลองที่เหมาะสมกับช่วงหน้าคลื่นเท่านั้น

ฟังก์ชันแบบจำลองสำหรับรูปคลื่นสับเป็นสมการเดียวกับรูปคลื่นเต็มดังสมการ (3.6.3) ถึง (3.6.5) แต่มีการคำนวณต่างกันเล็กน้อย สำหรับรูปคลื่นเต็ม การประดิษฐ์รูปคลื่นทำโดยการแบ่งการประดิษฐ์เป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนหน้าคลื่นและส่วนหลังคลื่น เนื่องจากรูปคลื่นสับที่หน้าคลื่นไม่มีข้อมูลส่วนหลังคลื่น ดังนั้น การประดิษฐ์จึงกระทำเพียงครั้งเดียวที่ส่วนหน้าคลื่น และยึดพารามิเตอร์บางค่าให้คงที่ ในที่นี้จะยึดพารามิเตอร์  $a$  ให้มีค่าเท่ากับ  $1/(68.5 \mu\text{sec})$  ตลอดการคำนวณ ดังนั้น จำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการประดิษฐ์หน้าคลื่นสำหรับสมการ (3.6.3) และ คู่สมการ (3.6.4) และ (3.6.5) ได้แก่ 5 ตัวและ 6 ตัว นั่นคือ  $A, B, b, t_{01}, t_{02}$  และ  $A, B, b, c, t_{01}, t_{02}$  ตามลำดับ การคำนวณค่าเริ่มต้นกระทำเช่นเดียวกับการประดิษฐ์หน้าคลื่นของรูปคลื่นเต็มโดยการใช้คาร์ลมานฟิลเตอร์ช่วย เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประดิษฐ์รูปคลื่นสับมีมากกว่าในกรณีของการประดิษฐ์รูปคลื่นเต็ม ทั้งยังมีจำนวนจุดน้อยกว่า เพื่อความมั่นใจ

มากขึ้น เราสามารถเพิ่มจำนวนรอบใหญ่ในการคำนวณสำหรับคาร์ลมานฟิลเตอร์ได้โดยผลตอบสนองยังคงเป็นแบบเวลาจริง (Real time) ในที่นี้ใช้จำนวนรอบใหญ่เท่ากับ 500 รอบ

ค่าเริ่มต้นสำหรับคาร์ลมานฟิลเตอร์ได้แก่  $A=1, B=1, b=1/(0.405 \mu\text{sec}), t_{01}$  และ  $t_{02}$  ค่าวนเช่นเดียวกับกรณีรูปคลื่นเต็ม  $c = 10^5$  สำหรับสมการ (5.5.4) และ  $c = 10^{12}$  สำหรับสมการ (5.5.5) ค่าความแปรปรวนของพารามิเตอร์ต่างๆตั้งค่าเช่นเดียวกับตารางที่ 5.1 โดยที่ค่าความแปรปรวนของ A ตั้งค่าเช่นเดียวกับพารามิเตอร์ B ในตารางดังกล่าว

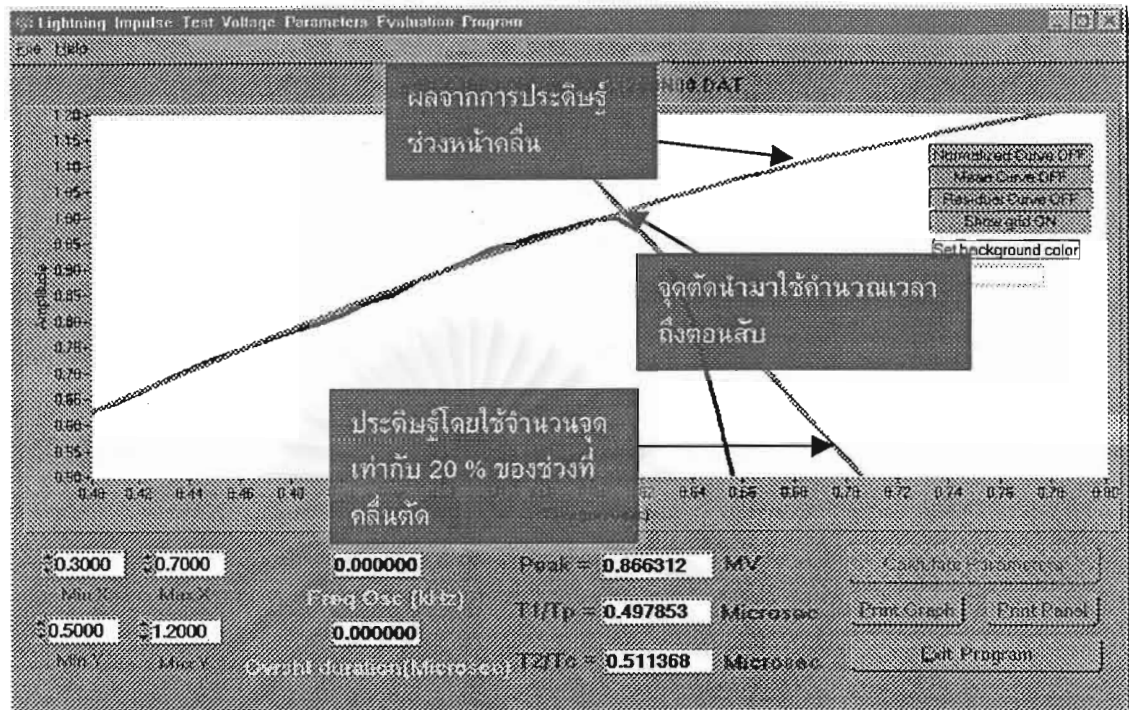
เกณฑ์ที่ใช้ในการหยุดสำหรับคาร์ลมานฟิลเตอร์ใช้เกณฑ์เดียวกับกรณีรูปคลื่นเต็ม แต่สำหรับเกณฑ์หยุดที่ใช้กับการประดิษฐ์รูปคลื่นสับมีความต่างกับกรณีรูปคลื่นเต็มเล็กน้อย เนื่องจากการหาค่ายอดของรูปคลื่นสับจำเป็นต้องใช้ค่ายอดจริงของรูปคลื่นในขณะที่ช่วงที่รูปคลื่นเริ่มเกิดอาจมีการแกว่ง และเกณฑ์กำลังสองน้อยสุดที่คำนวณโดยใช้จำนวนจุดที่นำมาประดิษฐ์รูปคลื่นทั้งหมดในที่นี้ไม่เหมาะสมสำหรับรูปคลื่นที่มีการแกว่ง เพราะในบางกรณีอาจให้ค่ายอดที่ผิดไป ในที่นี้ กรณีของรูปคลื่นสับ ผู้เขียนใช้เกณฑ์หยุดเดียวกัน แต่จำนวนจุดที่ใช้ในการคำนวณเกณฑ์หยุดใช้เพียง 30 % ของจำนวนจุดที่ใช้ในการประดิษฐ์รูปคลื่นโดยนับจากค่ายอดลงมา

ในการคำนวณเวลาถึงตอนสับในที่นี้ใช้วิธีหาจุดตัดของรูปคลื่น 2 เส้น ได้แก่ รูปคลื่นส่วนหน้าคลื่นซึ่งได้จากการประดิษฐ์ฟังก์ชันและเส้นตรงที่ได้จากการประดิษฐ์ฟังก์ชันแบบเชิงเส้นในช่วงที่ขนาดรูปคลื่นเริ่มลดลงเข้าสู่ศูนย์เมื่อเกิดการตัด พิจารณารูปที่ 3.12 แสดงรูปคลื่นอ้างอิงกรณี 12 จำนวนจุดที่ใช้ในการประดิษฐ์เส้นตรงในช่วงที่รูปคลื่นตัดในที่นี้ใช้ 20 % ของความยาวระหว่างค่ายอดของรูปคลื่นตัดและจุดที่รูปคลื่นเข้าสู่ศูนย์ในช่วงที่มีการตัด

### 3.7 การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง

ส่วนตกค้างคือผลต่างระหว่างข้อมูลดิบที่วัดได้กับรูปคลื่นเฉลี่ย การวิเคราะห์ส่วนตกค้างเป็นสิ่งตัดสินว่าจะต้องคำนวณพารามิเตอร์ของรูปคลื่นโดยวิธีใดตามมาตรฐาน ส่วนตกค้างที่คาดหวังที่จะได้จากผลต่างดังกล่าวแบ่งเป็น 3 ประเภทได้แก่

- ก) เป็นการแกว่ง+สัญญาณรบกวน
- ข) เป็นส่วนพุ่งเกิน+สัญญาณรบกวน
- ค) มีเพียงสัญญาณรบกวน นั่นคือเราสามารถประดิษฐ์รูปคลื่นเฉลี่ยได้เกือบจะเป็นรูปเดียวกับข้อมูลดิบ



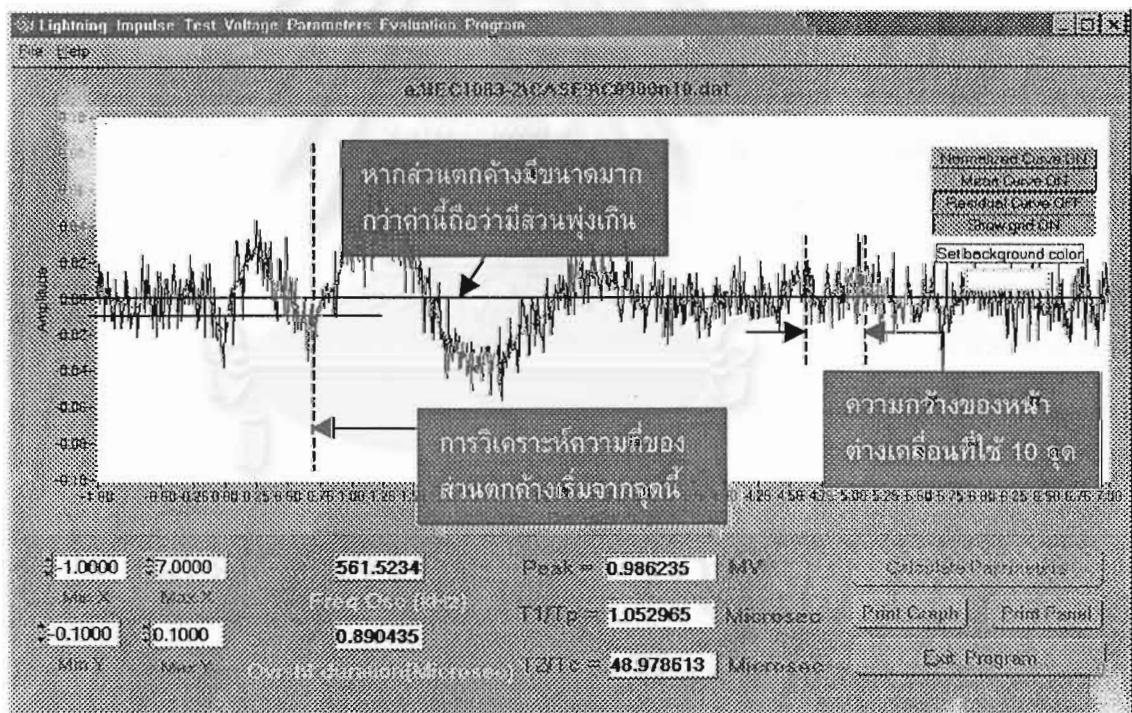
รูปที่ 3.12 การหาเวลาถึงตอนสลับของรูปคลื่นสลับ

การแกว่งในที่นี้ไม่ใช่การแกว่งที่หน้าคลื่น การวิเคราะห์ในที่นี้จะวิเคราะห์เพียงการแกว่งและส่วนพุ่งเกินที่บริเวณยอดคลื่นเท่านั้น

การวิเคราะห์ส่วนตกค้างเริ่มจากการใช้วงจรกรองทำให้เรียบทำการกำจัดสัญญาณรบกวนออกบางส่วนเสียก่อน พารามิเตอร์ของวงจรกรองทำให้เรียบที่ใช้ในที่นี้ได้แก่ อันดับเท่ากับ 1 และค่า  $M$  ขึ้นอยู่กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนซึ่งคำนวณโดยใช้จุดข้อมูลจำนวน 50 % ของจำนวนพรีทริก ค่า  $M$  ที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.5.1

หลังจากกำจัดสัญญาณรบกวนที่มีมากับส่วนตกค้างออกบางส่วนแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ว่า ส่วนตกค้างนั้นมีส่วนพุ่งเกินหรือการแกว่งหรือไม่ ก่อนอื่นต้องกำหนดค่าค่าหนึ่ง ในที่นี้ใช้สัญลักษณ์  $\delta$  ซึ่งเป็นค่าที่บอกว่า ถ้าส่วนตกค้างมีขนาดมากกว่าค่านี้ จะสรุปว่าส่วนตกค้างนั้นมีส่วนพุ่งเกินหรือการแกว่ง ในที่นี้ใช้  $\delta = 0.01$  เนื่องจากส่วนตกค้างมีสัญญาณรบกวนบางส่วน การวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้างใดๆแล้วนำมาตัดสินว่าค่านั้นเป็นค่าของส่วนพุ่งเกินหรือการแกว่งเลยไม่ได้ จำต้องมีกรองให้เรียบเสียก่อน การกรองดังกล่าวในที่นี้ทำโดยใช้การเฉลี่ยกลุ่มข้อมูลจำนวนหนึ่งเพื่อเป็นตัวแทนของจุดที่พิจารณา ความกว้างของกลุ่มข้อมูลหรืออีกนัยหนึ่งความกว้างของหน้าต่างเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับสัญญาณรบกวนว่ามีมากเพียงใด หากมีสัญญาณรบกวนมากจึงต้องใช้ความกว้างของกลุ่มข้อมูลกว้าง ในที่นี้ใช้เพียง 10 จุด การคำนวณเริ่มจากข้อมูลตัวที่ 2000 (ประมาณจุดที่ 20  $\mu\text{sec}$  นับจากข้อมูลตัวแรก) และย้อนไป

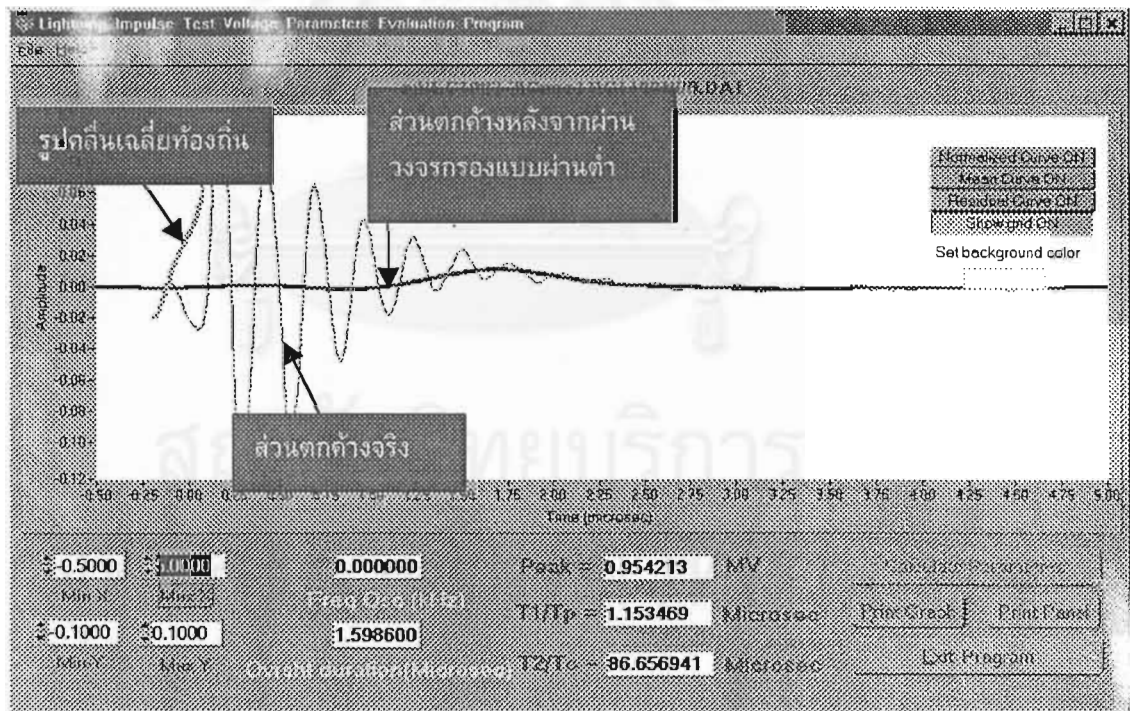
จบที่ข้อมูลตัวแรก เพื่อหลีกเลี่ยงการวิเคราะห์การแกว่งที่หน้าคลื่น ข้อมูลตัวแรกในที่นี้จึงได้แก่ จุดที่คาดว่าจะจะเป็นจุดเริ่มของการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกิน พิจารณารูปที่ 3.13 แสดงส่วนตกค้าง เดิมและส่วนตกค้างที่ผ่านการกรองด้วยพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.5.1 ของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 9 สังเกตว่าค่า  $\delta$  สามารถเปลี่ยนได้ตามความวิจรรย์ญาณของแต่ละบุคคล ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยครอบคลุมว่ามีความผิดพลาดของค่ายอดอย่างไร ในการตั้งความกว้างของ กลุ่มข้อมูลเพื่อใช้ในการเฉลี่ยจำนวน 10 จุดดังกล่าวข้างต้นนั้น เป็นผลมาจากการกำจัด สัญญาณรบกวนบางส่วนเป็นส่วนตกค้างโดยใช้ค่า M จากตารางที่ 3.5.1 ในข้างต้น หากไม่มี การกำจัดสัญญาณรบกวนบางส่วนดังกล่าวแล้ว เราต้องตั้งความกว้างของกลุ่มข้อมูลเพื่อการ เฉลี่ยให้มากขึ้น การเลือกจุดเริ่มต้นของส่วนตกค้างมีความสำคัญ เนื่องจากการใช้ข้อมูลของ ส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ทั้งหมด ผลที่ได้อาจมีความผิดพลาดเนื่อง จากในบางกรณีอาจเกิดการแกว่งที่หน้าคลื่นดังกล่าวข้างต้น



รูปที่ 3.13 ส่วนตกค้างของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 9

หลังจากทราบว่ามีส่วนพุ่งเกินหรือการแกว่งหรือไม่ในส่วนตกค้าง จากรูป 3.1.1 ถ้าไม่มี ส่วนพุ่งเกินหรือการแกว่ง การหาพารามิเตอร์จะเป็นการวิเคราะห์จากข้อมูลดิบตั้งได้กล่าวข้างต้น หากมีส่วนพุ่งเกินหรือการแกว่ง การวิเคราะห์ต่อไปจะเป็นการหาความถี่ของการแกว่งหรือ

ช่วงเวลาการเกิดของส่วนพุ่งเกิน การวิเคราะห์ดังกล่าวทำได้โดยนำส่วนตกค้างนั้น แปลงให้อยู่ในรูปผลตอบสนองทางความถี่โดยใช้วิธี FFT จากนั้นพิจารณาว่า ขนาดของความถี่ใดมีขนาดสูงสุดให้เป็นความถี่ของการแกว่ง หากความถี่นั้นเท่ากับศูนย์ นั่นคือ ส่วนประกอบดีซี (D.C. component) มีความเด่นที่สุด จะถือว่าการหาพารามิเตอร์ตามมาตรฐานเป็นการพิจารณาช่วงเวลาการเกิดของส่วนพุ่งเกิน เนื่องจากส่วนพุ่งเกินดังกล่าวอาจมีการแกว่งเล็กน้อยซ้อนทับอยู่ ซึ่งการทำรูปคลื่นให้เรียบในขั้นแรกกำจัดไม่หมด ดังนั้น ทุกครั้งที่มีการวิเคราะห์ช่วงเวลาการเกิดของส่วนพุ่งเกิน จึงมีการนำส่วนตกค้างไปผ่านวงจรกรองแบบผ่านต่ำเสียก่อน จากการสังเกต ความถี่ตัดที่ใช้สำหรับวงจรกรองแบบผ่านต่ำในที่นี้คือ 1MHz และใช้หน้าต่างแสมมิ่งทฤษฎีของวงจร กรองดิจิตอลแบบผ่านต่ำกล่าวไว้ในภาคผนวก ฉ ช่วงเวลาการเกิดของส่วนพุ่งเกินที่คำนวณได้จากวิธีดังกล่าวมีความผิดพลาดเล็กน้อย เนื่องจากการวงจรกรองแบบผ่านต่ำทำให้ส่วนประกอบของความถี่สูง (High frequency component) ของส่วนตกค้างหายไปบางส่วน จึงทำให้การคำนวณช่วงเวลาการเกิดของส่วนพุ่งเกินมากขึ้นเล็กน้อย รูปที่ 3.14 แสดงกรณีที่ส่วนตกค้างมีการแกว่งซ้อนทับอยู่ ในที่นี้เป็นรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11



รูปที่ 3.14 ส่วนตกค้างของรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11

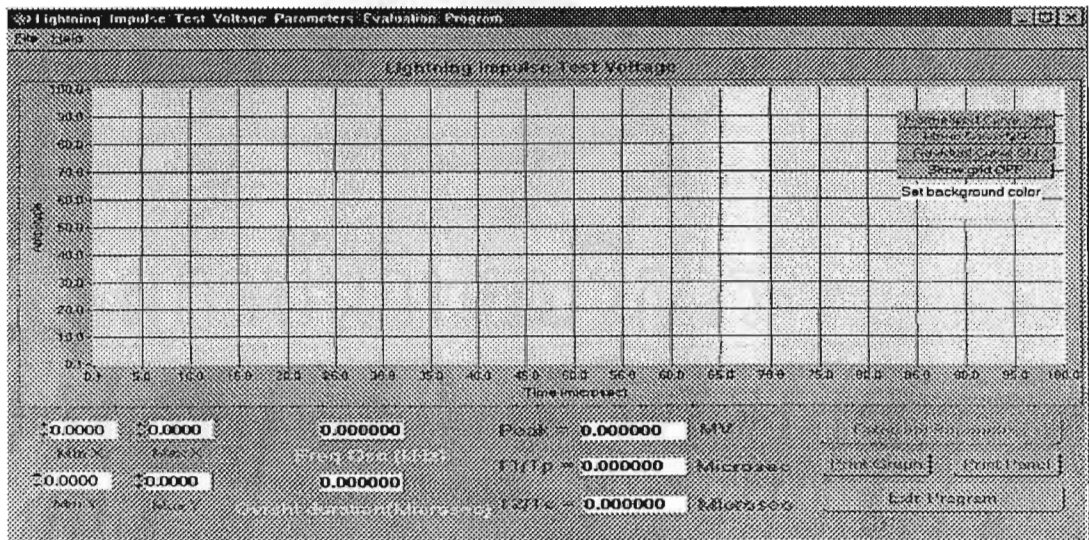
## บทที่ 4

# การใช้ซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของ รูปคลื่นอิมพัลส์

### 4.1 การใช้งานซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น

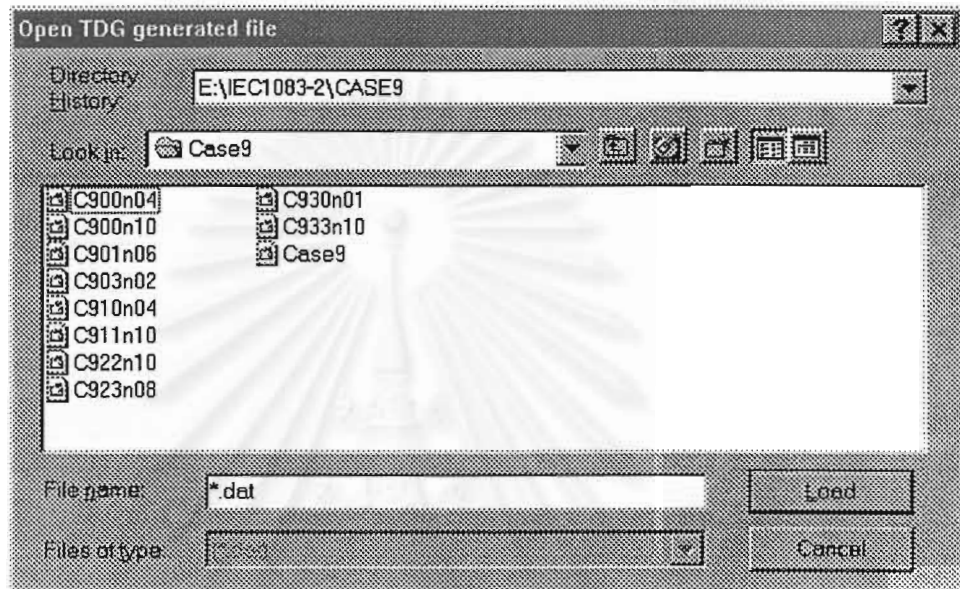
ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีชื่อว่า "TDG Solver" ใช้งานกับระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 95 หรือสูงกว่า และถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรม "LabWindows 5.01" ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นชนิดพกพา มีขนาดเล็ก สามารถนำไปใช้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลใดๆ การพัฒนาในเบื้องต้นเน้นที่การนำรูปคลื่นอิมพัลส์จากมาตรฐานมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ให้ถูกต้องตามมาตรฐาน ดังนั้นการนำรูปคลื่นมาวิเคราะห์จึงต้องเปิดจากไฟล์ข้อมูล ซึ่งในที่นี้ใช้ไฟล์ที่มีนามสกุล "dat" ไฟล์ดังกล่าวได้มาจากการสร้างจากโปรแกรม TDG ดังได้กล่าวในภาคผนวก ก.

โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ประกอบด้วยหน้าต่างเดี่ยวดังรูป 4.1

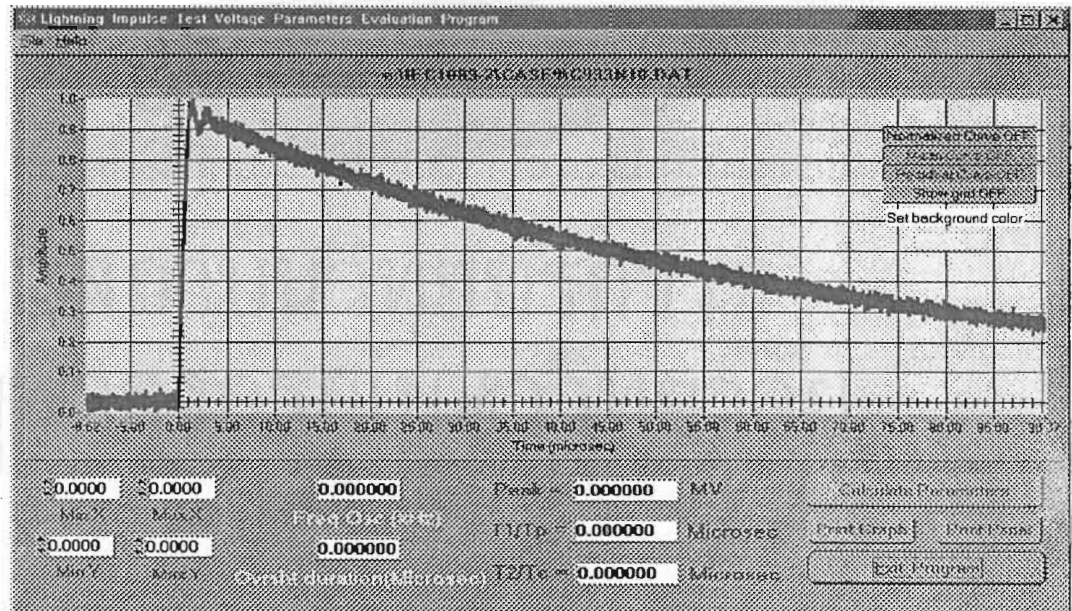


รูป 4.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรมวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์

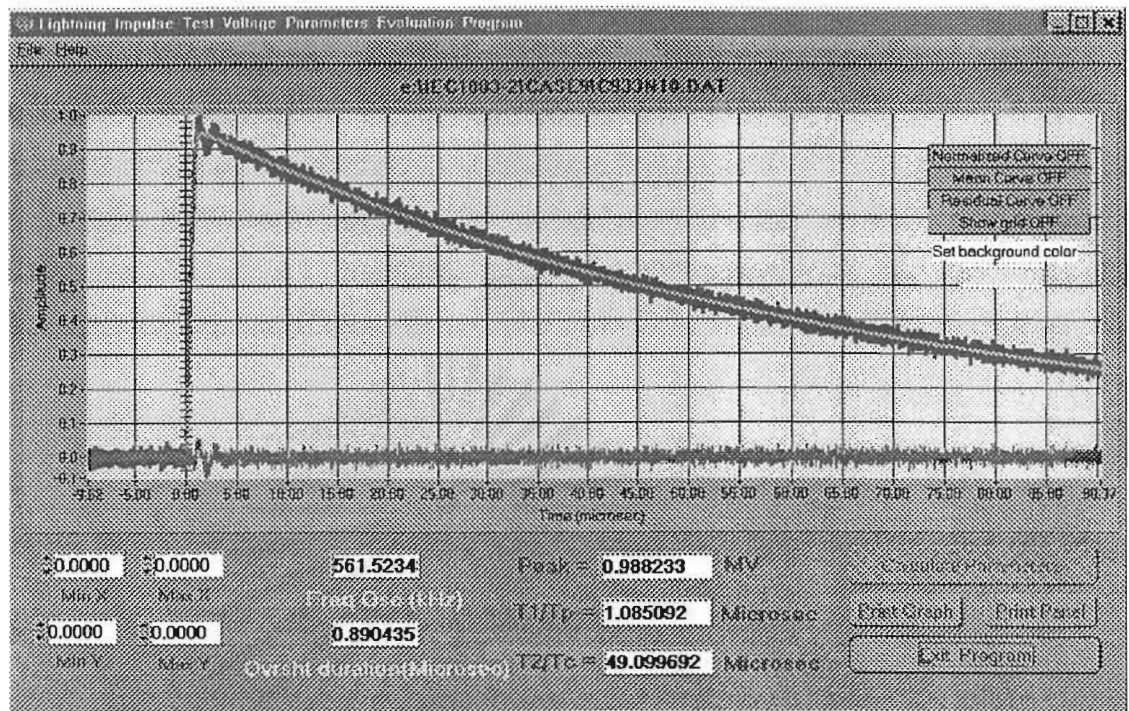
การใช้งานเพียงคลิกที่เมนู "File" เพื่อเปิดไฟล์ข้อมูล แล้วคลิกปุ่ม "Calculate Parameters" โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ตามมาตรฐานและแสดงผล เรายังสามารถขยายหรือย่อรูปที่แสดงได้โดยการกดปุ่ม "Ctrl" ค้างไว้แล้วคลิกปุ่มเมาส์ซ้ายเพื่อขยาย หรือปุ่มเมาส์ขวาเพื่อย่อ การใช้งานและการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูป 4.2 ถึง 4.4



รูป 4.2 ขั้นตอนแรกเริ่มจากการเปิดไฟล์ข้อมูลที่มีนามสกุล "dat"



รูป 4.3 โปรแกรมอ่านไฟล์ข้อมูล ทำให้เป็นบรรทัดฐานและแสดงผล



รูป 4.4 โปรแกรมเสร็จสิ้นการคำนวณหาพารามิเตอร์และแสดงผล

เราสามารถปรับให้โปรแกรมแสดงหรือไม่แสดง รูปคลื่นเดิมที่ผ่านการทำเป็นบรรทัดฐานแล้ว รูปคลื่นเฉลี่ย หรือส่วนตกค้าง ได้โดยการคลิกที่ปุ่ม "Normalized Curve OFF" "Mean Curve OFF" หรือ "Residual Curve OFF" ตามลำดับ ขณะเดียวกัน เราสามารถเพิ่มความคมชัดของรูปได้ด้วยการเปลี่ยนสีพื้นโดยการปรับที่ "Set background color"

## 4.2 การทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอกับรูปคลื่นอ้างอิงตามมาตรฐาน

การทดสอบอัลกอริทึมของโปรแกรมสำหรับรูปคลื่นจากมาตรฐานในแต่ละกรณี ทำโดยสร้างรูปคลื่นจากโปรแกรม TDG ในแต่ละกรณีขึ้นมาชุดหนึ่ง ในที่นี้ใช้ชุดละ 10 รูปคลื่น แต่ละชุดประกอบด้วยรูปคลื่นที่มีสัญญาณรบกวนภายใน (ถ้าสามารถตั้งค่านี้ได้) การเลื่อนทางเวลาทางแกน Y หรือทางแกน X ต่างกัน แต่ใช้จำนวนจุดเท่าเดิมได้แก่ 10000 จุด รูปแบบของชื่อไฟล์ข้อมูลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แก่





ตัวอย่างเช่น C0923N05.dat ได้แก่รูปคลื่นกรณีที่ 9 ที่มีการเลื่อน (2,3) ตามข้อกำหนดของการตั้งค่าในโปรแกรม TDG และมีสัญญาณรบกวนภายใน 0.5 % บางกรณีที่ไม่สามารถตั้งค่าสัญญาณรบกวนภายในจากโปรแกรม TDG ได้ MM จะมีค่า 00

ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์ทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.14 และภาพของผลลัพธ์นี้แสดงในภาคผนวก ค สัญญาณเข้าแต่ละกรณีเป็นรูปคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ยกเว้นกรณีที่บอกว่าได้จากการวัด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 1 (อิมพัลส์ไฟฟ้าเต็ม, คลื่นเรียบ)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด	เวลาหน้าคลื่น	เวลาถึงกึ่งค่ายอด	ความถี่การแกว่ง	ช่วงเวลาการเกิดส่วนฟูงเกิน	ฟังก์ชัน* แบบจำลองที่ใช้
	(MV)	( $\mu$ sec)	( $\mu$ sec)	(kHz)	( $\mu$ sec)	
	ขอบเขตของมาตรฐาน					
	1.04 -1.06	0.81- 0.87	57.5- 62.5	---	---	---
ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น						
C0100N00	1.0497	0.8547	59.8985	---	---	2
C0101N00	1.0500	0.8385	60.4438	---	---	2
C0102N00	1.0499	0.8387	60.2639	---	---	2
C0103N00	1.0501	0.8383	60.0636	---	---	2
C0111N00	1.0499	0.8248	60.4414	---	---	2
C0112N00	1.0499	0.8410	60.2660	---	---	2
C0121N00	1.0499	0.8350	60.4506	---	---	2
C0122N00	1.0498	0.8273	60.2637	---	---	2
C0130N00	1.0498	0.8527	59.8965	---	---	2
C0131N00	1.0499	0.8372	60.4526	---	---	2

\* ฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้ : 0 หมายถึงสมการ (3.5.3) , 1 หมายถึงสมการ (3.5.4), 2 หมายถึงสมการ (3.5.5)

ตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 6 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม, มีสัญญาณรบกวน)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้า คลื่น ( $\mu$ sec)	เวลาถึงกิ่ง ค่ายอด ( $\mu$ sec)	ความถี่การ แกว่ง (kHz)	ช่วงเวลา การเกิด ส่วนพุ่งเกิน ( $\mu$ sec)	ฟังก์ชัน แบบจำลอง ที่ใช้
ขอบเขตของมาตรฐาน						
	1.04 -1.06	0.81- 0.87	57.5- 62.5	---	---	---
ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น						
C0600N04	1.0487	0.8375	60.2529	---	---	2
C0600N10	1.0488	0.8539	60.3476	---	---	2
C0601N06	1.0488	0.8539	60.2978	---	---	2
C0603N02	1.0497	0.8549	60.1988	---	---	2
C0610N04	1.0499	0.8393	60.2247	---	---	2
C0611N10	1.0504	0.8380	60.1833	---	---	1
C0622N10	1.0514	0.8405	60.1858	---	---	2
C0623N08	1.0509	0.8410	60.1562	---	---	1
C0630N01	1.0506	0.8525	60.0765	---	---	2
C0633N10	1.0540	0.8413	60.0163	---	---	1

ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 3 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม, มีการแกว่งและไม่มีสัญญาณรบกวน)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้า คลื่น ( $\mu$ sec)	เวลาถึงกึ่ง ค่ายอด ( $\mu$ sec)	ความถี่การ แกว่ง (kHz)	ช่วงเวลา การเกิด ส่วนพุ่งเกิน ( $\mu$ sec)	ฟังก์ชัน แบบจำลอง ที่ใช้
	ขอบเขตของมาตรฐาน					
	1.04 -1.06	1.6 - 1.7	45 - 49	< 500 kHz	---	---
	ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น					
C0300N00	1.0505	1.6722	46.8731	366.2109	---	2
C0301N00	1.0499	1.6715	46.7625	366.2109	---	2
C0303N00	1.0477	1.6712	46.6022	366.2109	---	2
C0311N00	1.0500	1.6728	46.7537	366.2109	---	2
C0312N00	1.0492	1.6889	46.6583	366.2109	---	2
C0313N00	1.0479	1.6723	46.5932	366.2109	---	2
C0321N00	1.0500	1.6737	46.7445	366.2109	---	2
C0322N00	1.0491	1.6735	46.6543	366.2109	---	2
C0323N00	1.0477	1.6730	46.5938	366.2109	---	2
C0330N00	1.0505	1.6708	46.8719	366.2109	---	2

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 8 (อิมพัลส์ไฟฟ้าเต็ม , มีการแกว่งและ มีสัญญาณรบกวน)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้าคลื่น ( $\mu$ sec)	เวลาถึงกึ่งค่ายอด ( $\mu$ sec)	ความถี่การแกว่ง (kHz)	ช่วงเวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน ( $\mu$ sec)	ฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้
	ขอบเขตของมาตรฐาน					
	1.04 -1.06	1.6 - 1.7	45 - 49	< 500 kHz	---	---
	ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น					
C0800N04	1.0505	1.6882	46.7475	366.2109	---	2
C0800N10	1.0508	1.7057	46.7833	366.2109	---	2
C0801N06	1.0503	1.6887	46.7779	366.2109	---	2
C0803N02	1.0500	1.6880	46.7774	366.2109	---	2
C0810N04	1.0493	1.6740	46.8347	341.7968	---	2
C0811N10	1.0496	1.6730	46.9239	341.7968	---	2
C0822N10	1.0487	1.6738	46.7749	366.2109	---	2
C0823N08	1.0489	1.6571	46.7495	341.7968	---	2
C0823N10	1.0489	1.6737	46.7347	341.7968	---	2
C0830N01	1.0502	1.6875	46.8170	366.2109	---	2

หมายเหตุ : เวลาหน้าคลื่นซึ่งได้จากการทดสอบไฟล์ข้อมูล C0800N10 คลาดเคลื่อนจากขอบเขตของมาตรฐาน สาเหตุอาจเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนมีขนาดมาก ซึ่งเราสามารถปรับปรุงได้โดยการพัฒนาการหาค่าออฟเซ็ท

ตารางที่ 4.5 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 4 (อิมพัลส์ไฟฟ้าเต็ม , มีการแกว่งและไม่มีสัญญาณรบกวน)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้า คลื่น ( $\mu$ sec)	เวลาถึงกึ่ง ค่ายอด ( $\mu$ sec)	ความถี่การ แกว่ง (kHz)	ช่วงเวลา การเกิด ส่วนพุ่งเกิน ( $\mu$ sec)	ฟังก์ชัน แบบจำลอง ที่ใช้
ขอบเขตของมาตรฐาน						
	0.96 - 0.99	1.0 - 1.1	48 - 52	> 500 kHz	---	---
ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น						
C0400N00	0.9855	1.0848	48.8228	561.5234	---	2
C0401N00	0.9884	1.0880	49.1418	561.5234	---	2
C0402N00	0.9875	1.0885	49.0349	561.5234	---	2
C0403N00	0.9865	1.0882	48.9311	561.5234	---	2
C0411N00	0.9870	1.0891	49.2223	561.5234	---	2
C0412N00	0.9852	1.0912	49.1720	561.5234	---	2
C0421N00	0.9883	1.0901	49.1469	561.5234	---	2
C0422N00	0.9874	1.0891	49.0388	561.5234	---	2
C0430N00	0.9855	1.0860	48.8255	561.5234	---	2
C0432N00	0.9874	1.0889	49.0372	561.5234	---	2

ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 9 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม , มีการแกว่งและมีสัญญาณรบกวน)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้า คลื่น ( $\mu$ sec)	เวลาถึงกึ่ง ค่ายอด ( $\mu$ sec)	ความถี่การ แกว่ง (kHz)	ช่วงเวลา การเกิด ส่วนพุ่งเกิน ( $\mu$ sec)	ฟังก์ชัน แบบจำลอง ที่ใช้
ขอบเขตของมาตรฐาน						
	0.96 - 0.99	1.0 - 1.1	48 - 52	> 500 kHz	---	---
ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น						
C0900N04	0.9872	1.0804	49.9878	561.5234	---	2
C0900N10	0.9862	1.0530	48.9786	561.5234	---	2
C0901N06	0.9871	1.0823	48.9652	561.5234	---	2
C0903N02	0.9839	1.1058	49.2032	561.5234	---	2
C0910N04	0.9873	1.0806	49.0062	561.5234	---	2
C0911N10	0.9874	1.0663	49.0003	561.5234	---	2
C0922N10	0.9865	1.0780	48.9905	561.5234	---	2
C0923N08	0.9875	1.0870	48.9607	561.5234	---	2
C0930N01	0.9872	1.0877	49.0240	561.5234	---	2
C0933N10	0.9882	1.0851	49.0997	561.5234	---	2

หมายเหตุ : เวลาหน้าคลื่นซึ่งได้จากการใช้ไฟล์ข้อมูล C0903N02 มีความคลาดเคลื่อนจากขอบเขตของมาตรฐาน เราสามารถปรับปรุงได้โดยการพัฒนาการหาค่าออฟเซ็ทเช่นเดียวกับกรณีของตารางที่ 4.4



ตารางที่ 4.7 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 11 (อิมพัลส์ไฟฟ้าเต็มซึ่งวัดได้จากการวัด)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้า คลื่น ( $\mu$ sec)	เวลาถึง กึ่งค่า ยอด ( $\mu$ sec)	ความถี่การ แกว่ง (kHz)	ช่วงเวลา การเกิด ส่วนพุ่งเกิน ( $\mu$ sec)	ฟังก์ชัน แบบจำลอง ที่ใช้
	ขอบเขตของมาตรฐาน					
	0.94 - 0.96	1.07 - 1.19	82 - 91	---	---	---
	ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น					
C1100N00	0.9542	1.1535	86.6570	---	1.5986	2
C1101N00	0.9580	1.1543	87.1477	---	1.3388	2
C1103N00	0.9557	1.1536	86.7970	---	1.3930	2
C1111N00	0.9579	1.1389	87.1438	---	1.3901	2
C1112N00	0.9564	1.1550	87.0184	---	1.3336	2
C1121N00	0.9578	1.1526	87.1661	---	1.3961	2
C1122N00	0.9562	1.1525	87.0559	---	1.3358	2
C1130N00	0.9545	1.1528	86.6262	---	1.5860	2
C1132N00	0.9562	1.1533	87.0368	---	1.3268	2
C1133N00	0.9557	1.1528	86.7962	---	1.4015	2



ตารางที่ 4.8 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 13 (อิมพัลส์ไฟฟ้าผ่าเต็มซึ่งวัดได้จากการวัด)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้าคลื่น ( $\mu$ sec)	เวลาถึงกึ่งค่ายอด ( $\mu$ sec)	ความถี่ การแกว่ง (kHz)	ช่วงเวลา การเกิด ส่วนพุ่งเกิน ( $\mu$ sec)	ฟังก์ชัน แบบ จำลองที่ ใช้
	ขอบเขตของมาตรฐาน					
	-1.08 - -1.06	3.40 - 3.76	56 - 62	---	> 1 $\mu$ sec	---
	ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น					
C1300N00	-1.0700	3.5775	58.5455	415.0390	1.2047	2
C1301N00	-1.0711	3.6069	58.7322	415.0390	1.2047	2
C1303N00	-1.0690	3.5905	58.5373	415.0390	1.2047	2
C1310N00	-1.0702	3.5915	58.5382	415.0390	1.2047	2
C1311N00	-1.0712	3.5920	58.7187	415.0390	1.2047	2
C1312N00	-1.0676	3.5907	58.4475	415.0390	1.2047	2
C1321N00	-1.0714	3.5925	58.6993	415.0390	1.2047	2
C1322N00	-1.0674	3.5920	58.4787	415.0390	1.2047	2
C1323N00	-1.0690	3.5922	58.5289	415.0390	1.2047	2
C1330N00	-1.0700	3.5770	58.5551	415.0390	1.2047	2

ตารางที่ 4.9 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 14 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มซึ่งวัดได้จากการวัด)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้าคลื่น (μsec)	เวลาถึงกึ่งค่ายอด (μsec)	ความถี่การแกว่ง (kHz)	ช่วงเวลาที่เกิดการเกิดส่วนพุ่งเกิน (μsec)	ฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้
ขอบเขตของมาตรฐาน						
	-0.97 - -0.95	1.85 - 2.05	43 - 47	---	<1 μsec	---
ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น						
C1400N00	-0.9770	2.0195	44.4837	610.3515	0.8192	2
C1403N00	-0.9761	2.0181	44.3962	610.3515	0.8192	2
C1411N00	-0.9776	2.0372	44.6165	610.3515	0.8192	2
C1412N00	-0.9752	2.0180	44.2944	610.3515	0.8192	2
C1413N00	-0.9761	2.0179	44.3938	610.3515	0.8192	2
C1420N00	-0.9769	2.0309	44.5003	610.3515	0.8192	2
C1422N00	-0.9751	2.0297	44.3065	610.3515	0.8192	2
C1423N00	-0.9760	2.0287	44.4074	610.3515	0.8192	2
C1432N00	-0.9751	2.0282	44.3035	610.3515	0.8192	2
C1433N00	-0.9761	2.0285	44.4020	610.3515	0.8192	2

หมายเหตุ : ค่ายอดที่ได้จากการคำนวณของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีความคลาดเคลื่อนจากมาตรฐาน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากสัญญาณเข้าของตารางที่ 4.9 เป็นคลื่นที่ได้จากการวัด และการใช้เกณฑ์ในการตัดสินของผู้ร่างมาตรฐานมีความแตกต่างจากเกณฑ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ตารางที่ 4.10 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 2 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ, ไม่มีสัญญาณรบกวน)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้าคลื่น ( $\mu$ sec)	เวลาถึงตอนสับ ( $\mu$ sec)	ฟังก์ชันแบบ จำลองที่ใช้
	ขอบเขตของมาตรฐาน			
	0.86 — 0.88	0.49 — 0.53	0.55 — 0.59	---
	ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น			
C0200N00	0.8704	0.5081	0.5709	0
C0202N00	0.8703	0.5051	0.5672	0
C0203N00	0.8707	0.5071	0.5693	0
C0211N00	0.8674	0.5058	0.5685	0
C0212N00	0.8697	0.5038	0.5650	0
C0221N00	0.8674	0.5045	0.5665	0
C0222N00	0.8681	0.5015	0.5624	0
C0223N00	0.8684	0.5035	0.5652	0
C0230N00	0.8670	0.5038	0.5656	0
C0231N00	0.8665	0.5036	0.5651	0

ตารางที่ 4.11 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 7 (อิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ, มีสัญญาณรบกวน)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้าคลื่น ( $\mu$ sec)	เวลาถึงตอนสับ ( $\mu$ sec)	ฟังก์ชันแบบ จำลองที่ใช้
	ขอบเขตของมาตรฐาน			
	0.86 — 0.88	0.49 — 0.53	0.55 — 0.59	---
	ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น			
C0700N04	0.8689	0.5069	0.5705	0
C0700N10	0.8648	0.5037	0.5670	0
C0701N06	0.8680	0.5071	0.5706	0
C0703N02	0.8691	0.5078	0.5708	0
C0710N04	0.8701	0.5075	0.5688	0
C0711N10	0.8696	0.5099	0.5700	0
C0722N10	0.8723	0.5073	0.5710	0
C0723N08	0.8773	0.5211	0.5743	1
C0733N10	0.8748	0.5082	0.5672	1
C0732N05	0.8702	0.5081	0.5696	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 12 (อิมพัลส์ไฟฟ้าสลับซึ่งวัดได้จากการทดลอง)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้าคลื่น ( $\mu$ sec)	เวลาถึงตอนลับ ( $\mu$ sec)	ฟังก์ชันแบบ จำลองที่ใช้
	ขอบเขตของมาตรฐาน			
	0.84 — 0.87	0.48 — 0.54	0.51 — 0.56	---
	ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น			
C1200N00	0.8663	0.4979	0.5114	2
C1203N00	0.8636	0.4973	0.5113	2
C1211N00	0.8658	0.4981	0.5129	2
C1212N00	0.8656	0.4997	0.5140	2
C1213N00	0.8637	0.4993	0.5140	2
C1220N00	0.8625	0.4953	0.5083	2
C1221N00	0.8625	0.4957	0.5084	2
C1222N00	0.8616	0.4950	0.5079	2
C1230N00	0.8648	0.4964	0.5100	2
C1233N00	0.8608	0.4940	0.5076	2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 5 (อิมพัลส์สวิตชิ่งเต็ม, ไม่มีสัญญาณรบกวน)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาถึงค่ายอด ( $\mu$ sec)	เวลาถึงกึ่งค่ายอด ( $\mu$ sec)
	ขอบเขตของมาตรฐาน		
	0.94 — 0.96	240 — 260	2400 — 2600
	ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น		
C0500N00	0.9502	249.50	2496.50
C0501N00	0.9471	253.00	2499.00
C0503N00	0.9512	249.00	2501.50
C0511N00	0.9471	245.50	2499.00
C0512N00	0.9516	253.00	2508.00
C0521N00	0.9471	246.00	2499.00
C0522N00	0.9516	253.00	2508.00
C0523N00	0.9511	249.50	2501.50
C0530N00	0.9502	249.50	2496.5
C0533N00	0.9511	249.5	2501.5

ตารางที่ 4.14 ผลลัพธ์เมื่อสัญญาณเข้าเป็นกรณีที่ 10 (อิมพัลส์สวิตชิงเต็ม, มีสัญญาณรบกวน)

ชื่อไฟล์	ค่ายอด (MV)	เวลาถึงค่ายอด ( $\mu$ sec)	เวลาถึงกึ่งค่ายอด ( $\mu$ sec)
	ขอบเขตของมาตรฐาน		
	0.94 — 0.96	240 — 260	2400 — 2600
	ค่าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น		
C1000N04	0.9494	246.84	2504.34
C1000N10	0.9488	244.24	2510.74
C1001N06	0.9493	249.33	2509.33
C1002N04	0.9489	239.90	2504.40
C100.N02	0.9499	249.06	2505.56
C1010N04	0.9513	255.06	2501.06
C1011N10	0.9532	267.12	2502.12
C1022N10	0.9502	252.03	2510.53
C1023N08	0.9500	250.74	2508.24
C1023N10	0.9484	247.58	2511.08

หมายเหตุ : เวลาถึงค่ายอดบางค่าจากการคำนวณในที่นี้มีความคลาดเคลื่อนจากมาตรฐาน ทั้งนี้เราสามารถแก้ไขได้โดยการพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการคำนวณหาพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์ โดยได้นำแนวทางในการวิเคราะห์รูปคลื่นที่มีการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินตามมาตรฐาน IEC มาเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ช่วยหาพารามิเตอร์จากข้อมูลเต็มหน่วยที่วัดได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคป ซึ่งมีประโยชน์คือ ผลลัพธ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น เนื่องจากขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จำกัดอยู่ที่การวิเคราะห์รูปคลื่นที่ให้ออกมาตามมาตรฐานเท่านั้น การรับข้อมูลจึงเป็นการอ่านจากไฟล์ข้อมูล ในการนำไปใช้งานจริง รูปคลื่นที่นำมาวิเคราะห์ได้จากการวัดตรงจากดิจิตอลออสซิลโลสโคป จึงต้องมีการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมเพื่อเป็นการนำคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเชื่อมต่อกับดิจิตอลออสซิลโลสโคปนั้น อีกทั้งยังต้องมีการวิเคราะห์รูปคลื่นเพิ่มเติมขณะที่อ่านค่าเข้ามาด้วยว่า เป็นรูปคลื่นที่สัมพันธ์กับอัลกอริทึมที่ใช้หรือไม่ ซึ่งต้องนำไปพัฒนาต่อไป

ในการวิจัยการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยด้วยวิธีต่างๆในอดีตนั้น หากเป็นการเขียนด้วยวิธีประดิษฐ์ฟังก์ชัน รูปร่างของรูปคลื่นเฉลี่ยขึ้นอยู่กับฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้ บางบทความกล่าวถึงบางฟังก์ชันแบบจำลองที่ยึดกับตัวฟังก์ชันเองมากเกินไป กล่าวคือจุดทุกจุดของข้อมูลดิบเมื่อนำมาประดิษฐ์ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันเพียงฟังก์ชันเดียว บางบทความกล่าวถึงการเขียนรูปคลื่นเฉลี่ยที่มีความยืดหยุ่น แต่ยังคงต้องการการพัฒนาต่อไป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เพิ่มความยืดหยุ่นโดยการแยกการคำนวณเป็น 2 ส่วนที่เป็นอิสระต่อกัน โดยผลการคำนวณส่วนมากอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

วิธีการหลักที่ใช้ในอัลกอริทึมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำหรับการวิเคราะห์รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มได้แก่ การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยในขั้นแรก และคำนวณส่วนตกค้างเพื่อนำมาตัดสินวิธีการหาพารามิเตอร์ในขั้นต่อไป เนื่องจากเราทราบว่ารูปคลื่นอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีรูปร่างทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันหนึ่ง วิธีที่ใช้ในการคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยในที่นี้จึงใช้การวิเคราะห์โดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันเป็นฐาน

ในการประดิษฐ์ฟังก์ชัน การเลือกค่าเริ่มต้นมีความสำคัญขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรที่ใช้ หากตัวแปรที่ใช้มีมาก การกำหนดค่าเริ่มต้นในปริภูมิเวกเตอร์ยิ่งทวีความสำคัญมาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้คัลล์มานฟิลเตอร์ช่วยหาค่าเริ่มต้น ซึ่งสามารถช่วยได้ในระดับ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้คัลล์มานฟิลเตอร์ยังต้องคำนึงถึงค่าเริ่มต้นของมันเองด้วย การวิเคราะห์หาค่าเริ่มต้นจึงเป็นเรื่องซับซ้อนซึ่งต้องนำไปพัฒนาต่อไป

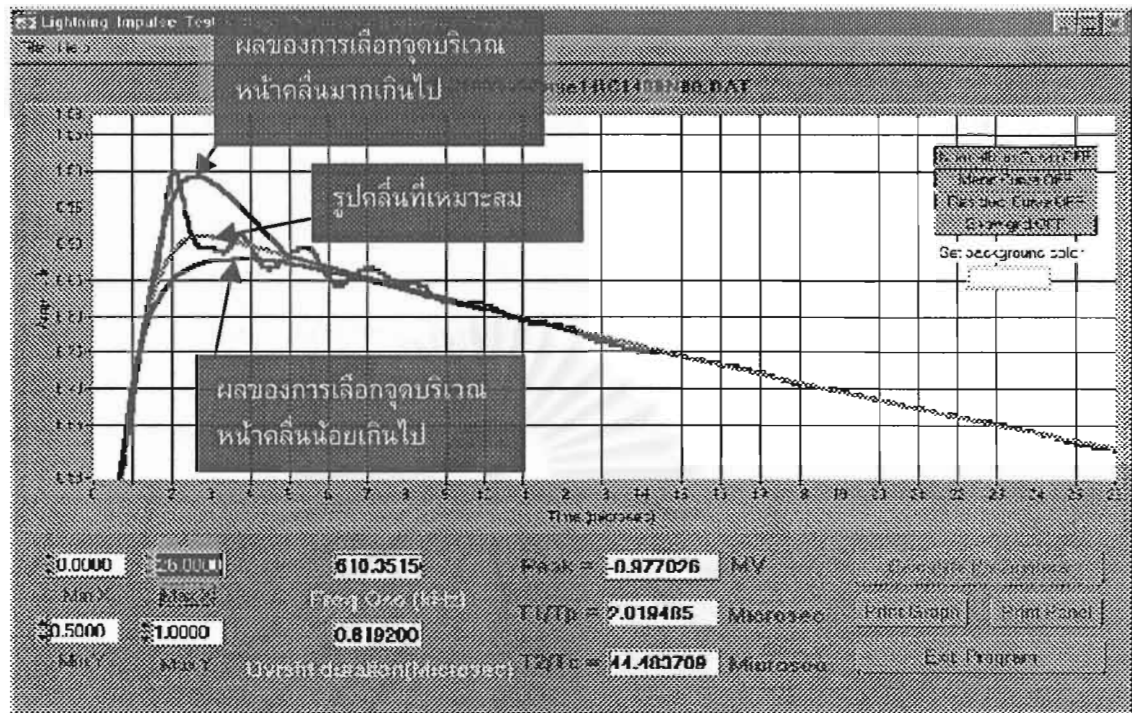


การเลือกจุดกำเนิดของรูปคลื่นมีความสำคัญต่อการเลือกจุดเพื่อนำไปประดิษฐ์ฟังก์ชัน เนื่องจากค่าของสมการเมื่อคำนวณที่เวลาก่อนจุดกำเนิดของรูปคลื่นมีค่าต่างจากรูปคลื่นที่วัดได้ ซึ่งในที่นี้เมื่อทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้วมีค่าใกล้เคียงกัน การเลือกจุดกำเนิดในที่นี้อาศัยการเฉลี่ยช่วงเวลาที่เป็นการพรีทริกบางส่วน ในการเฉลี่ยดังกล่าว หากพบสัญญาณรบกวนบางค่าซึ่งมีค่าสูงผิดปกติ ทำให้รูปคลื่นที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้วมีค่าออฟเซต เป็นผลให้อัลกอริทึมที่นำเสนอใช้ไม่ได้ผล

การเลือกจุดที่จะนำไปประดิษฐ์ฟังก์ชันมีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าการเลือกค่าเริ่มต้น ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อเป็นการลดมิติของเวกเตอร์ตัวแปร จะทำการประดิษฐ์ 2 ครั้งได้แก่ส่วนหางคลื่นและส่วนหน้าคลื่น โดยปกติ การเลือกจุดเพื่อประดิษฐ์ฟังก์ชันนั้นจะไม่เลือกจุดที่คาดว่าเป็นส่วนที่เกิดการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกิน ในการประดิษฐ์หลังคลื่น เนื่องจากส่วนที่อาจเกิดการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินมีจำนวนจุดน้อยกว่าจำนวนจุดที่นำมาประดิษฐ์ช่วงหลังคลื่นมาก ปัญหาในการประดิษฐ์หลังคลื่นจึงไม่เกิด ในการประดิษฐ์หน้าคลื่น เนื่องจากจำนวนจุดที่ใช้ในการประดิษฐ์ช่วงหน้าคลื่นมีน้อย การนำจุดที่คาดว่าเป็นการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินบริเวณค่ายอดมารวมกับจุดบริเวณหน้าคลื่นเพื่อทำการประดิษฐ์เพียงเล็กน้อยมีผลทำให้รูปคลื่นเฉลี่ยมีส่วนพุ่งเกินได้ ซึ่งเป็นสิ่งไม่พึงปรารถนา ในบางกรณี จุดที่นำมาประดิษฐ์ช่วงหน้าคลื่นมีน้อยเกินไป อาจเป็นผลให้การวิเคราะห์ส่วนตกค้างซึ่งคำนวณจากรูปคลื่นเฉลี่ยมีความผิดพลาดได้ เนื่องจากรูปคลื่นเฉลี่ยไม่ได้ลากผ่านการแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินอย่างแท้จริง ดังนั้น การเลือกจุดเพื่อนำไปประดิษฐ์ฟังก์ชันจึงสำคัญ พิจารณารูปที่ 5.1 แสดงผลของการเลือกจุดบริเวณหน้าคลื่นซึ่งมีผลต่อรูปคลื่นเฉลี่ย

ในการวิเคราะห์ส่วนตกค้างมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงได้แก่ การแกว่งที่หน้าคลื่น การวิเคราะห์โดยใช้วิธี FFT ไม่ควรนำส่วนของหน้าคลื่นมาวิเคราะห์ด้วย เนื่องจากอาจมีการแกว่งดังกล่าวในการหาช่วงเวลาการเกิดของส่วนพุ่งเกินเช่นกัน ในที่นี้ใช้วงจรกรองแบบผ่านต่ำเพื่อกำจัดการแกว่งเล็กน้อยที่อาจเกิดซ้อนทับส่วนพุ่งเกิน ทำให้ช่วงเวลาของการเกิดส่วนพุ่งเกินที่คำนวณได้มีค่ามากขึ้นเล็กน้อย

ในกรณีที่การวิเคราะห์พารามิเตอร์เป็นการวิเคราะห์จากข้อมูลดิบ การเลือกอันดับและค่า  $M$  สำหรับวงจรกรองชนิดทำให้เรียบมีความสำคัญ นั่นคือเลือกอย่างไรจึงไม่กรองสัญญาณต้นฉบับมากเกินไป การหาพารามิเตอร์จึงถูกต้อง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ในบางกรณีที่มีการแกว่งที่หน้าคลื่น จึงทำให้การวิเคราะห์มีความซับซ้อนมากขึ้น นั่นคือต้องตรวจจับการแกว่งนั้นให้พบแล้วลากรูปคลื่นเฉลี่ยท้องถิ่นผ่านเพื่อที่จะวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางเวลาได้ถูกต้อง ในการวิเคราะห์ค่ายอด อันดับและค่า  $M$  ของวงจรกรองมีความต่างกับการวิเคราะห์ช่วงหน้าคลื่น เนื่องจากบริเวณค่ายอดมีความโค้งของรูปคลื่นซึ่งต้องคำนึงถึงอันดับที่ใช้เป็นสำคัญ



รูปที่ 5.1 ผลของการเลือกจุดบริเวณหน้าคลื่นในการประดิษฐ์ฟังก์ชัน

ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันสำหรับรูปคลื่นสลับ เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการประดิษฐ์รูปคลื่นสลับที่หน้าคลื่นเท่านั้น จำนวนจุดที่ใช้จึงมีเพียงจุดบริเวณหน้าคลื่นถึงค่ายอด ปัญหาที่สำคัญในการประดิษฐ์รูปคลื่นชนิดนี้ได้แก่ การคำนวณเวลาถึงตอนสลับ การคำนวณในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้จุดตัดของรูปคลื่นเฉลี่ยกับเส้นตรงซึ่งได้จากการประดิษฐ์ช่วงรูปคลื่นขาลงเข้าสู่ศูนย์ขณะสลับ ความถูกต้องของเวลาถึงตอนสลับขึ้นอยู่กับ การเลือกจุดช่วงรูปคลื่นขาลงขณะสลับ เพื่อนำไปประดิษฐ์เป็นฟังก์ชันเส้นตรง การเลือกจุดไม่เหมาะสมจะมีผลให้ทั้งค่ายอดและเวลาถึงตอนสลับผิดพลาดได้ สิ่งควรระวังอีกประการหนึ่งได้แก่การเลือกเกณฑ์ตัดสินว่าแบบจำลองใดเหมาะสม ในกรณีที่รูปคลื่นสลับมีการแกว่งที่หน้าคลื่น การใช้เกณฑ์กำลังสองน้อยสุดสำหรับจุดที่นำมาประดิษฐ์ทุกจุดในการตัดสินยังไม่ดีพอ เนื่องจากค่ายอดมีความสำคัญ การคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เกณฑ์กำลังสองน้อยสุดสำหรับจำนวนจุดส่วนหนึ่งบริเวณค่ายอด ทั้งนี้ ได้ให้ความมั่นใจว่า รูปคลื่นเฉลี่ยที่มีค่าต่ำสุดในเกณฑ์ที่ใช้ต้องผ่านกึ่งกลางการแกว่ง

ในการคำนวณพารามิเตอร์สำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตชิงเพิ่มเติม อัลกอริทึมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การคำนวณจากข้อมูลดิบ เนื่องจากข้อมูลดิบที่วัดได้ของรูปคลื่นชนิดนี้มีบริเวณที่เป็นยอดกว้างมาก การระบุค่ายอดเป็นไปได้ยาก ในที่นี้ใช้ช่วงกรองชนิดทำให้เรียบในการช่วยหาค่ายอด ซึ่งการเลือกอันดับและค่า  $M$  มีความสำคัญเช่นเดียวกับในกรณีของการวิเคราะห์รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า ในกรณีที่รูปคลื่นอิมพัลส์สวิตชิงมีสัญญาณรบกวนผสมอยู่ การหาค่ายอดมี

ความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากสัญญาณรบกวนมีลักษณะเป็นสัญญาณสุ่ม เช่นเดียวกับการวิเคราะห์จุดเริ่มต้นจริง มีความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากสัญญาณรบกวนเช่นกัน ในการคำนวณหาค่าเหล่านี้จึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ ในอนาคต หากมาตรฐานมีการกล่าวถึงการวิเคราะห์การแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินบริเวณค่ายอดของรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซึ่งโดยใช้รูปคลื่นเฉลี่ย เราสามารถนำอัลกอริทึมสำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้าที่นำเสนอนี้ไปประยุกต์ใช้ได้

โดยสรุปแล้ว ถึงแม้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์ส่วนมากอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ในการนำโปรแกรมไปพัฒนาต่อไป เราสามารถปรับปรุงอัลกอริทึมให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นโดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. พัฒนาการหาค่าเริ่มต้นเพื่อนำไปประดิษฐ์ฟังก์ชัน
2. หาฟังก์ชันแบบจำลองที่เหมาะสมยิ่งขึ้น
3. ปรับปรุงการหาจุดกำเนิดของรูปคลื่น
4. ระมัดระวังในการเลือกจุดเพื่อนำไปประดิษฐ์ฟังก์ชัน
5. เพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์การแกว่งที่หน้าคลื่น
6. ศึกษาการใช้วงจรกรองชนิดทำให้เรียบเพื่อการเลือกอันดับและค่า  $M$  ที่เหมาะสม
7. พัฒนาการหาเวลาถึงตอนสับของอิมพัลส์ไฟฟ้าสับ
8. พัฒนาการวิเคราะห์ค่ายอดและจุดเริ่มต้นจริงของคลื่นอิมพัลส์สวิตซึ่ง
9. นำวิธีการประดิษฐ์ฟังก์ชันในที่นี้เพื่อประยุกต์กับคลื่นอิมพัลส์กระแส

## รายการอ้างอิง

1. IEC 1083-2. 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.
2. IEC 60-1. High-voltage test techniques - Part 1 : General definitions and test requirements, 1989-11.
3. McComb, T.R., and Lagnese, J.E. Calculating the parameters of full lightning impulses using model-based curve fitting. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 6 No.4 (October 1991): 1386-1394.
4. Li, Y.M., Kuffel, J., and Janischewskyj, W. Exponential fitting algorithms for digitally recorded HV impulse parameter evaluation. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 8 No. 4 (October 1993): 1727-1735.
5. Pe' rez, J., and Marti' nez, J. Kalman filter algorithm for digitally recorded lightning impulse parameter evaluation. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 11 No. 4 (October 1996): 1713-1719.
6. Sato, Shuji., Wakiimoto, Takayuki., Harada, Tatsuya., Saeki, Masamori., and Sasaki, Masayuki. Parameter determination of IEC-TDG by directly solving non-linear equation. 10<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering 10 (August 1997): 51-54.
7. Oliveira, V.R., and Miranda, G.C. Application of digital filter to lightning impulse parameter evaluation. 10<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering (August 1997): 431-434.
8. Garnacho, F., et al. Evaluation procedures for lightning impulse parameters in case of waveforms with oscillations and/or an overshoot. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 12 No. 2 (April 1997): 640-649.
9. Pe' rez, J., and Marti' nez, J. Digitally recorded lightning impulse with overshoot parameter evaluation by using the kalman filtering method. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 13 No. 4 (October 1998): 1005-1014.

10. Arne, P., Brede, P., Werle, E., and Gockenbach, H. A new method of determining the mean curve of lightning impulse according to IEC 60060-1. High Voltage Engineering Symposium (1999): 1.74.s21-1.77.s21.
11. Leopoldo, Angrisani., and Pasquale Daponte. A wavelet based approach for measurements on high voltage impulses. High Voltage Engineering Symposium (1999): 1.205.p4-1.208.p4 .
12. Toshiji, Kato., and Tomoyuki, Akahane. Mean curve fitting using tension splines for impulse parameter evaluation. High Voltage Engineering Symposium (1999): 1.78s21-1.81s21.
13. สำรวย สันข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2528.
14. IEC 60-1. High-voltage test techniques-Part 2 : Measuring system, 1994-11
15. IEC 1083-1. Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests – Part1: Requirements for digital recorders, 1991-08.
16. Sophocles, J., Orfanidis. Introduction to Signal Processing. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
17. Robert, Grover, Brown. Introduction to random signal analysis and Kalman filtering. USA: John Wiley & Sons, 1983.
18. Stephen, G., Nash., and Ariela, Sofer. Linear and Nonlinear Programming. Singapore: McGraw-Hill, 1996.



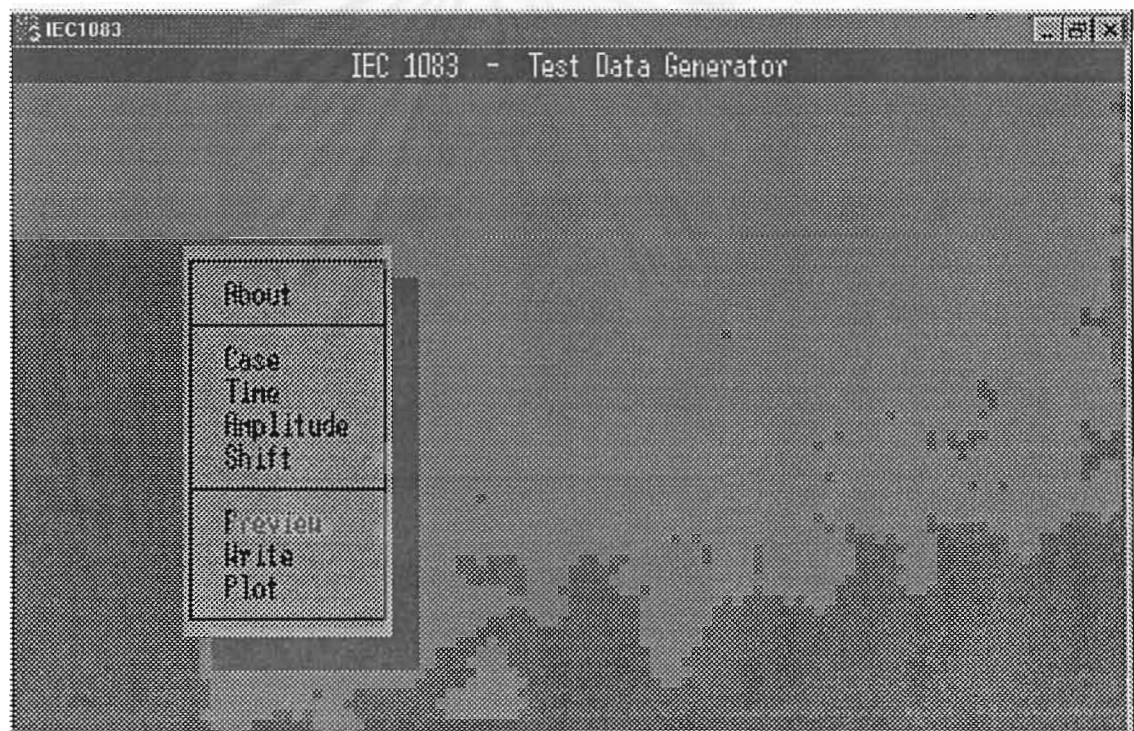
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### โปรแกรม TDG

TDG ย่อมาจาก Test Data Generator เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีมาพร้อมกับมาตรฐาน IEC 1083-2 ทำหน้าที่สร้างรูปคลื่นอ้างอิงเพื่อนำไปทดสอบอัลกอริทึมที่ใช้วิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นในห้องทดลองต่างๆ โปรแกรมดังกล่าวทำงานบนระบบปฏิบัติการ DOS มีรูปร่างดังรูป ก.1



รูปที่ ก.1 หน้าจอแรกของโปรแกรม TDG

หน้าที่ของเมนูหลักต่างๆ มีดังต่อไปนี้

1. เมนู "Case" : สำหรับการเลือกรูปคลื่นอ้างอิงทั้งหมด 15 รูปคลื่น ประกอบด้วย คลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้าเต็ม คลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้าตัด คลื่นอิมพัลส์สวิตชิงเต็ม และคลื่นอิมพัลส์กระแส

2. เมนู "Time" : ค่าที่ตั้งได้สำหรับเมนูนี้ได้แก่ ค่าทริกเกอร์ เป็น %ของจำนวนจุดข้อมูลเข้า ช่วงเวลาชักตัวอย่างมีหน่วยเป็น ตัวอย่างต่อวินาที และจำนวนจุดของข้อมูลเข้า
3. เมนู "Amplitude" : ค่าที่ตั้งได้สำหรับเมนูนี้ได้แก่
  - ระดับออฟเซ็ท
  - ค่าการเบี่ยงเบนเต็มสเกล (Full scale deflection)
  - ระดับการควอนไทซ์
  - ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนภายใน ซึ่งมีการกระจายแบบเกาส์เซียน
4. เมนู "Shift" : สำหรับการกระตุ้นเล็กน้อยทางเวลาของการบันทึกจากดิจิไทเซอร์ และการเลื่อนเล็กน้อยจากระดับออฟเซ็ทของดิจิไทเซอร์ เราสามารถตั้งค่าได้จากเมนูนี้ โดยการเลื่อนไปทางขวา 1 ก้าวมีค่าเท่ากับการเลื่อนไป 1/4 ของช่วงเวลาชักตัวอย่าง และการเลื่อนขึ้น 1 ก้าวมีค่าเท่ากับการเลื่อนขึ้น 1/4 ของค่าบิทที่มีนัยยะน้อยสุด (Least significant bit)
5. เมนู "Preview" : ทำการแสดงรูปคลื่นที่เลือก
6. เมนู "Write" : ทำการเขียนไฟล์ข้อมูลเป็นรูปแบบแอสกี



**ภาคผนวก ข**  
**ขอบเขตค่าของพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอ้างอิงตามมาตรฐาน**  
**IEC 1083-2**

ตารางที่ ข.1 ขอบเขตค่าของพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 1083-2

รูปคลื่น / กรณีที่	ค่ายอด (MV)	เวลาหน้าคลื่น / เวลาถึงค่ายอด ( $\mu\text{sec}$ )	เวลาถึงกึ่งค่ายอด / เวลาถึงตอนลับ ( $\mu\text{sec}$ )	ขนาดส่วนพุ่งเกิน / ความถี่การแกว่ง / ช่วงเวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน kHz/( $\mu\text{sec}$ ) / %ค่ายอด
LI / 1,6	1.04 — 1.06	0.81 — 0.87	57.5 — 62.5	—
LIC / 2,7	0.86 — 0.88	0.49 — 0.53	0.55 — 0.59	—
LIFO / 11	0.94 — 0.96	1.07 — 1.19	82 — 91	—
LICFO / 12	0.84 — 0.87	0.48 — 0.54	0.51 — 0.56	—
LILO / 13	-1.08 — -1.06	3.40 — 3.76	56 — 62	$\tau > 1 \mu\text{sec}$ $\beta > 5\%$
LISO / 14	-0.97 — -0.95	1.85 — 2.05	43 — 47	$\tau < 1 \mu\text{sec}$ $\beta > 5\%$
LISL / 3,8	1.04 — 1.06	1.6 — 1.7	45 — 49	$f < 500 \text{ kHz}$ $A \leq 5\%$
LIFA / 4,9	0.96 — 0.99	1.0 — 1.1	48 — 52	$f > 500 \text{ kHz}$ $A > 5\%$
SI / 5,10	0.94 — 0.96	240 — 260	2400 — 2600	—

หมายเหตุ :

ก) ความหมายของตัวย่อและตัวเลขที่ระบุกรณีที่แสดงดังตาราง ข. 2

ตารางที่ ข. 2 ความหมายของคำย่อและตัวเลขกรณีที่ระบุในตารางที่ ข. 1

คำย่อ	ความหมาย	กรณีที่ของรูปคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์		กรณีที่ของรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบจริง
		รูปคลื่นเรียบ	มีสัญญาณรบกวน	
LI	Lightning impulse	1	6	---
LIC	Lightning impulse, chopped	2	7	---
LIFO	Lightning impulse with front oscillations	---	---	11
LICFO	Lightning impulse with front oscillations, chopped	---	---	12
LILO	Lightning impulse with long duration overshoot	---	---	13
LISO	Lightning impulse with short duration overshoot	---	---	14
LISL	Lightning impulse with slow oscillation	3	8	---
LIFA	Lightning impulse with fast oscillation	4	9	---
SI	Switching impulse	5	10	---

ข )  $f$  = ความถี่ออสซิลเลชัน

$A$  = ขนาดของความถี่ออสซิลเลชันที่ค่ายอดแรก

$\tau$  = ช่วงเวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน

$\beta$  = ขนาดของส่วนพุ่งเกิน

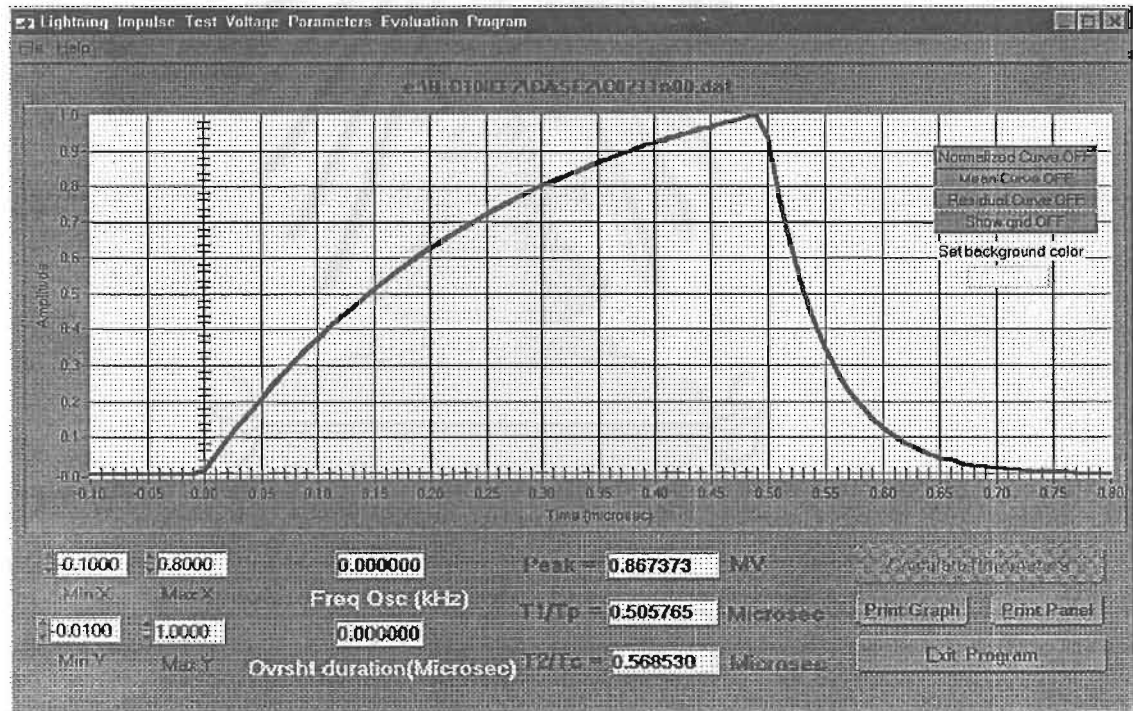
ค ) ขนาดของการแกว่งหรือหรือส่วนพุ่งเกินของอิมพัลส์กรณีที่ 4, 9, 13, 14 อยู่นอก

เกณฑ์ข้อจำกัด  $\pm 5\%$  และอิมพัลส์เหล่านี้ไม่ใช้อิมพัลส์มาตรฐาน

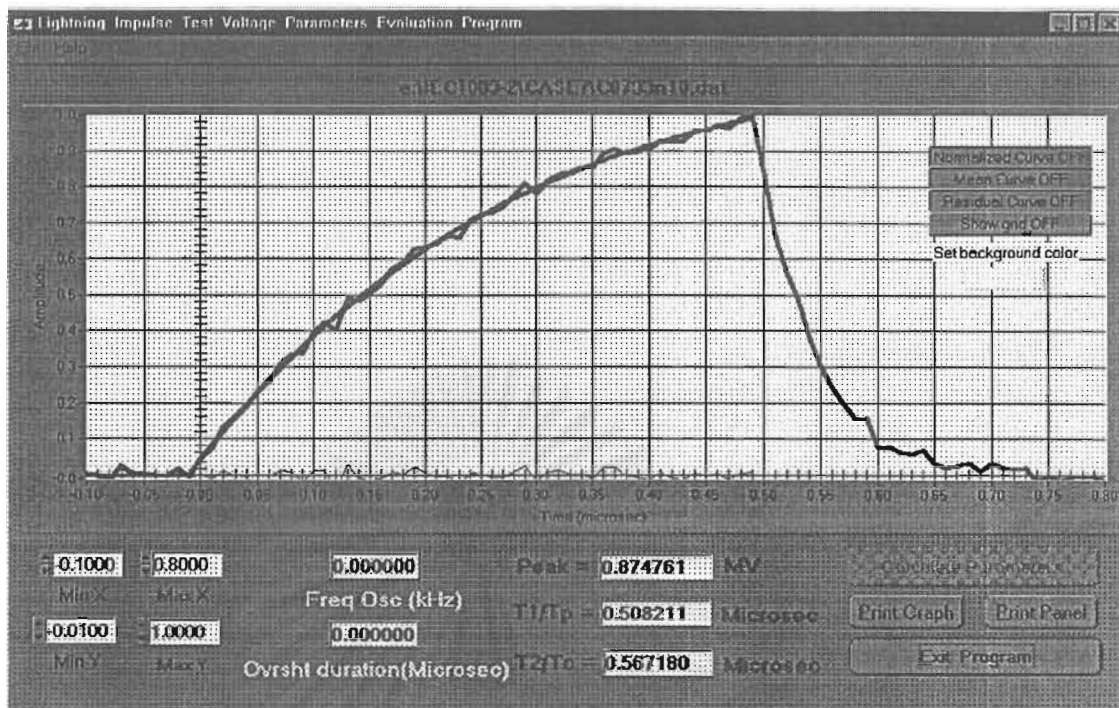
## ภาคผนวก ค

### ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณหาพารามิเตอร์ ของรูปคลื่นอิมพัลส์

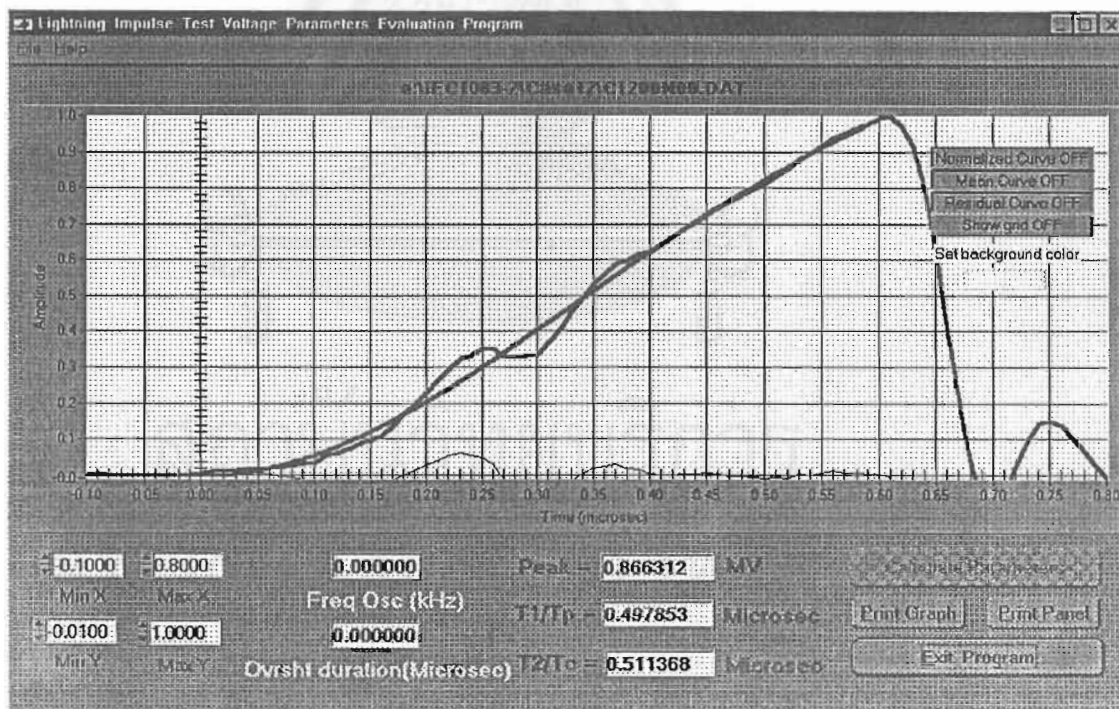
ผลลัพธ์ที่ได้ในที่นี้เป็นารแสดงภาพผลลัพธ์ของการคำนวณรูปคลื่นในกรณีต่างๆจากโปรแกรม เนื่องจากรูปคลื่นในชุดของกรณีหนึ่งๆตั้งได้กล่าวในบทที่ 4 เป็นรูปคลื่นเดียวกัน การแสดงในที่นี้จึงแสดงรูปคลื่นตัวแทนของแต่ละชุดเป็นจำนวน 1 รูปคลื่นในแต่ละกรณีเท่านั้น



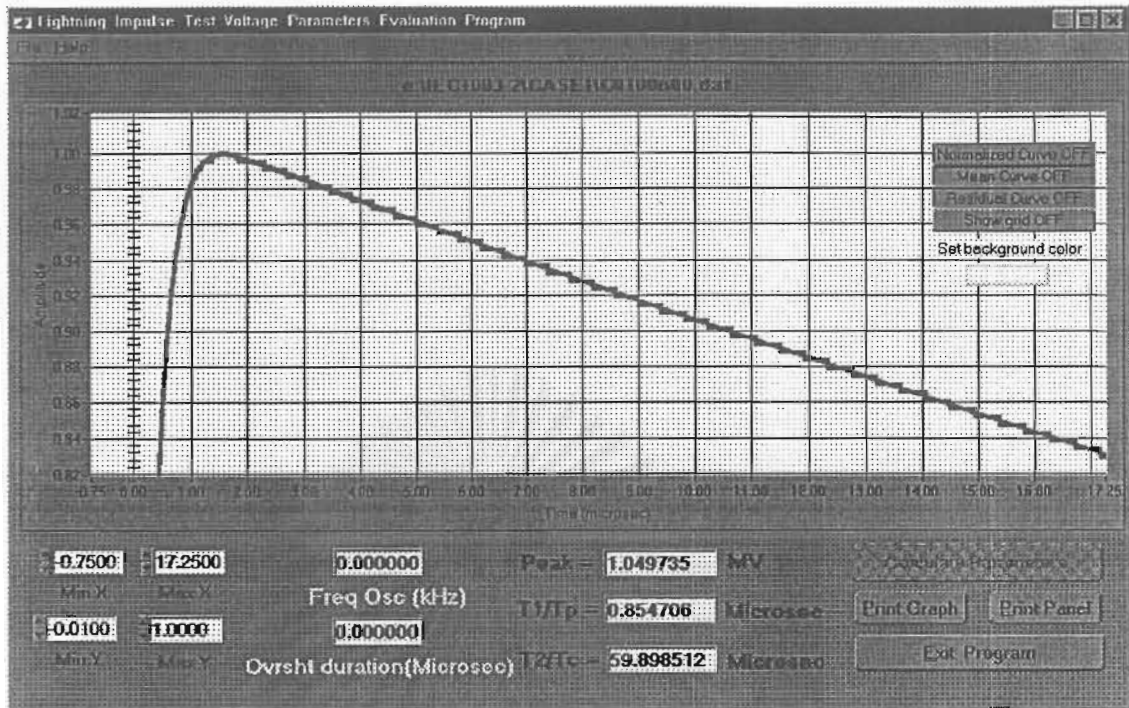
รูปที่ ค.1 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 2



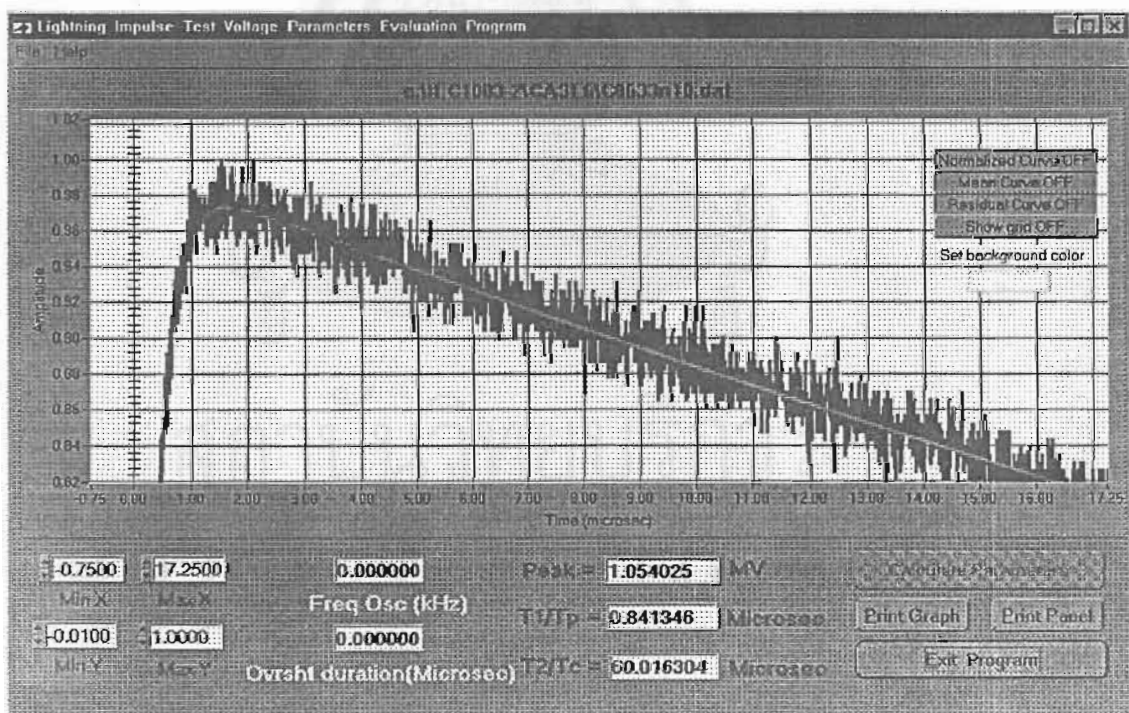
รูปที่ ค.2 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 7



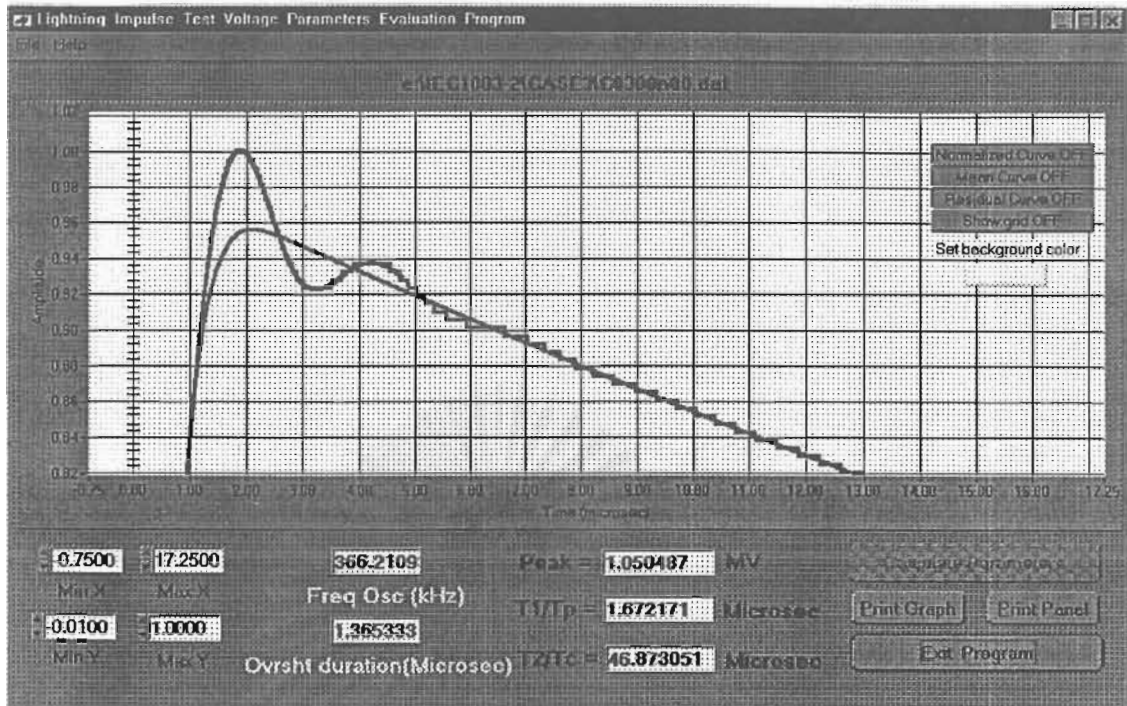
รูปที่ ค.3 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 12



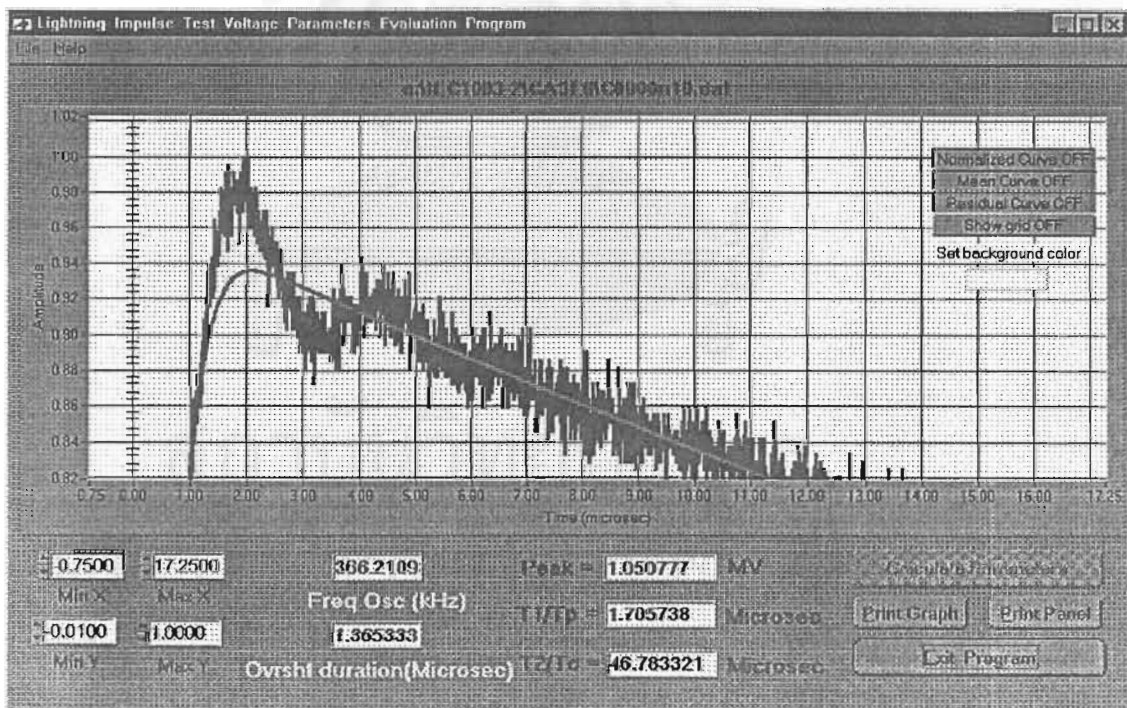
รูปที่ ค.4 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 1 บริเวณค่ายอด



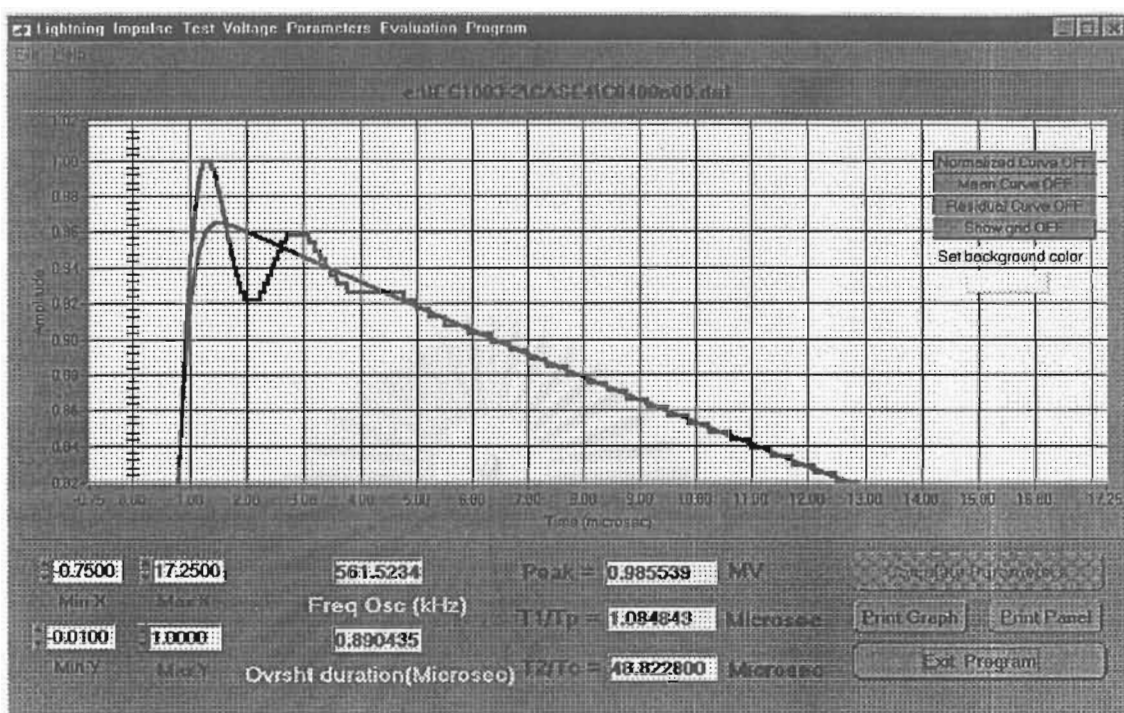
รูปที่ ค.5 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 6 บริเวณค่ายอด



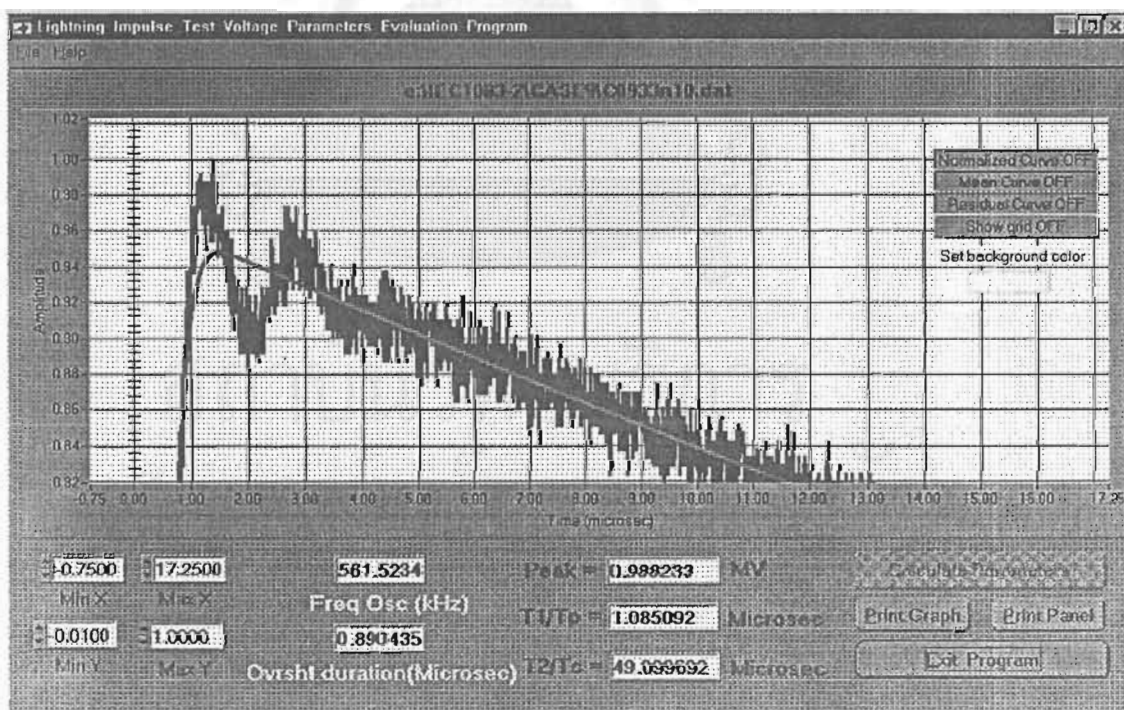
รูปที่ ค.6 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 3 บริเวณค่ายอด



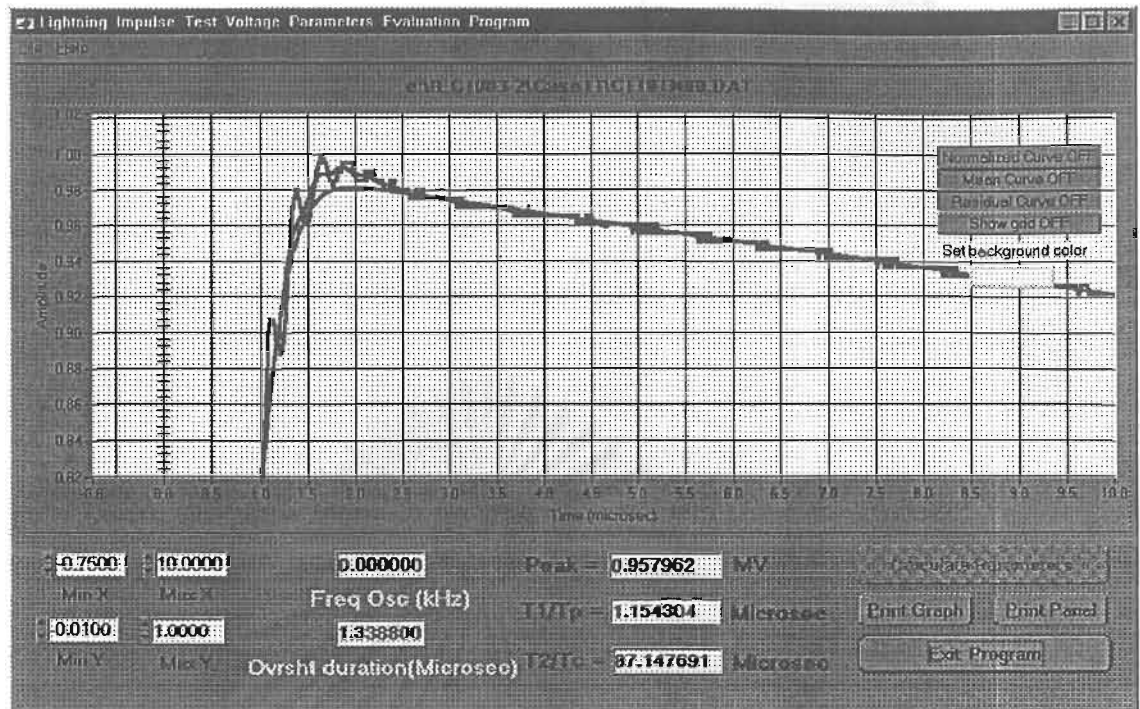
รูปที่ ค.7 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 8 บริเวณค่ายอด



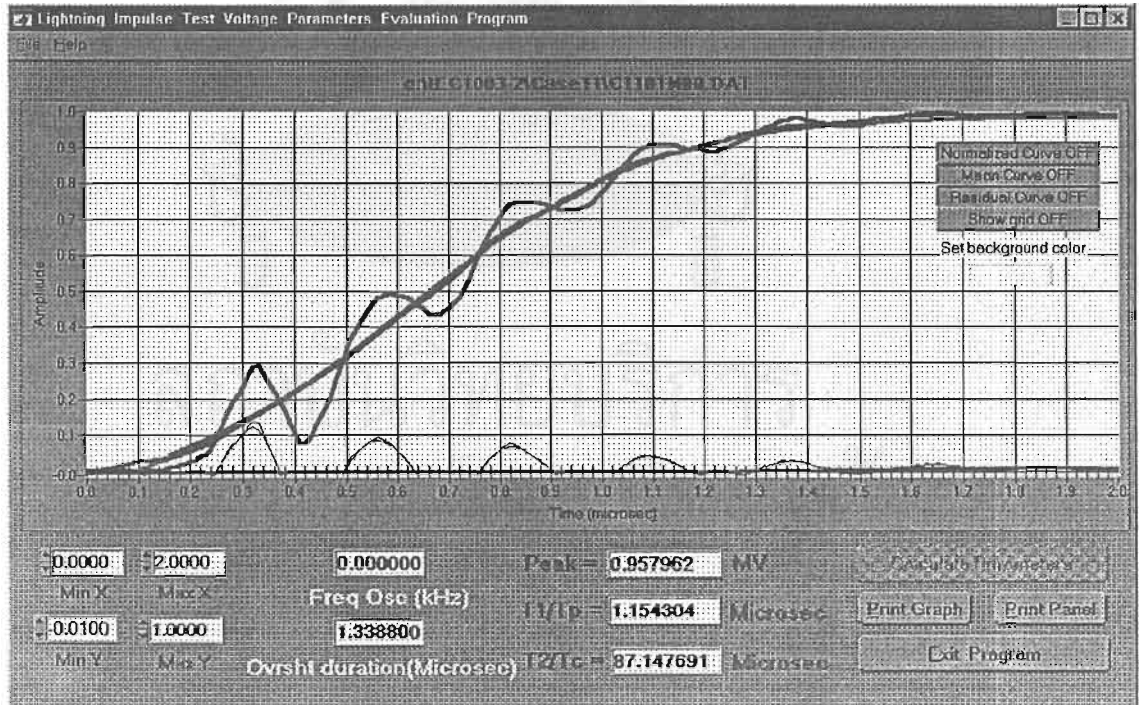
รูปที่ที่ ค.8 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 4 บริเวณค่ายอด



รูปที่ ค.9 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 9 บริเวณค่ายอด

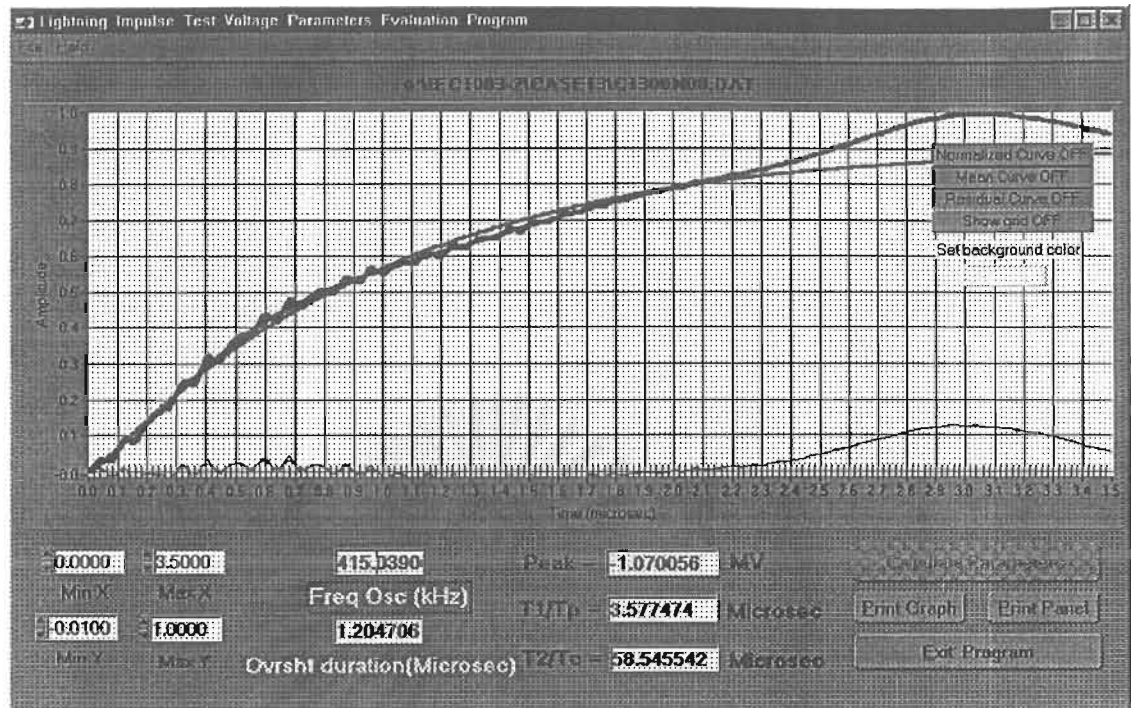


รูปที่ ค.10 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11 บริเวณค่ายอด

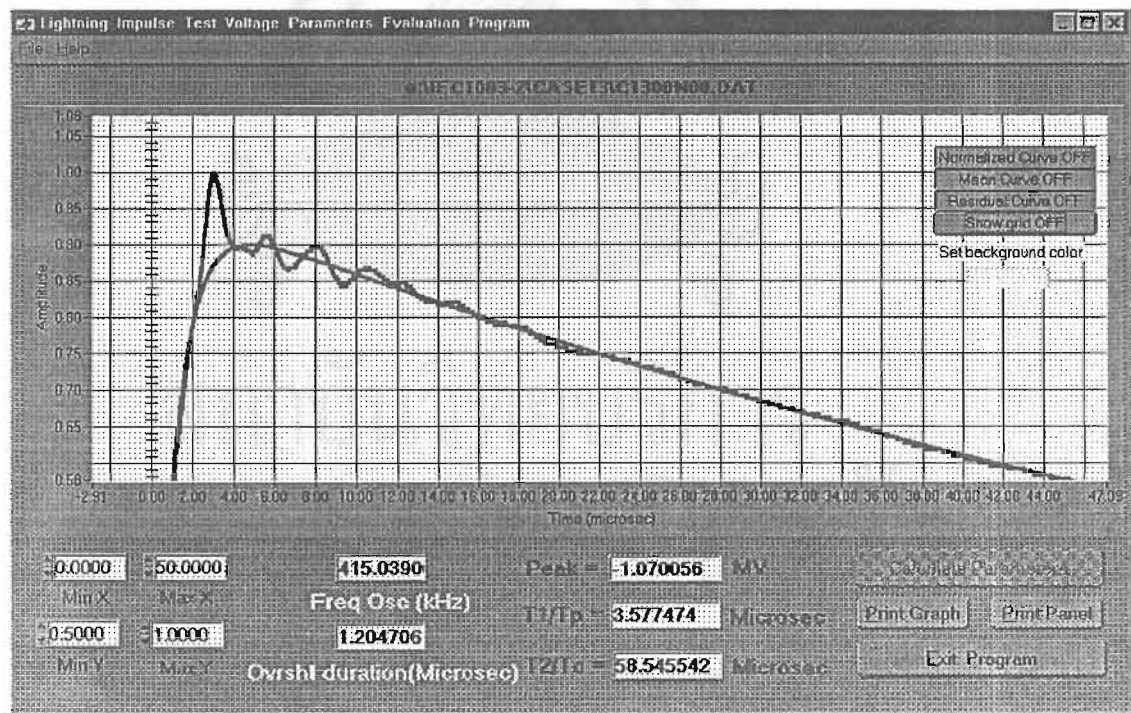


รูปที่ ค.11 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 11 บริเวณหน้าคลื่น

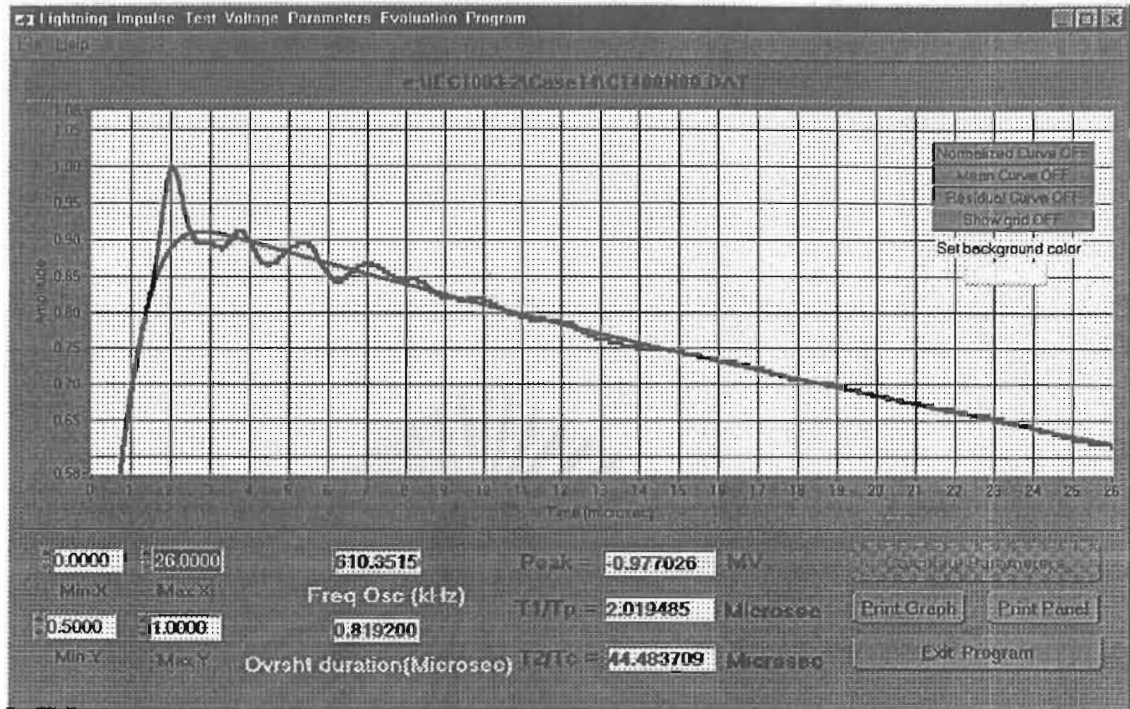




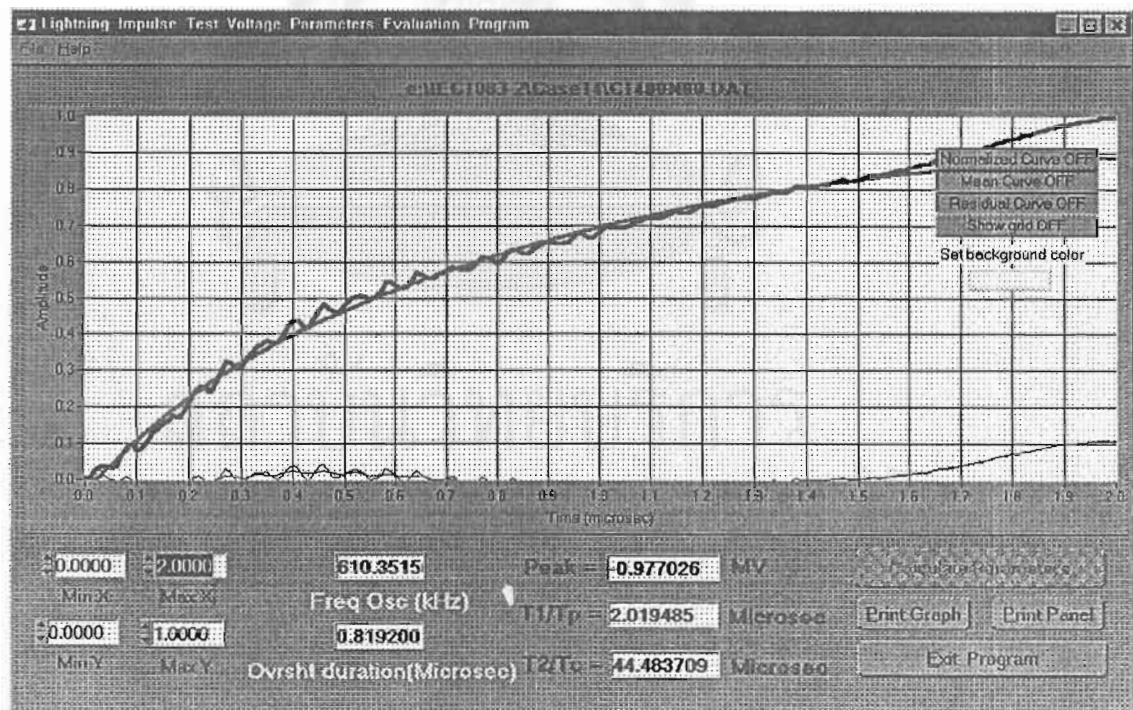
รูปที่ ค.12 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13 บริเวณหน้าคลื่น



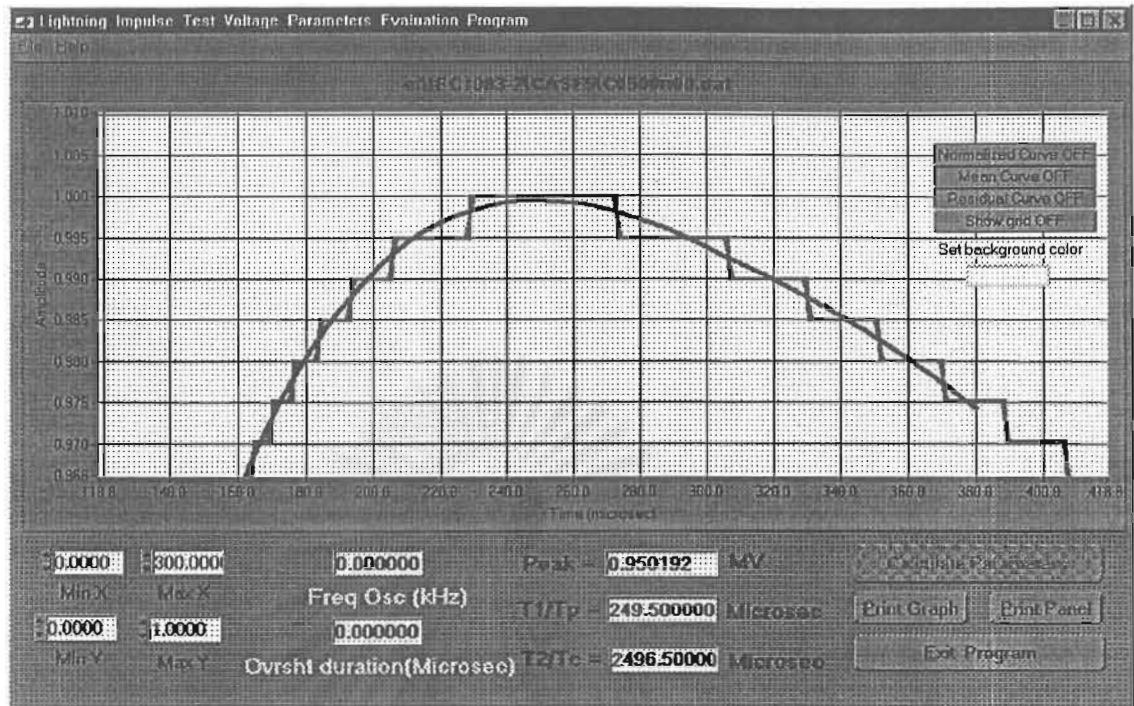
รูปที่ ค.13 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 13 บริเวณค่ายอด



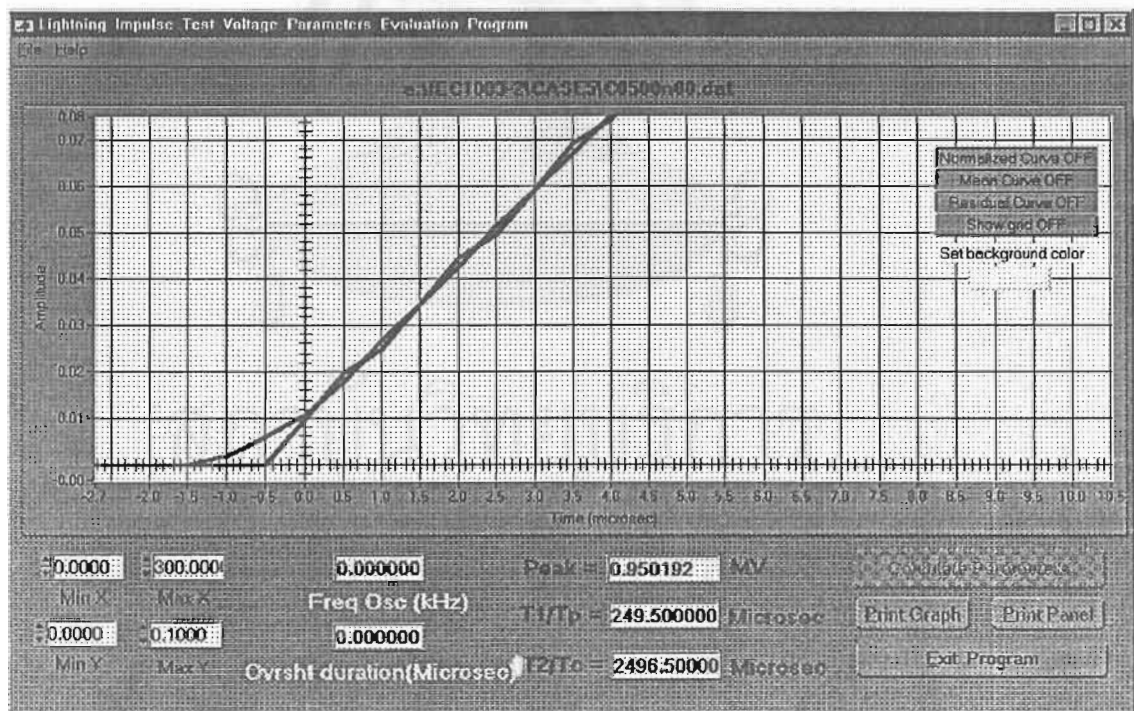
รูปที่ ค.14 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14 บริเวณค่ายอด



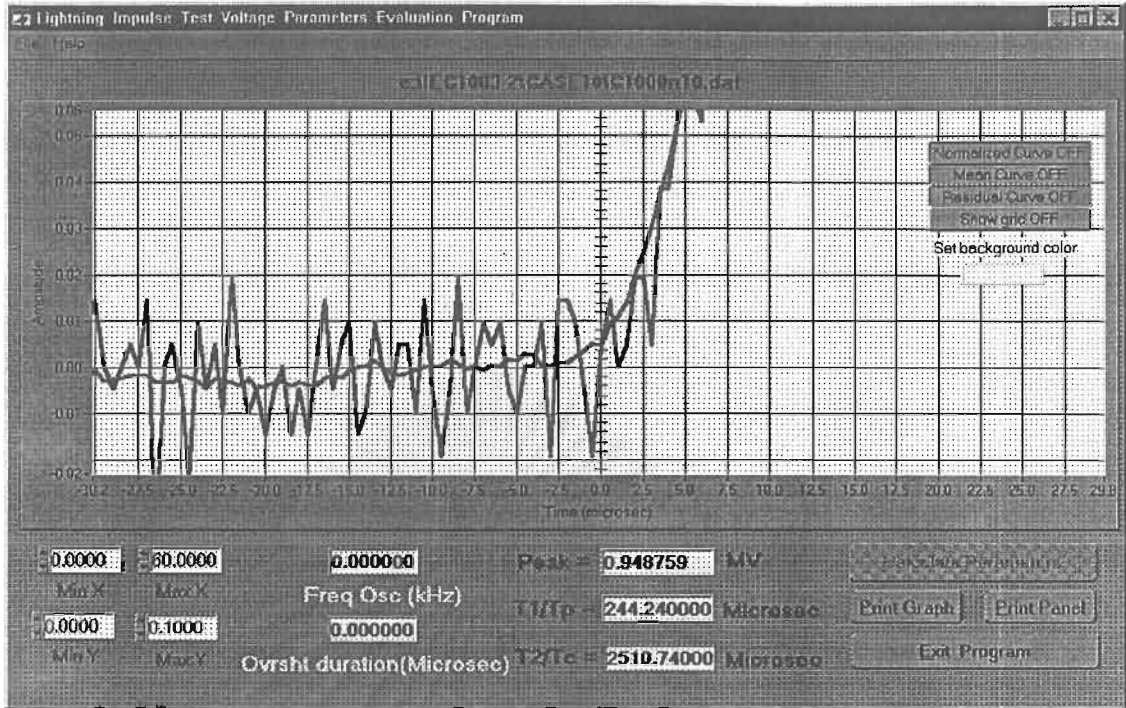
รูปที่ ค.15 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14 บริเวณหน้าคลื่น



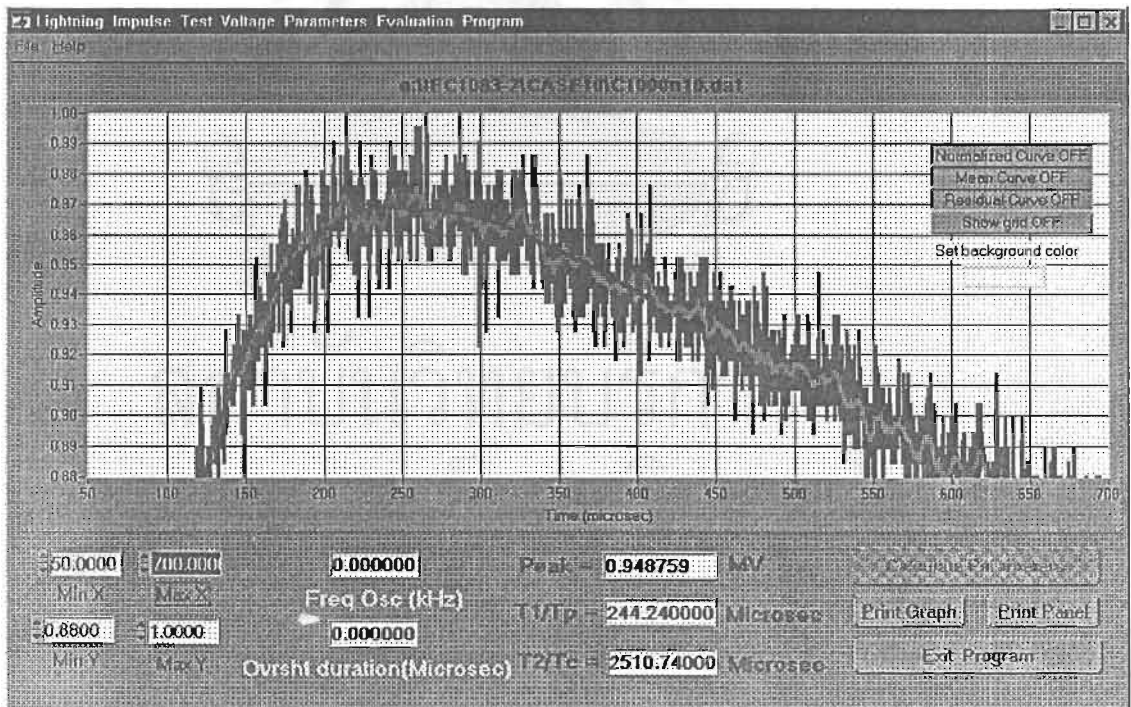
รูปที่ ค.16 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5 บริเวณค่ายอด



รูปที่ ค.17 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 5 บริเวณจุดเริ่มต้นจริง



รูปที่ ค.18 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 10 บริเวณจุดเริ่มต้นจริง



รูปที่ ค.19 ผลการคำนวณรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 10 บริเวณค่ายอด

## ภาคผนวก ง

### เวลาที่ใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

ตารางต่อไปนี้แสดงเวลาโดยเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้มีข้อกำหนดดังนี้ Pentium II 350 MHz และ RAM 64 Mbytes

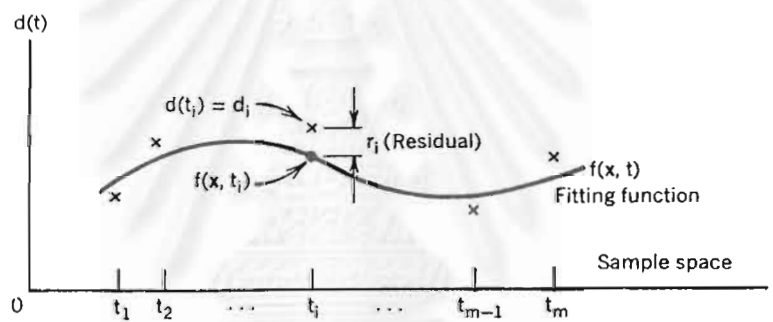
ตารางที่ ง.1 เวลาโดยเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

รูปคลื่นกรณีที่	เวลาที่ใช้โดยเฉลี่ย (วินาที)
1	3
6	5
3	3
8	4
4	2
9	3
11	5
13	4
14	4
2	2
7	3
12	3
5	1
10	2

## ภาคผนวก จ

### การประติษฐ์ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

การประติษฐ์ฟังก์ชัน (Curve fitting) คือการคำนวณหาฟังก์ชันที่สอดคล้องกับข้อมูลเต็มหน่วย (Discrete data) ที่เรามีโดยใช้เกณฑ์ (Criterion) ในการตัดสินอันหนึ่ง เกณฑ์ในการตัดสินที่ใช้กันมากในการประติษฐ์ฟังก์ชันได้แก่ เกณฑ์กำลังสองน้อยที่สุด (Least square criterion) กล่าวอีกนัยหนึ่ง การประติษฐ์ฟังก์ชันคือการใช้ทฤษฎีการทำให้เหมาะที่สุด (Optimization theory) ช่วยหาจุดต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ซึ่งได้มาจากการหาผลรวมของกำลังสองของผลต่างของค่าของฟังก์ชันและข้อมูลที่นำมาประติษฐ์ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกรณีฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น พิจารณารูปที่ จ.1



รูปที่ จ.1 แสดงจุดที่ได้จากการประติษฐ์ฟังก์ชัน

จากรูป เราสามารถเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $h(x)$  ได้ดังนี้

$$h(x) = \sum_{i=1}^m (g_i(x))^2 \quad (\text{จ.1})$$

โดยที่  $g_i(x) = f(x, t_i) - d(t_i) \quad (\text{จ.2})$

โดยที่  $x$  เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรที่ต้องการ

$t_i$  เป็นเวลา

$m$  เป็นจำนวนจุดของข้อมูล

จากสมการ (จ.1) เราสามารถใช้ทฤษฎีการทำให้เหมาะที่สุดคำนวณหาเวกเตอร์  $x$  ที่เหมาะสม โดยการแก้ปัญหา

$$\underset{x}{\text{minimize}} \quad h(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (g_i(x))^2 \equiv \frac{1}{2} G(x)^T G(x) \quad (\text{จ.3})$$

โดยที่  $G$  เป็นเวกเตอร์ที่บรรจุค่าของฟังก์ชัน  $g_i(x)$  ดังนี้

$$G(x) = (g_1(x) \quad g_2(x) \quad \cdots \quad g_m(x))^T \quad (\text{จ.4})$$

สำหรับค่า  $\frac{1}{2}$  ข้างหน้าใส่เพื่อให้การคำนวณหาอนุพันธ์อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น เกรเดียนต์ และเฮสเซียนเมตริกซ์ของปัญหานี้สามารถคำนวณตามลำดับได้ดังนี้

$$\nabla h(x) = \nabla G(x) G(x) \quad (\text{จ.5})$$

$$\nabla^2 h(x) = \nabla G(x) \nabla G(x)^T + \sum_{i=1}^m g_i(x) \nabla^2 g_i(x) \quad (\text{จ.6})$$

ให้  $x_*$  เป็นคำตอบของปัญหานี้ และสมมติว่า ณ จุด  $x_*$   $g(x_*) = 0$  ดังนั้น  $g_i(x_*) = 0$  สำหรับทุก  $i$  กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ส่วนตกค้าง (Residual) ทั้งหมดมีค่าเป็นศูนย์และฟังก์ชันแบบจำลอง (Model function) สามารถประดิษฐ์ข้อมูลได้โดยไม่มีข้อผิดพลาด ดังนั้น  $G(x_*) = 0$  และ  $\nabla h(x) = 0$  ซึ่งสอดคล้องกับสถานะที่จำเป็นอันดับหนึ่ง (First-order necessary condition) ของทฤษฎีการทำให้เหมาะที่สุด จากสมการ (จ.6) ณ จุด  $x_*$

$$\nabla^2 h(x_*) = \nabla G(x_*) \nabla G(x_*)^T \quad (\text{จ.7})$$

จะเห็นว่า เฮสเซียนเมตริกซ์มีนิยามกึ่งบวก (Positive semi-definite) ตามสถานะที่จำเป็นอันดับสอง (Second-order necessary condition) ของทฤษฎีการทำให้เหมาะที่สุด ถ้า  $\nabla G(x_*)$  เป็นเมตริกซ์ที่มีค่าลำดับชั้นเต็ม (Full-rank matrix) แล้ว  $\nabla^2 h(x_*)$  จะมีนิยามบวก (Positive definite)

ในอัลกอริทึมของการทำให้เหมาะที่สุด เราจำเป็นต้องคำนวณหาทิศทางการค้นหา (Search direction)  $p$  ในแต่ละรอบ (Iterate) ของอัลกอริทึมโดยใช้สมการที่ (จ.6) เป็นสมการร่วม ในทางปฏิบัติ เราไม่นิยมคำนวณหาอนุพันธ์อันดับสองในอัลกอริทึมเนื่องจากทำให้ใช้เวลามาก จึงมีการประมาณเทอมที่สองในสมการ (จ.6) ให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการคำนวณในแต่ละรอบมากขึ้น

วิธีที่ง่ายที่สุดได้แก่วิธีเกาส์-นิวตัน วิธีนี้พัฒนาจากวิธีของนิวตัน จากวิธีของนิวตัน ทิศทางการค้นหา  $p$  คำนวณจาก

$$\nabla^2 h(x)p = -\nabla h(x) \quad (จ.8)$$

$$p = -\nabla^2 h(x)^{-1} \nabla h(x) \quad (จ.9)$$

จากการแสดงข้างต้น ณ.จุดที่เป็นคำตอบของปัญหา เทอมที่สองของสมการ (จ.6) มีค่าเท่ากับ ศูนย์กล่าวคือ วิธีเกาส์-นิวตันประมาณเฮสเซียนเมตริกซ์ด้วยเทอมแรกของสมการ (จ.6) ดังนั้น ทิศทางการค้นหาของวิธีเกาส์-นิวตัน  $p_G$  คำนวณจาก

$$-\nabla G(x) \nabla G(x)^T p_G = -\nabla G(x) G(x) \quad (จ.10)$$

วิธีเกาส์-นิวตันจะให้ผลไม่ดีเมื่อส่วนตกค้าง ณ.จุดที่เป็นคำตอบของปัญหามีค่ามาก เนื่องจากตั้งที่กล่าวมาแล้ว ทิศทางการค้นหาของวิธีนี้ไม่พิจารณาเทอมที่มีค่าบางเทอม

วิธีประมาณพจน์ที่สองของสมการ (จ.6) อีกวิธีหนึ่งมีชื่อว่าวิธี L.M. (Levenberg Marquardt Method) ได้แก่การประมาณ

$$\sum_{i=1}^m g_i(x) \nabla^2 g_i(x) \approx \lambda I \quad (จ.11)$$

เมื่อ  $\lambda$  เป็นค่าจริงค่าหนึ่งที่ยากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ดังนั้นทิศทางการค้นหา  $p_L$  ที่ได้จากการประมาณดังกล่าวคำนวณได้จาก

$$[-\nabla G(x) \nabla G(x)^T + \lambda I] p_L = -\nabla G(x) G(x) \quad (จ.12)$$

วิธี L.M. มักจะกล่าวถึงในหัวข้อของการค้นหาเส้นทาง (Line search) โดยใช้กลยุทธ์บริเวณเชื่อถือได้ (Trust-region strategy) ในกลยุทธ์ดังกล่าว การหาทิศทางการค้นหาในแต่ละรอบของอัลกอริทึมคำนวณได้จากปัญหาย่อย

$$\underset{p_L}{\text{minimize}} \quad \Psi(p_L) = h(x) + p_L^T \nabla G(x) G(x) + \frac{1}{2} p_L^T \nabla G(x) \nabla G(x)^T p_L$$

โดยมีเงื่อนไขบังคับ (Constraint)  $\|p_L\| \leq \Delta \quad (จ.13)$



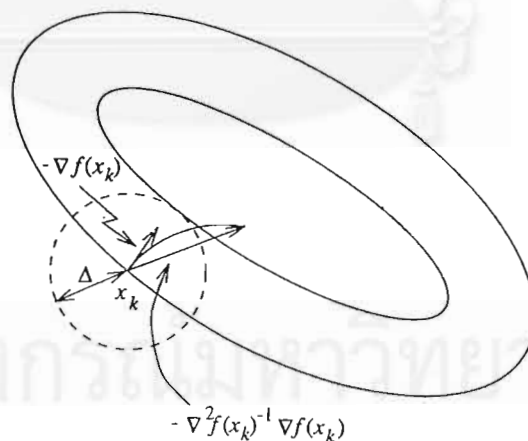
โดย  $\Delta$  เป็นจำนวนจริงบวกใดๆที่ไม่เท่ากับศูนย์ ค่าของ  $\Delta$  ขึ้นกับข้อดกลงที่วางไว้ระหว่าง  $\Psi(p_L)$  และ  $h(x)$  ที่รอบที่  $k$  ใดๆ ถ้าค่าที่ได้จากข้อดกลงดังกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสม เราสามารถเพิ่ม  $\Delta$  ที่รอบ  $k+1$  ได้ ถ้าค่าดังกล่าวไม่เหมาะสม เราสามารถลดค่า  $\Delta$  ที่รอบ  $k+1$  ได้เช่นกัน จากการหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimality condition) ของปัญหาการทำให้เหมาะสมที่สุด จะเห็นว่าคำตอบของปัญหา (จ.13) ได้แก่การหาคำตอบของสมการ (จ.12) นั่นเอง ในเรื่องของกลยุทธีบริเวณเชื่อถือได้ เราจะเรียก  $\lambda$  ว่าเป็นตัวคูณลากรองจ์ (Lagrange multiplier) และจะได้

$$\lambda(\Delta - \|p_L\|) = 0 \quad (จ.14)$$

วิธี L.M. เป็นวิธีที่มีทิศทางการค้นหาอยู่ในช่วงระหว่างวิธีการลดลงชันที่สุด (Steepest decent) และวิธีนิวตัน นั่นคือในรอบแรก ค่า  $\Delta$  จะถูกตั้งให้มีค่าน้อยๆ จากสมการ (จ.13) เมื่อ  $\Delta$  มีค่าน้อยหรือ  $\Delta \rightarrow 0$  ทำให้  $\lambda \rightarrow \infty$  ดังนั้น

$$p \approx -\frac{1}{\lambda} \nabla h(x)$$

ซึ่งคือทิศทางการค้นหาของวิธีการลดลงชันสุดนั่นเอง ในขณะที่  $\Delta$  มีค่ามากพอ ทิศทางการค้นหาคำนวณได้จากสมการ (จ.10) ( $p_L = p_G$  ในสมการ (จ.10) ) ซึ่งเป็นทิศทางการค้นหาของวิธีนิวตัน ทิศทางการค้นหาดังกล่าวแสดงดังรูป จ.2



รูปที่ จ.2 ทิศทางการค้นหาของวิธี L.M.

อัลกอริทึมของกลยุทธ์บริเวณเชื่อถือได้แสดงได้ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้น  $x_k$  ที่  $k=0$  และกำหนดขอบเขตบริเวณที่เชื่อถือได้ (Trust region bound)

2. กำหนดค่าคงที่  $0 < \mu < \eta < 1$  ซึ่งอาจตั้งค่าได้ดังนี้  $\mu = \frac{1}{4}$  และ  $\eta = \frac{3}{4}$

3. ถ้า  $x_k$  เป็นค่าที่เหมาะสม ให้หยุดและออกจากวง ไม่เช่นนั้น ทำข้อ 4 ต่อไป

4. หาคำตอบของปัญหา (จ.13) โดยใช้สมการ (จ.12)

5. คำนวณ 
$$r_k = \frac{h(x_k) - h(x_k + p_{L_k})}{h(x_k) - \psi_k(p_{L_k})}$$

ถ้า  $r_k \leq \mu \rightarrow x_{k+1} = x_k$  นอกจากนั้น  $x_{k+1} = x_k + p_{L_k}$

6. ปรับปรุง  $\Delta_k$  ดังนี้

$$r_k \leq \mu \Rightarrow \Delta_{k+1} = \frac{1}{2} \Delta_k$$

$$\mu < r_k < \eta \Rightarrow \Delta_{k+1} = \Delta_k$$

$$r_k \geq \eta \Rightarrow \Delta_{k+1} = 2\Delta_k$$

7.  $k = k + 1$  และกลับไปข้อ 3

$r_k$  ในอัลกอริทึมแสดงให้เห็นว่าค่าของฟังก์ชันลดลงจริงเท่าใดเมื่อเทียบกับฟังก์ชันที่ประมาณด้วยอนุกรมเทเลอร์ข้างต้น ในขณะที่  $r_k$  มีค่าน้อย แสดงว่าค่าที่ได้จากอนุกรมเทเลอร์เป็นค่าพยากรณ์ที่ยังไม่ถูกต้อง ทิศทางการค้นหาจึงต้องเปลี่ยนโดยการลดค่า  $\Delta_k$  ในทางกลับกัน ในรอบหลังๆ เมื่อ  $x_k$  เข้าใกล้คำตอบ  $x^*$  มากขึ้น และ  $r_k$  มีค่ามาก แสดงว่า ค่าพยากรณ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง ดังนั้น เราสามารถเพิ่มค่า  $\Delta_k$  ได้ และในที่สุดการลู่เข้าจะเป็นแบบกำลังสอง (Quadratic convergence) เช่นเดียวกับวิธีนิวตัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

### วงจรรองแบบดิจิทัล

วงจรรองแบบดิจิทัลเป็นอัลกอริทึมสำหรับประมวลผลสัญญาณเชิงเลข (Discrete signal) ใดๆ โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน และให้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติสอดคล้องกับวงจรรองแบบดิจิทัลที่ใช้ วงจรรองแบบดิจิทัลที่ใช้ในทางวิศวกรรมไฟฟ้ามีหลายชนิด มีชื่อตามลักษณะการออกแบบ การใช้งานหรือตามชื่อของผู้คิดค้นขึ้น แต่ที่จะนำมากล่าวในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แก่

- ก ) วงจรรองแบบผ่านต่ำชนิด FIR (Finite Impulse Response Lowpass Filter)
- ข ) วงจรรองชนิดทำให้รูปคลื่นเรียบ (Smoothing Filter)
- ค ) คาล์มานฟิลเตอร์

#### จ.1 วงจรรองแบบผ่านต่ำชนิด FIR

วงจรรองประเภทนี้มี 2 ประเภท ได้แก่

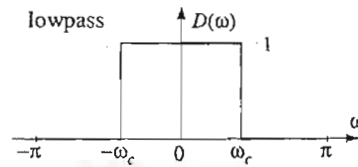
- ก ) วงจรรองชนิด FIR (Finite Impulse Response)
- ข ) วงจรรองชนิด IIR (Infinite Impulse Response)

วงจรรองแบบผ่านต่ำชนิด FIR มีข้อดีที่สำคัญคือ การมีเสถียรภาพ เนื่องจากทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรองชนิดนี้มีโพล เท่ากับศูนย์และอยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วยเสมอ ซึ่งต่างจากวงจรรองชนิด IIR ซึ่งอาจไม่เสถียรเนื่องจากอาจมีโพลอยู่นอกวงกลมหนึ่งหน่วย แต่วงจรรองชนิด FIR มีข้อเสียคือ ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าวงจรรองชนิด IIR เมื่อเราต้องการช่วงบริเวณเปลี่ยนแปลง (Transition Region) แคบๆ อย่างไรก็ตาม เวลาในการคำนวณสามารถลดลงได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ที่ความเร็วสูง

การออกแบบวงจรรองแบบผ่านต่ำชนิด FIR มีหลายวิธี ในที่นี้ใช้วิธีหน้าต่าง (Window Method) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด และเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบวงจรรองที่มีรูปร่างง่าย ๆ

##### จ.1.1 วงจรรองแบบผ่านต่ำในอุดมคติ

วงจรรองแบบผ่านต่ำในอุดมคติแสดงดังรูปที่ จ.1



รูปที่ ๑.๑ วงจรกรองแบบผ่านต่ำในอุดมคติ

จากรูปที่ ๑.๑ ขั้นตอนการออกแบบเริ่มจากการกำหนดรูปร่างของผลตอบสนองทางความถี่  $D(\omega)$  ในช่วง  $-\pi \leq \omega \leq \pi$  ซึ่งสอดคล้องกับผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse Response)  $d(k)$  ดังนี้

$$D(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d(k)e^{-j\omega k} \Leftrightarrow d(k) = \int_{-\pi}^{\pi} D(\omega)e^{j\omega k} \frac{d\omega}{2\pi} \quad (๑.๑.๑)$$

วงจรกรองแบบผ่านต่ำจากรูปที่ ๑.๑ มีข้อกำหนดดังนี้

$$D(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{if } -\omega_c \leq \omega \leq \omega_c \\ 0, & \text{if } -\pi \leq \omega < -\omega_c, \text{ or } \omega_c < \omega \leq \pi \end{cases}$$

ดังนั้น จากสมการที่ (๑.๑.๑)

$$d(k) = \int_{-\pi}^{\pi} D(\omega)e^{j\omega k} \frac{d\omega}{2\pi} = \int_{-\omega_c}^{\omega_c} 1 \cdot e^{j\omega k} \frac{d\omega}{2\pi}$$

$$= \left[ \frac{e^{j\omega k}}{2\pi jk} \right]_{-\omega_c}^{\omega_c} = \frac{e^{j\omega_c k} - e^{-j\omega_c k}}{2\pi jk}$$

ดังนั้น

$$d(k) = \frac{\sin(\omega_c k)}{\pi k}, \quad -\infty < k < \infty \quad (๑.๑.๒)$$

จากสมการที่ (๑.๑.๒) การคำนวณที่  $k = 0$  ทำได้โดยให้ตั้งค่าลิมิต (Limit)  $k \rightarrow 0$  จะได้

$$d(0) = \frac{\omega_c}{\pi} \quad (\text{จ.1.3})$$

### จ.1.2 การออกแบบโดยใช้วิธีหน้าต่าง (Window Method)

เนื่องจากในทางปฏิบัติ หน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลในการคำนวณมีขนาดจำกัด เราจึงไม่สามารถออกแบบให้ผลตอบสนองอิมพัลส์มีความยาวอนันต์ดังสมการ (จ.1.2) ได้ อย่างไรก็ตาม การออกแบบวงจรรองแบบผ่านต่ำให้ผลตอบสนองอิมพัลส์มีความยาวจำกัด  $N = 2M + 1$  โดยที่  $M$  เป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์ สามารถทำได้โดยการนำฟังก์ชันหน้าต่าง (Window Function) มาคูณผลตอบสนองอิมพัลส์ซึ่งมีความยาวอนันต์เพื่อจำกัดความยาวให้มีความยาวเท่ากับความยาวของหน้าต่างที่นำมาคูณ จากที่ทราบมาแล้วว่า ผลตอบสนองทางความถี่ของผลคูณของฟังก์ชัน 2 ฟังก์ชัน คือผลการประสาน (Convolution) ระหว่างผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันทั้งสองนั้น โดยอาศัยหลักการดังกล่าวนี้มาคำนวณผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองแบบผ่านต่ำ รูปร่างของผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้แม้จะไม่เหมือนกับทางทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ จ.1 ที่เดียนัก แต่เราสามารถทำให้รูปร่างมีลักษณะลู่เข้าหารูปร่างในทางทฤษฎีได้โดยการเพิ่มความยาว  $N$  หรือเปลี่ยนฟังก์ชันหน้าต่างเพื่อให้ผลตอบสนองทางความถี่มีการแกว่งน้อยลง

#### จ.1.2.1 การออกแบบโดยใช้หน้าต่างสี่เหลี่ยม (Rectangular Window)

ฟังก์ชันหน้าต่างสี่เหลี่ยมได้แก่

$$w(n) = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{จ.1.4})$$

เนื่องจากสมการที่ (จ.1.2) อยู่ในรูปที่ไม่เป็นเชิงเหตุ (Noncausal) เราสามารถทำให้เป็นเชิงเหตุได้โดยการเลื่อนไปทางขวา  $M$  จุด ดังนั้น เมื่อเลื่อนผลตอบสนองอิมพัลส์ไปทางขวาแล้วคูณด้วยฟังก์ชันหน้าต่าง จะได้

$$h(n) = d(n - M)w(n)$$

$$h(n) = d(n - M) = \frac{\sin(\omega_c (n - M))}{\pi(n - M)}, n = 0, \dots, M, \dots, N - 1 \quad (\text{จ.1.5})$$

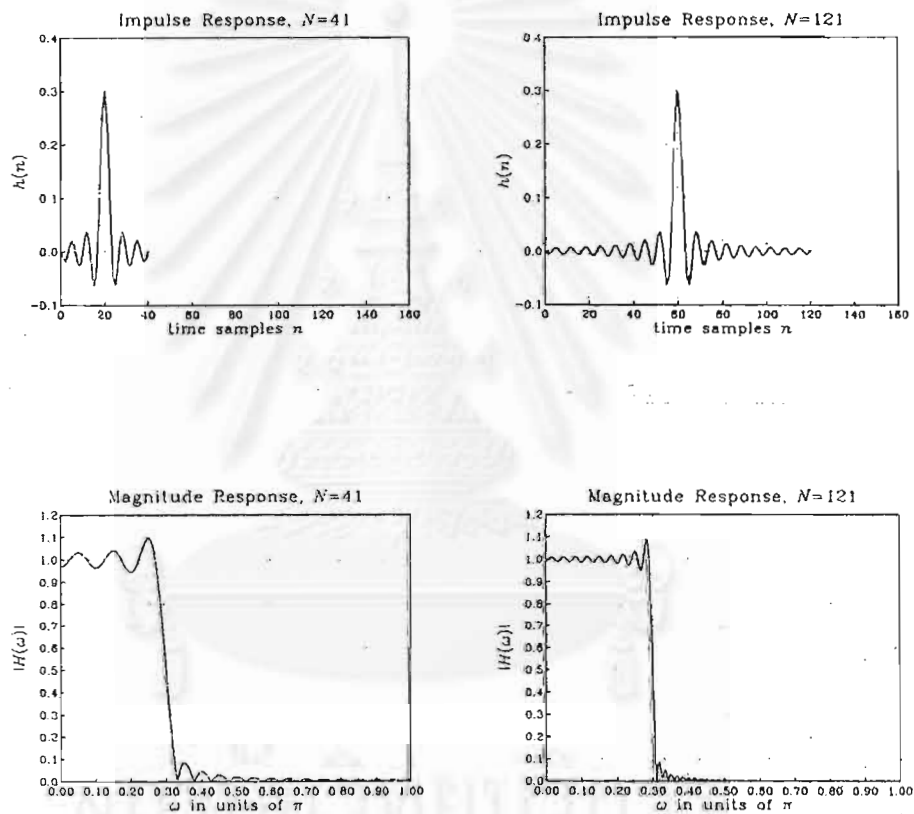
โดย  $h(M) = d(0)$  คำนวณจากสมการที่ (จ.1.3)

ผลตอบสนองอิมพัลส์ดังสมการ (จ.1.5) และขนาดของผลตอบสนองความถี่ของผลตอบสนองอิมพัลส์ดังกล่าวที่มีความยาว  $N = 41$  และ  $N = 121$  แสดงดังรูปที่ จ.2

โดยสรุป ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองแบบผ่านต่ำความยาว  $N = 2M + 1$  โดยประยุกต์จากสมการที่ (จ.1.2) มีดังนี้

ก ) เลือกความถี่คัทออฟ (Cut-off frequency)  $\omega_c$  และเลือกความยาว  $N$  โดยให้  $M = (N - 1)/2$

ข ) คำนวณสัมประสิทธิ์  $h(n)$  จำนวน  $N$  จุดจากสมการที่ (จ.1.5)



รูปที่ จ.2 ผลตอบสนองอิมพัลส์และขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแบบผ่านต่ำซึ่งออกแบบโดยวิธีหน้าต่างสี่เหลี่ยมที่มี  $N = 41$  และ  $N = 121$

### จ.1.2.2 การออกแบบโดยใช้หน้าต่างแฮมมิง (Hamming Window)

เราสามารถลดขนาดของการแกว่งบนแถบผ่าน (Passband) และแถบหยุด (Stopband) ของผลตอบสนองทางความถี่ของผลตอบสนองอิมพัลส์ใดๆ จากหัวข้อ จ.1.2.1 ได้โดยการ

เปลี่ยนรูปร่างของฟังก์ชันหน้าต่าง  $w(n)$  ฟังก์ชันหน้าต่างที่ใช้กันมีหลายฟังก์ชัน แต่ฟังก์ชันหน้าต่างที่นิยมมากที่สุดได้แก่ หน้าต่างแฮมมิง ฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิงกำหนดโดย

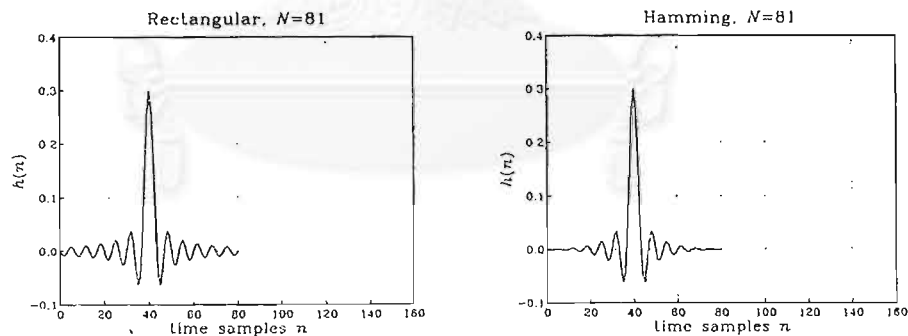
$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{จ.1.6})$$

เลื่อนสมการที่ (จ.1.2) ไปทางขวา  $M$  จุดและนำมาคูณกับหน้าต่างแฮมมิงความยาว  $N$  จะได้

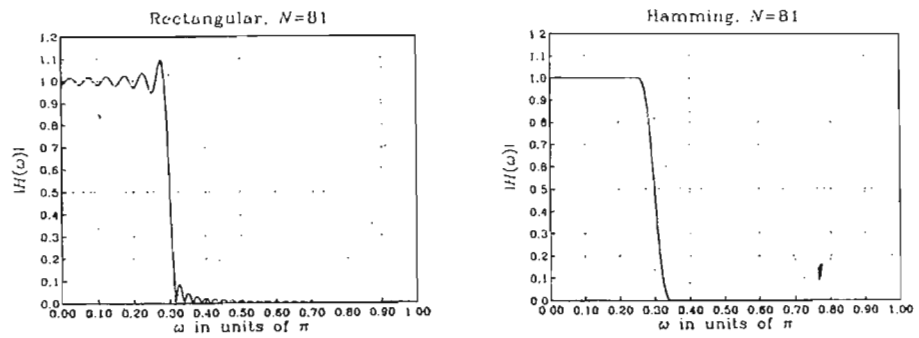
$$h(n) = d(n - M)w(n)$$

$$h(n) = \left[ 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \right] \cdot \frac{\sin(\omega_c(n - M))}{\pi(n - M)} \quad (\text{จ.1.7})$$

ขั้นตอนการออกแบบโดยสรุปเป็นเช่นเดียวกับการออกแบบในหัวข้อ จ.1.2.1 แต่เปลี่ยนฟังก์ชันหน้าต่าง รูปที่ จ.3 และ จ.4 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองอิมพัลส์และขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของการใช้หน้าต่างสี่เหลี่ยมและหน้าต่างแฮมมิงที่ความยาว  $N = 81$



รูปที่ จ.3 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของหน้าต่างสี่เหลี่ยม (ซ้าย) และหน้าต่างแฮมมิง (ขวา)

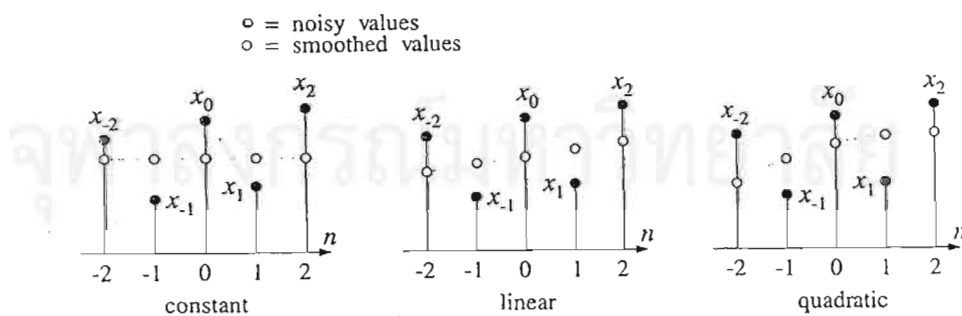


รูปที่ ๔.4 ขนาดผลตอบสนองทางความถี่ของหน้าต่างสี่เหลี่ยม (ซ้าย) และหน้าต่างแฮมมิง (ขวา)

## ๔.2 วงจรกรองชนิดทำให้รูปคลื่นเรียบ

วงจรกรองชนิดทำให้รูปคลื่นเรียบเป็นวงจรกรองแบบผ่านต่ำชนิดหนึ่ง ชนิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีชื่อว่า เอสจีฟิลเตอร์ (S.G. Smoothing Filter หรือ Savizky Golay Smoothing Filter หรือ Least-squares Smoothing Filter) หลักการของวงจรกรองชนิดนี้คือ เริ่มจากข้อมูลตัวแรก จะนำข้อมูลมาจำนวนหนึ่งซึ่งมีความยาว  $N = 2M + 1$  จุด (ความยาว  $N$  เป็นจำนวนคี่และเป็นความกว้างของหน้าต่างเคลื่อนที่ (Moving Window)) ตามที่เรากำหนดมา ทำการประดิษฐ์ด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียล (Polynomial Function) ที่มีอันดับ  $d$  ตามที่กำหนดและจะทำเช่นนี้กับข้อมูลตัวถัดไปโดยใช้หน้าต่างเคลื่อนที่ที่เลื่อนไปตามแกนเวลาจนสิ้นสุดข้อมูล

พิจารณารูปที่ ๔.5 แสดงถึงหลักการของเอสจีฟิลเตอร์ที่มีค่า  $d$  เท่ากับ 0 (Constant), 1 (Linear) และ 2 (Quadratic) ตามลำดับ



รูปที่ ๔.5 การกรองของวงจรกรองชนิดทำให้รูปคลื่นเรียบที่  $d = 0, 1$  และ 2 ตามลำดับ



การอธิบายถึงที่มาสูตรของเอสจีฟิลเตอร์เริ่มจากการพิจารณารูปที่ ๑.5 เป็นตัวอย่าง เพื่อนำไปสู่กรณีทั่วไปภายหลัง เมื่อเราส่งข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนผ่านเอสจีฟิลเตอร์จะได้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณออก ( $\hat{x}_m$ ) ที่เรียงขึ้น ณ.เวลา  $m = -2, -1, 0, 1$  และ 2 ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับอันดับที่เลือก ในที่นี้  $N = 5$  และ  $M = 2$

$$\hat{x}_m = c_0 \quad (\text{Constant}) \quad (๑.2.1)$$

$$\hat{x}_m = c_0 + c_1 m \quad (\text{Linear}) \quad (๑.2.2)$$

$$\hat{x}_m = c_0 + c_1 m + c_2 m^2 \quad (\text{Quadratic}) \quad (๑.2.3)$$

สำหรับแต่ละอันดับ  $d$  เราสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์  $c_i$  โดยใช้วิธีการประดิษฐ์ฟังก์ชันดังได้กล่าวข้างต้นโดยใช้เกณฑ์ (Criteria) กำลังสองน้อยสุด

$$J = \sum_{m=-2}^2 e_m^2 = \sum_{m=-2}^2 (x_m - (c_0 + c_1 m + c_2 m^2))^2 = \min \quad (๑.2.4)$$

โดยที่

$$e_m = x_m - \hat{x}_m = x_m - (c_0 + c_1 m + c_2 m^2)$$

เพื่อความสะดวกในการแทนระบบสมการข้างต้น จึงแทนสมการข้างต้นให้อยู่ในรูปเวกเตอร์

กำหนด 
$$x = \begin{bmatrix} x_{-2} \\ x_{-1} \\ x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad \hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{-2} \\ \hat{x}_{-1} \\ \hat{x}_0 \\ \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} e_{-2} \\ e_{-1} \\ e_0 \\ e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = x - \hat{x}$$

ในทำนองเดียวกัน กำหนดเวกเตอร์ฐานหลัก (Basis vector)  $s_0, s_1$  และ  $s_2$  ซึ่งมีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$s_0(m) = 1, \quad s_1(m) = m, \quad s_2(m) = m^2 \quad \text{โดยที่} \quad -2 \leq m \leq 2$$

จะได้

$$s_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad s_1 = \begin{bmatrix} -2 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad s_2 = \begin{bmatrix} 4 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 4 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นเราสามารถแทนสมการที่ (ฉ.2.3) ด้วยรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\hat{x} = c_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_1 \begin{bmatrix} -2 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 4 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 4 \end{bmatrix} = c_0 s_0 + c_1 s_1 + c_2 s_2$$

$$= \begin{bmatrix} s_0 & s_1 & s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \equiv S c \quad (\text{ฉ.2.5})$$

โดยที่  $S$  เป็นเมตริกซ์ฐานหลัก (Basis matrix) ที่มีมิติ  $5 \times 3$  ซึ่งมีสดมภ์(column) เป็นเวกเตอร์ฐานหลัก  $s_0, s_1$  และ  $s_2$

เราสามารถเขียนสมการที่ (ฉ.2.4) ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$J = e^T e = (x - S c)^T (x - S c) = x^T x - 2c^T S^T x + c^T S^T S c \quad (\text{ฉ.2.6})$$

โดยที่  $e = x - \hat{x} = x - S c$

จากสมการที่ ฉ.2.6 เราต้องการทราบเวกเตอร์  $c$  ที่ทำให้  $J$  มีค่าต่ำสุด

$$\frac{\partial J}{\partial c} = -2S^T e = -2S^T (x - S c) = -2(S^T x - S^T S c) = 0$$

$$S^T S c = S^T x$$

$$c = (S^T S)^{-1} S^T x = G^T x \quad (\text{จ.2.7})$$

โดยที่ 
$$G = S(S^T S)^{-1} \quad (\text{จ.2.8})$$

แทนสมการที่ (จ.2.7) ในสมการที่ (จ.2.5) จะได้

$$\hat{x} = Sc = SG^T x = S(S^T S)^{-1} S^T x = Bx \quad (\text{จ.2.9})$$

โดยที่ 
$$B = SG^T = GS^T = S(S^T S)^{-1} S^T \quad (\text{จ.2.10})$$

จะเห็นว่า ข้อมูลที่ผ่านวงจรกรองแล้วเป็นเชิงเส้นกับข้อมูลเดิมโดยผ่านการแปลงโดยเมตริกซ์ B พจน์ที่น่าสนใจอีกพจน์หนึ่งที่ปรากฏในสมการที่ (จ.2.8) และ (จ.2.10) คือ  $S^T S$  นิยาม

$$F = S^T S = \begin{bmatrix} s_0^T \\ s_1^T \\ s_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 & s_1 & s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_0^T s_0 & s_0^T s_1 & s_0^T s_2 \\ s_1^T s_0 & s_1^T s_1 & s_1^T s_2 \\ s_2^T s_0 & s_2^T s_1 & s_2^T s_2 \end{bmatrix} \quad (\text{จ.2.11})$$

สังเกตว่า S เป็นเมตริกซ์ที่มีมิติคือ (จำนวนจุดที่เลือก N) × (อันดับของโพลีโนเมียลบวกหนึ่ง) ดังนั้น F จึงขึ้นอยู่กับอันดับดังกล่าวเพียงอย่างเดียว

จากเมตริกซ์ S (กรณีของโพลีโนเมียลอันดับ 2) ข้างต้น นำมาคำนวณ F ได้ดังนี้

$$F = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 10 \\ 0 & 10 & 0 \\ 10 & 0 & 34 \end{bmatrix}, \quad F^{-1} = \frac{1}{35} \begin{bmatrix} 17 & 0 & -5 \\ 0 & 3.5 & 0 \\ -5 & 0 & 2.5 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ จ.2.8

$$G = S(S^T S)^{-1} = SF^{-1} = \frac{1}{35} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 4 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 17 & 0 & -5 \\ 0 & 3.5 & 0 \\ -5 & 0 & 2.5 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{35} \begin{bmatrix} -3 & -7 & 5 \\ 12 & -3.5 & -2.5 \\ 17 & 0 & -5 \\ 12 & 3.5 & -2.5 \\ -3 & 7 & 5 \end{bmatrix} = [g_0 \quad g_1 \quad g_2]$$

จากสมการที่ จ.2.10

$$B = GS^T = \frac{1}{35} \begin{bmatrix} -3 & -7 & 5 \\ 12 & -3.5 & -2.5 \\ 17 & 0 & -5 \\ 12 & 3.5 & -2.5 \\ -3 & 7 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ 4 & 1 & 0 & 1 & 4 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{35} \begin{bmatrix} 31 & 9 & -3 & -5 & 3 \\ 9 & 13 & 12 & 6 & -5 \\ -3 & 12 & 17 & 12 & -3 \\ -5 & 6 & 12 & 13 & 9 \\ 3 & -5 & -3 & 9 & 31 \end{bmatrix} = [b_{-2} \quad b_{-1} \quad b_0 \quad b_1 \quad b_2]$$

เนื่องจาก  $B$  มีความสมมาตรในลักษณะที่ แถวและสดมภ์มีความเหมือนกัน ดังนั้นเราสามารถแทน  $B$  ได้ด้วยตัวอย่างใดอย่างหนึ่งดังนี้

$$B = [b_{-2} \quad b_{-1} \quad b_0 \quad b_1 \quad b_2] = \begin{bmatrix} b_{-2}^T \\ b_{-1}^T \\ b_0^T \\ b_1^T \\ b_2^T \end{bmatrix} = B^T$$

จากสมการที่ (จ.2.9) สัญญาณที่ออกจากวงจรกรองนี้จึงแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{-2} \\ \hat{x}_{-1} \\ \hat{x}_0 \\ \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \hat{x} = Bx = B^T x = \begin{bmatrix} b_{-2}^T \\ b_{-1}^T \\ b_0^T \\ b_1^T \\ b_2^T \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} b_{-2}^T x \\ b_{-1}^T x \\ b_0^T x \\ b_1^T x \\ b_2^T x \end{bmatrix}$$

หรือกล่าวอีกวิธีหนึ่ง สำหรับ  $m = -2, -1, 0, 1, 2$

$$\hat{x}_m = b_m^T x$$

ในทำนองเดียวกัน เราสามารถหาสัมประสิทธิ์ได้จากสมการที่ (จ.2.7)

$$\begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = c = G^T x = \begin{bmatrix} g_0^T \\ g_1^T \\ g_2^T \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} g_0^T x \\ g_1^T x \\ g_2^T x \end{bmatrix}$$

หรือ  $c_i = g_i^T x$  เมื่อ  $i = 0, 1, 2$

พิจารณา B สอดมภ์กลาง  $b_0$  มีความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากมันทำให้สัญญาณ  $x_0$  เรียบขึ้นซึ่งจุดนี้อยู่กึ่งกลางระหว่างจุดอื่นๆดังแสดงในรูปที่ จ.5 ในการกรองกลุ่มข้อมูลที่มีความยาวมากๆ สอดมภ์กลาง  $b_0$  ถูกใช้ในช่วงสถานะคงตัว (Steady-state period) ในขณะที่สอดมภ์อื่นๆของ B ถูกใช้ในตอนเริ่มต้นของจุดข้อมูล (Input-on Transient) และในช่วงสุดท้ายของจุดข้อมูล (Input-off Transient) ดังนั้น จากตัวอย่างข้างต้นในกรณีของรูปที่ จ.5 และโพลีโนเมียลอันดับ 2 ในช่วงสถานะคงตัว เราจะได้

$$y_0 = b_0^T x = \frac{1}{35} \begin{bmatrix} -3 & 12 & 17 & 12 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{-2} \\ x_{-1} \\ x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{35}(-3x_{-2} + 12x_{-1} + 17x_0 + 12x_1 - 3x_2)$$

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นในทางปฏิบัติเมื่อมีข้อมูลเข้า (Input data) ที่เป็นลำดับ (sequence)  $x_n$  เราจะเลื่อนกลุ่มข้อมูลข้างบนทั้ง 5 จุดให้กระจายรอบจุดเวลา  $n$  ดังนี้

$$\begin{aligned} [x_{-2} \quad x_{-1} \quad x_0 \quad x_1 \quad x_2] &\rightarrow [x_{n-2} \quad x_{n-1} \quad x_n \quad x_{n+1} \quad x_{n+2}] \\ y_n &= \frac{1}{35}(-3x_{n-2} + 12x_{n-1} + 17x_n + 12x_{n+1} - 3x_{n+2}) \end{aligned} \quad (\text{จ.2.12})$$

ความหมายของสมการที่ (จ.2.12) คือการประดิษฐ์กลุ่มของข้อมูลที่มี 5 ตัวให้เป็นฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับ 2 แล้วแทนข้อมูลเข้า  $x_n$  ด้วย ข้อมูลที่เรียบ  $y_n$

ขั้นตอนของการออกแบบเอสจีฟิลเตอร์เพื่อจัดการกับข้อมูลที่สภาวะคงตัวจึงสรุปได้ดังนี้

ก) กำหนดความยาวของหน้าต่างเคลื่อนที่  $N = 2M + 1$

ข) กำหนดอันดับ  $d$  โดยมีข้อจำกัดว่า  $N \geq d + 1$

ค) กำหนดเมตริกซ์  $S$  ซึ่งมีมิติ  $N \times (d + 1)$

ง) กำหนด  $F$  มิติ  $(d + 1) \times (d + 1)$  จากสมการที่ (จ.2.11) และกำหนด  $G$  มิติ

$N \times (d + 1)$  จาก  $G = SF^{-1}$

จ) กำหนด  $B$  มิติ  $N \times N$  จากสมการที่ (จ.2.10)

ผลลัพธ์แสดงได้ดังนี้

$$y(n) = \sum_{m=-M}^M b_0(m)x(n+m) \quad (\text{จ.2.13})$$

โดยที่  $b_0(m)$  เป็นสดมภ์กลางหรือแถวกลางของเมตริกซ์  $B$

สมการที่ (จ.2.13) อาจเขียนอยู่ในรูปของผลการประสาน (Convolution form) ได้ดังนี้

$$y(n) = \sum_{m=-M}^M b_0(-m)x(n-m) \quad (\text{จ.2.14})$$

ทั้งนี้เนื่องจาก  $b_0(-m) = b_0(m)$  เพราะมันมีความสมมาตรรอบค่า  $b_0(0)$  และเรายังพบอีกว่า สำหรับค่า  $d$  สองอันดับติดกัน จะมี  $b_0(m)$  เหมือนกัน นั่นคือ  $b_0(m)$  ที่  $d = 0,1$  มีค่าเหมือนกัน  $b_0(m)$  ที่  $d = 2,3$  มีค่าเหมือนกัน เป็นต้น

ในทางปฏิบัติ ค่า  $d$  ที่ใช้กันมากได้แก่  $d = 0,1,2,3,4$  ในการเขียนโปรแกรม เราจึงวิเคราะห์เมตริกซ์  $B$  สำหรับค่า  $d$  เหล่านี้สำหรับค่า  $N$  ใดๆไว้ล่วงหน้าเพื่อประหยัดเวลา

กำหนดให้ 
$$\phi = F^{-1} = (S^T S)^{-1}$$

ดังนั้น 
$$B = S F^{-1} S^T = S \phi S^T = \sum_{i=0}^d \sum_{j=0}^d s_i s_j^T \phi_{ij} \quad (\text{จ.2.15})$$

แต่ละพจน์ของ  $B$  อาจหาได้ดังนี้

$$B_{mk} = \sum_{i=0}^d \sum_{j=0}^d s_i(m) s_j(k) \phi_{ij} = \sum_{i=0}^d \sum_{j=0}^d m^i k^j \phi_{ij} \quad (\text{จ.2.16})$$

โดยที่ 
$$-\frac{(N-1)}{2} \leq m, k \leq \frac{(N+1)}{2}$$

เมตริกซ์  $\phi$  สามารถหาได้โดยการคำนวณหาเมตริกซ์  $F$  ก่อน

จาก 
$$F_{ij} = (S^T S)_{ij} = s_i^T s_j = \sum_{m=-M}^M s_i(m) s_j(m) \quad (\text{จ.2.17})$$

เนื่องจาก  $s_i(m) = m^i$  นำแทนในสมการที่ (จ.2.17) จะได้

$$F_{ij} = \sum_{m=-M}^M m^{i+j} \equiv F_{i+j} \quad 0 \leq i, j \leq d \quad (\text{จ.2.18})$$

เนื่องจากค่า  $d$  ที่ใช้ในทางปฏิบัติมักมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 ค่า  $i+j$  ที่ต้องการจึงมีเพียง 0,2,4,6,8 ดังนั้น เพื่อนำไปเขียนโปรแกรม เราจึงคำนวณ  $F_{ij}$  จากค่า  $i+j$  เหล่านี้ไว้ล่วงหน้าเพื่อนำไปประกอบเป็นเมตริกซ์  $F$  และ  $\phi$

$$F_0 = \sum_{m=-M}^M m^0 = 2M+1 = N$$

$$F_2 = \sum_{m=-M}^M m^2 = \frac{1}{3}M(M+1)F_0$$

$$F_4 = \sum_{m=-M}^M m^4 = \frac{1}{5}(3M^2 + 3M - 1)F_2$$

$$F_6 = \sum_{m=-M}^M m^6 = \frac{1}{7}(3M^4 + 6M^3 - 3M + 1)F_2$$

$$F_8 = \sum_{m=-M}^M m^8 = \frac{1}{15}(5M^6 + 15M^5 + 5M^4 - 15M^3 - M^2 + 9M - 3)F_2$$

เมตริกซ์  $F$  และ  $\phi$  สำหรับค่า  $d = 0$  ได้แก่

$$F = [F_0] \quad \text{และ} \quad \phi = [1/F_0]$$

เมตริกซ์  $F$  และ  $\phi$  สำหรับค่า  $d = 1$  ได้แก่

$$F = \begin{bmatrix} F_0 & 0 \\ 0 & F_2 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \phi = \begin{bmatrix} 1/F_0 & 0 \\ 0 & 1/F_2 \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์  $F$  และ  $\phi$  สำหรับค่า  $d = 2$  ได้แก่

$$F = \begin{bmatrix} F_0 & 0 & F_2 \\ 0 & F_2 & 0 \\ F_2 & 0 & F_4 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \phi = \begin{bmatrix} F_4/D_4 & 0 & -F_2/D_4 \\ 0 & 1/F_2 & 0 \\ -F_2/D_4 & 0 & F_0/D_4 \end{bmatrix}$$



เมตริกซ์  $F$  และ  $\phi$  สำหรับค่า  $d = 3$  ได้แก่

$$F = \begin{bmatrix} F_0 & 0 & F_2 & 0 \\ 0 & F_2 & 0 & F_4 \\ F_2 & 0 & F_4 & 0 \\ 0 & F_4 & 0 & F_6 \end{bmatrix} \quad \text{และ}$$

$$\phi = \begin{bmatrix} F_4/D_4 & 0 & -F_2/D_4 & 0 \\ 0 & F_6/D_8 & 0 & -F_4/D_8 \\ -F_2/D_4 & 0 & F_0/D_4 & 0 \\ 0 & -F_4/D_8 & 0 & F_6/D_8 \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์  $F$  และ  $\phi$  สำหรับค่า  $d = 4$  ได้แก่

$$F = \begin{bmatrix} F_0 & 0 & F_2 & 0 & F_4 \\ 0 & F_2 & 0 & F_4 & 0 \\ F_2 & 0 & F_4 & 0 & F_6 \\ 0 & F_4 & 0 & F_6 & 0 \\ F_4 & 0 & F_6 & 0 & F_8 \end{bmatrix} \quad \text{และ}$$

$$\phi = \begin{bmatrix} D_{12}/D & 0 & -D_{10}/D & 0 & D_8/D \\ 0 & F_6/D_8 & 0 & -F_4/D_8 & 0 \\ -D_{10}/D & 0 & E_8 & 0 & -D_6/D \\ 0 & -F_4/D_8 & 0 & F_2/D_8 & 0 \\ D_8/D & 0 & -D_6/D & 0 & D_4/D \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} D_4 &= F_0F_4 - F_2^2 \\ D_8 &= F_2F_6 - F_4^2 \\ D_{12} &= F_4F_8 - F_6^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_6 &= F_0F_6 - F_2F_4 \\ D_{10} &= F_2F_8 - F_4F_6 \\ D &= F_0D_{12} - F_2D_{10} + F_4D_8 \end{aligned}$$

และ 
$$E_8 = F_0 F_8 - F_4^2$$

นำเมตริกซ์  $\Phi$  ข้างต้นแทนในสมการที่ ๑.2.16 สำหรับ  $-M \leq m, k \leq M$  จะได้  
สำหรับ  $d=0$

$$b_m(k) = B_{mk} = \frac{1}{F_0} = \frac{1}{N} \quad (๑.2.19)$$

สำหรับ  $d=1$

$$b_m(k) = B_{mk} = \frac{1}{F_0} + \frac{mk}{F_2} \quad (๑.2.20)$$

สำหรับ  $d=2$

$$b_m(k) = B_{mk} = \frac{F_4}{D_4} + \frac{1}{F_2} mk - \frac{F_2}{D_4} (m^2 + k^2) + \frac{F_0}{D_4} m^2 k^2 \quad (๑.2.21)$$

สำหรับ  $d=3$

$$b_m(k) = B_{mk} = \frac{F_4}{D_4} + \frac{F_6}{D_2} mk - \frac{F_2}{D_4} (m^2 + k^2) + \frac{F_0}{D_4} m^2 k^2 - \frac{F_4}{D_8} (km^3 + mk^3) + \frac{F_2}{D_8} m^3 k^3 \quad (๑.2.22)$$

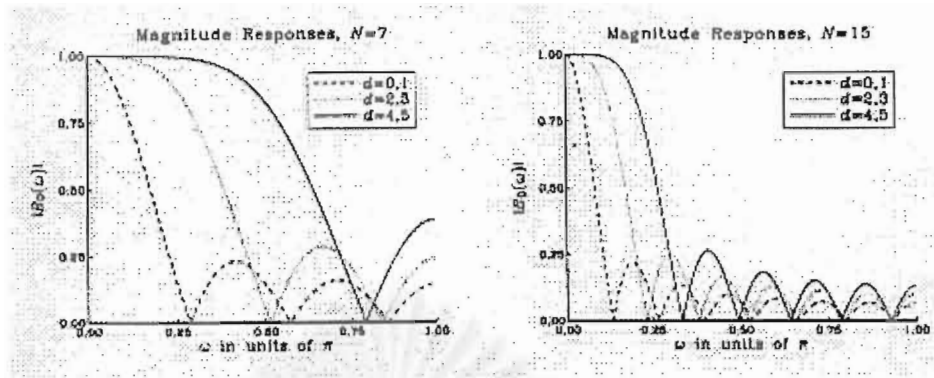
สำหรับ  $d=4$

$$b_m(k) = B_{mk} = \frac{D_{12}}{D} + \frac{F_6}{D_8} mk - \frac{D_{10}}{D} (m^2 + k^2) + \frac{E_8}{D} m^2 k^2 - \frac{F_4}{D_8} (km^3 + mk^3) + \frac{F_2}{D_8} m^3 k^3 + \frac{D_8}{D} (m^4 + k^4) - \frac{D_6}{D} (m^2 k^4 + k^2 m^4) + \frac{D_4}{D} m^4 k^4 \quad (๑.2.23)$$

คำนวณผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) ของเอสจีฟิลเตอร์ ที่สภาวะคงตัว ( $m=0$ ) ได้จาก

$$B_0(\omega) = \sum_{k=-M}^M b_0(k) e^{-j\omega k}$$

ขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ (Magnitude Response)  $|B_0(\omega)|$  แสดงดังรูปที่ ๑.6



รูปที่ ๖.6 การเปรียบเทียบขนาดของผลตอบสนองทางความถี่ของ  
เฮลิจีฟิลเตอร์ที่สภาวะคงตัวที่อันดับต่างๆที่  $N = 7$  และ  $N = 15$

เราจะพบว่า เมื่อเราเพิ่ม  $N$  โดยให้  $d$  คงที่ หรือลด  $d$  โดยให้  $N$  คงที่ จะทำให้ความถี่ตัด (Cutoff Frequency) มีค่าน้อยลง จากรูป ในกรณีที่ให้  $N$  คงที่ ที่  $d = 2$  และ  $d = 4$  จะให้ความถี่ตัดประมาณ 2 เท่า และ 3 เท่าตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณี  $d = 0$

ปัญหาที่พบอีกอย่างหนึ่งในทางปฏิบัติ ได้แก่ การเลื่อน (Shift) ของสัญญาณ จากที่เราทราบแล้วว่า ผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณลัพท์จากวงจรกรองใดๆ เป็นผลคูณระหว่างผลตอบสนองทางความถี่ของผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse Response) และผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณเข้า (Input Signal) พิจารณาตัวอย่างของเฮลิจีฟิลเตอร์ข้างต้นกรณี  $d = 2$  และ  $N = 5$

จากสมการที่ (๖.2.12)

$$y_n = \frac{1}{35}(-3x_{n-2} + 12x_{n-1} + 17x_n + 12x_{n+1} - 3x_{n+2})$$

เนื่องจากผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบนี้ไม่เป็นเชิงเหตุ ผลการแปลง  $Z$  (Z Transform) ของผลตอบสนองอิมพัลส์แสดงได้ดังนี้

$$B_0(z) = \sum_{m=-2}^2 b_0(m)z^{-m}$$

$$B_0(z) = \frac{1}{35}(-3z^2 + 12z + 17 + 12z^{-1} - 3z^{-2})$$

เราสามารถทำให้ผลตอบสนองอิมพัลส์นี้เป็นเชิงเหตุ (Causal) โดยการเลื่อนผลตอบสนองนี้ไปทางขวา 2 จุด

$$H_0(z) = z^{-2}B_0(z) = \frac{1}{35}(-3 + 12z^{-1} + 17z^{-2} + 12z^{-3} - 3z^{-4})$$

ให้  $Y(z)$  เป็นผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณออก

$$Y(z) = B_0(z)X(z)$$

คูณทั้งสองข้างของสมการด้วย  $z^{-M}$  จะได้

$$z^{-M}Y(z) = z^{-M}B_0(z)X(z) = H_0(z)X(z)$$

ความหมายคือ ถ้านำสัญญาณเข้ามาผ่านวงจรกรองที่เป็นเชิงเหตุ (Causal Filter)  $H_0(z)$  สัญญาณผลลัพธ์  $Y(z)$  จะเลื่อนไป  $M$  จุด กล่าวอีกนัยหนึ่ง

$$Y(z) = B_0(z)X(z) = z^{-M}B_0(z)z^M X(z) = H_0(z)z^M X(z)$$

นั่นคือ เมื่อเรานำสัญญาณเข้าที่เลื่อนถอยไปทางซ้ายของแกนเวลาไป  $M$  จุด ผ่านวงจรกรองที่เป็นเชิงเหตุ สัญญาณผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสัญญาณที่ไม่มีการเลื่อน เช่นเดียวกับการผ่านสัญญาณเข้าให้แก่วงจรกรองที่ไม่เป็นเชิงเหตุ ในปัญหาของกระบวนการทำสัญญาณให้เรียบ เรานิยมใช้วิธีหลังที่กล่าวมาเนื่องจากสัญญาณผลลัพธ์ที่ได้ไม่มีการเลื่อน เนื่องจากความยาวของหน้าต่างเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ  $N$  เราจึงต้องการบัฟเฟอร์มิติ  $N$  สำหรับเก็บค่าสถานะภายใน (Internal State) ของวงจรกรอง โดยปกติแล้ว สถานะภายในจะถูกกำหนดให้เป็นสัญญาณเข้าที่มีการเลื่อน  $x(n-i)$  แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสัญญาณจะต้องถูกเลื่อนไปทางซ้าย  $M$  จุดดังกล่าวยังต้น ดังนั้นเราจึงกำหนดให้  $w_i(n) = x(n+M-i)$  โดยที่  $i = 0, 1, \dots, N-1$  นั่นคือ

$$w(n) = [x(n+M), \dots, x(n), \dots, x(n-M)]^T \quad (\text{จ.2.24})$$

ยกตัวอย่างในกรณีของ  $N = 5$  และ  $M = (N-1)/2 = 2$

$$w(n) = \begin{bmatrix} w_0(n) \\ w_1(n) \\ w_2(n) \\ w_3(n) \\ w_4(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{n+2} \\ x_{n+1} \\ x_n \\ x_{n-1} \\ x_{n-2} \end{bmatrix}$$

ในกรณีที่  $n = 0$  เวกเตอร์  $w$  จะมีสมาชิกที่มีลำดับกลับกับกับเวกเตอร์  $x$  นั่นคือ

$$w = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \\ x_0 \\ x_{-1} \\ x_{-2} \end{bmatrix} = x^R \Rightarrow w^R = x = \begin{bmatrix} x_{-2} \\ x_{-1} \\ x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

ในทางปฏิบัติ เรามีกลุ่มของสัญญาณเข้าที่มีสัญญาณรบกวน  $x_n, n = 0, 1, \dots, L-1$  โดยที่  $L$  คือจำนวนจุดของสัญญาณเข้า ซึ่งเราจะแทนมันด้วยสัญญาณลัพธ์  $y_n, n = 0, 1, \dots, L-1$  เนื่องจากในการคำนวณ  $y_n$  เราต้องการข้อมูลจากจุด  $n = n - M$

ถึงจุด  $n = n + M$  จากการคำนวณที่สถานะคงตัวข้างต้นไม่ได้ครอบคลุมถึงสถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้ายของข้อมูลซึ่งมีค่า  $0 \leq n \leq M-1$  และ  $L-M \leq n \leq L-1$  ตามลำดับ

ดังนั้น สำหรับช่วงเริ่มต้น เราจะตั้งค่าเวกเตอร์ในสมการที่ (จ.2.24) โดยให้  $n = M$  และสำหรับช่วงสุดท้ายของข้อมูลเราจะให้  $n = L-1-M$  นั่นคือ

$$w(M) = \begin{bmatrix} x_{N-1} \\ x_{N-2} \\ \vdots \\ x_0 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad w(L-1-M) = \begin{bmatrix} x_{L-1} \\ x_{L-2} \\ \vdots \\ x_{L-N} \end{bmatrix} \quad \text{ตามลำดับ}$$

กล่าวอีกนัยหนึ่ง สถานะเริ่มต้นของเวกเตอร์ดังกล่าวประกอบด้วยข้อมูลเข้า  $N$  ตัวแรก ในขณะที่ สถานะสุดท้ายของเวกเตอร์นั้นประกอบด้วยข้อมูลเข้า  $N$  ตัวสุดท้าย

ที่สภาวะเริ่มต้น หลังจากเวกเตอร์  $w(M)$  ถูกส่งให้กับวงจรกรอง สัญญาณลัพธ์ที่สภาวะนี้คำนวณจาก

$$y_n = b_{n-M}^T w^R(M) \quad (\text{จ.2.25})$$

เนื่องจากผลคูณเชิงสเกลาร์ (Dot product) ของ 2 เวกเตอร์ที่มีการกลับลำดับมีค่าเท่าเดิม

$$\text{จากสมการที่ จ.2.25} \quad y_n = b_{n-M}^{RT} w(M) \quad (\text{จ.2.26})$$

โดยที่  $RT$  หมายถึงทรานสโพสของเวกเตอร์ที่มีการกลับลำดับ (Reverse) แล้วคุณสมบัติของเมตริกซ์  $B$  อย่างหนึ่งคือคู่สมมาตรที่มีค่า  $|m|$  เท่ากันจะมีลำดับของสมาชิกกลับกัน โดยที่  $-(N-1)/2 \leq m \leq (N-1)/2$   
ดังนั้น จากสมการที่ จ.2.26

$$y_n = b_{M-n}^T w(M), \quad n = 0, 1, \dots, M \quad (\text{จ.2.27})$$

ในทำนองเดียวกัน ที่สภาวะสุดท้าย เมื่อข้อมูลเข้า  $N$  ตัวสุดท้ายถูกส่งไปยังวงจรกรอง จะได้

$$y_{L-1-M+n} = b_{-n}^T w(L-1-M), \quad n = 0, 1, \dots, M \quad (\text{จ.2.28})$$

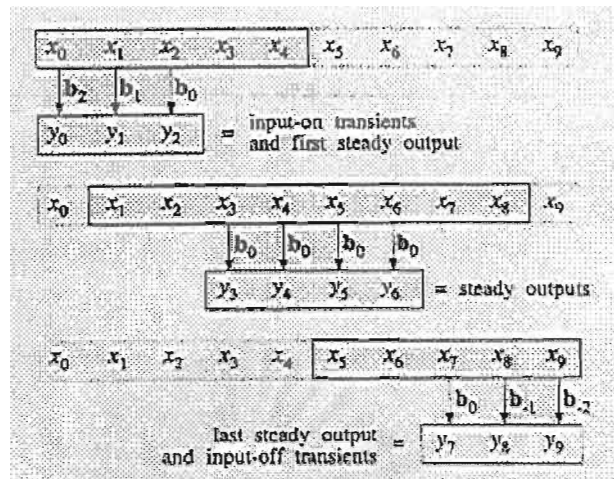
ในระหว่าง 2 สภาวะข้างต้นเป็นสภาวะคงตัวซึ่งเราสามารถคำนวณสัญญาณลัพธ์ได้จาก

$$y_n = b_0^T w(n), \quad M+1 \leq n \leq L-2-M \quad (\text{จ.2.29})$$

โดยที่

$$b_0^T = b_0^{RT}$$

ทั้งนี้ถ้าเราต้องการให้มีข้อมูลเข้าอย่างน้อย 1 จุดที่สภาวะคงตัว ความยาว  $L$  ของข้อมูลเข้าต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $N+1$  รูปที่ จ.7 แสดงกระบวนการคำนวณของเอสจีฟิลเตอร์สำหรับ  $L = 10$  และ  $N = 5$



รูป จ.7 กระบวนการคำนวณของเอสจีฟิลเตอร์สำหรับค่า  $L=10$  และ  $N=5$

### จ.3 คาร์มานฟิลเตอร์

คาร์มานฟิลเตอร์เป็นคอมพิวเตอร์อัลกอริทึมที่อาศัยหลักการของ สมการสแตต (State equation) มาทำเป็นวงของการเวียนเกิด (Recursive Loop) การอธิบายถึงหลักการจะเริ่มต้นด้วยการสมมุติว่าปัญหาที่ใช้มีความเป็นเชิงเส้น และจะประยุกต์ไปใช้กับปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น ภายหลัง

แนวความคิดของคาร์มานฟิลเตอร์มีอยู่ว่า ในระบบใดๆที่เราไม่ทราบถึงการทำงานภายในระบบนั้น หรือไม่สามารถวัดค่าของตัวแปรหลักหรือสแตต (State) ภายในระบบที่ทำให้ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ เราสามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงภายนอกของระบบนั้น และนำค่าที่วัดได้ไปปรับปรุงสแตตที่เวลานั้นเพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมของระบบที่เวลาถัดไป

ให้ปัญหาเป็นกระบวนการสุ่ม (Random Process) ที่สามารถแทนได้ด้วยแบบจำลอง (Model) ดังนี้

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + w_k \quad (\text{จ.3.1})$$

การวัด (Measurement) หรือการสังเกต (Observation) กระบวนการสุ่มข้างต้นสามารถแทนได้ด้วยสมการเชิงเส้นดังนี้

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (\text{จ.3.2})$$

โดยที่  $x_k$  = เวกเตอร์สแตต (State vector) มิติ  $n \times 1$  ที่เวลา  $t_k$

$\Phi_k$  = เมตริกซ์ มิติ  $n \times n$

$w_k$  = เวกเตอร์ของลำดับขาว (White sequence) มีมิติ  $n \times 1$  และเรารู้โครงสร้างของความแปรปรวนร่วม (Covariance) ของมัน

$z_k$  = เวกเตอร์ซึ่งได้จากการวัด มิติ  $m \times 1$  ที่เวลา  $t_k$

$H_k$  = เมตริกซ์ซึ่งให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $x_k$  และ  $z_k$  แบบไม่มีสัญญาณรบกวน ที่เวลา  $t_k$

$v_k$  = เวกเตอร์ มิติ  $m \times 1$  แสดงความผิดพลาดเนื่องจากการวัด โดยสมมติให้เป็นลำดับมีค่าของผลตอบสนองความถี่ที่ทุกความถี่ที่สามารถทราบโครงสร้างของความแปรปรวนร่วมและไม่มีสหสัมพันธ์ (Uncorrelated) กับลำดับ  $w_k$

เมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของเวกเตอร์  $w_k$  และ  $v_k$  ได้แก่

$$E[w_k w_i^T] = \begin{cases} Q_k, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases} \quad (\text{จ.3.3})$$

$$E[v_k v_i^T] = \begin{cases} R_k, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases} \quad (\text{จ.3.4})$$

$$E[w_k v_i^T] = 0 \quad \text{สำหรับทุก } i \text{ และ } k \quad (\text{จ.3.5})$$

หลักการการทำงานของคาร์มานฟิลเตอร์อย่างคร่าวๆ ในวง (loop) แรกเริ่มจากการให้ค่าเริ่มต้นคู่หนึ่งแก่คาร์มานฟิลเตอร์ในการเริ่มต้นคำนวณ ได้แก่เวกเตอร์สเตรตและความแปรปรวนร่วมของมันที่เวลาปัจจุบัน  $t_k$  ซึ่งขึ้นอยู่กับความรู้ก่อนเวลาที่จะมีการวัดข้อมูลที่เวลา  $t_k$  จากนั้นวัดข้อมูลที่เวลา  $t_k$  เพื่อที่จะนำไปประเมินและปรับปรุงเวกเตอร์สเตรตและความแปรปรวนร่วมในข้างต้น ในที่สุด นำเวกเตอร์สเตรตและความแปรปรวนร่วมของมันที่ปรับปรุงแล้วไปประเมินค่าที่เวลา  $t_{k+1}$  โดยยังไม่มี การวัดที่เวลา  $t_{k+1}$  นั้น และนำเข้าวงต่อไปของคาร์มานฟิลเตอร์

การอธิบายการทำงานอย่างละเอียดในขั้นแรก เราจะสมมติว่าเรามีค่าประเมินเริ่มต้น (Initial Estimate) ของเวกเตอร์สเตรตของกระบวนการข้างต้นที่เวลา  $t_k$  ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับความรู้ทั้งหมดของเราเกี่ยวกับกระบวนการสุ่มที่เวลาก่อน  $t_k$  ค่าประเมินของเวกเตอร์ สเตรตที่ก่อนเวลา  $t_k$  นี้ จะกำหนดให้เป็น  $\hat{x}_k^-$  โดยที่เครื่องหมาย "หมวก" แทน "ค่าที่ได้จากการประเมิน" และเครื่องหมาย "ลบ" ข้างบนแสดงว่า ค่าดังกล่าวเป็นค่าประเมินที่ดีที่สุดก่อนที่จะมีการวัดที่เวลา  $t_k$  เรายังสมมุติอีกว่า เราทราบเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาด (Error covariance matrix)  $P_k^-$  ที่ค่าประเมินเริ่มต้นดังกล่าว

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}] = E[(x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T] \quad (\text{จ.3.6})$$

โดยที่

$$e_k^- = x_k - \hat{x}_k^-$$



จากสมมุติฐานที่ว่า เรามีค่าประเมินเริ่มต้น ขณะนี้ เราจะใช้ค่าที่ได้จากการวัด  $z_k$  มาปรับปรุงค่าประเมินเริ่มต้น จะได้

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H_k \hat{x}_k^-) \quad (จ.3.7)$$

โดยที่  $\hat{x}_k$  = ค่าประเมินที่ถูกปรับปรุงแล้ว (Updated estimate)

$K_k$  = คาร์มานเกน

การคำนวณหาค่าคาร์มานเกน  $K_k$  แสดงได้ดังต่อไปนี้

ขั้นแรกกำหนดสมการของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาดสำหรับค่าประเมินที่ถูกปรับปรุงแล้ว  $\hat{x}_k$

$$P_k = E[e_k e_k^T] = E[(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T] \quad (จ.3.8)$$

แทนสมการที่ (จ.3.2) ลงในสมการ (จ.3.7) แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้แทนในสมการ (จ.3.8) จะได้

$$P_k = E\{[(x_k - \hat{x}_k^-) - K_k(H_k x_k + v_k - H_k \hat{x}_k^-)] \\ [(x_k - \hat{x}_k^-) - K_k(H_k x_k + v_k - H_k \hat{x}_k^-)]^T\} \quad (จ.3.9)$$

ให้สัมพันธ์ระหว่าง  $(x_k - \hat{x}_k^-)$  และความผิดพลาดเนื่องจากการวัด  $v_k$  มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (จ.3.10)$$

โดยที่  $P_k^- = E[(x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T]$

สมการ (จ.3.10) เป็นสมการทั่วไปที่ใช้ในการปรับปรุงเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาด

คาร์มานเกนสามารถหาได้โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาของการทำให้เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยการหาค่าตัวแปรต้น  $K_k$  ที่ทำให้ค่าในแนวทแยงหลัก (Major diagonal) ของเมตริกซ์  $P_k$  มีค่าน้อยที่สุด เพื่อความง่าย เราจะละตัวห้อย (Subscript) ไว้ชั่วคราว จากสมการ (จ.3.10)

$$P = (I - KH)P^- (I - KH)^T + KRK^T \quad (จ.3.11)$$

$$P = P^- - KHP^- - P^- H^T K^T + K(HP^- H^T + R)K^T \quad (จ.3.12)$$

สมมุติให้  $(HP^- H^T + R)$  เป็นเมตริกซ์สมมาตร (Symmetric matrix) ที่มีการนิยามแบบบวก (Positive definite) ดังนั้นเราสามารถแยกพจน์ดังกล่าวเป็นพจน์ย่อย 2 พจน์ย่อย  $SS^T$  นั่นคือ

$$SS^T \equiv HP^-H^T + R \quad (จ.3.13)$$

แทน (จ.3.13) ใน (จ.3.12)

$$P = P^- - KHP^- - P^-H^TK^T + KSS^TK^T \quad (จ.3.14)$$

ใช้วิธีกำลังสองสมบูรณ์ประยุกต์กับสมการ (จ.3.14)

$$P = P^- + (KS - A)(KS - A)^T - AA^T \quad (จ.3.15)$$

โดยที่ A เป็นพจน์ที่ไม่มี K เกี่ยวข้อง เปรียบเทียบสมการ (จ.3.14) และ (จ.3.15) พจน์ต่อพจน์

$$KSA^T + AS^TK^T = KHP^- + P^-H^TK^T \quad (จ.3.16)$$

$$A = P^-H^T(S^T)^{-1} \quad (จ.3.17)$$

เนื่องจากพจน์แรกและพจน์ที่สามในสมการ (จ.3.15) ไม่มีตัวแปรต้น K จากการศึกษาที่ต้องการจะหาค่า K ที่ทำให้เมตริกซ์ P มีค่าในแนวทแยงหลักน้อยที่สุด เราจึงพิจารณาเพียงพจน์กึ่งกลางของสมการดังกล่าว เนื่องจากพจน์กึ่งกลางเป็นพจน์ที่มีความสัมพันธ์แบบกำลังสองซึ่งมีค่าต่ำสุดที่ค่าศูนย์ ดังนั้นค่า K ที่ต้องการคือ

$$KS = A \\ K = AS^{-1} = P^-H^T(S^T)^{-1}S^{-1} = P^-H^T(SS^T)^{-1} \quad (จ.3.18)$$

จาก (จ.3.13)

$$K_k = P_k^-H_k^T(H_kP_k^-H_k^T + R_k)^{-1} \quad (จ.3.19)$$

ดังนั้น คาร์มานแกนคำนวณได้จากสมการที่ (จ.3.19) และเราสามารถคำนวณเวคเตอร์สเตตที่ปรับปรุงแล้วจากสมการ (จ.3.7) ขั้นตอนต่อไปเราจะคำนวณเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของเวคเตอร์ สเตตดังกล่าว

จากสมการที่ (จ.3.11) และ (จ.3.12)

$$P_k = (I - K_kH_k)P_k^- (I - K_kH_k)^T + K_kR_kK_k^T \quad (จ.3.20)$$

$$= P_k^- - K_kH_kP_k^- - P_k^-H_k^TK_k^T + K_k(H_kP_k^-H_k^T + R_k)K_k^T \quad (จ.3.21)$$

แทนสมการ (จ.3.19) ในสมการ (จ.3.21)

$$P_k = P_k^- - P_k H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} H_k P_k^- \quad (\text{จ.3.22})$$

หรือ

$$P_k = P_k^- - K_k (H_k P_k^- H_k^T + R_k) K_k^T \quad (\text{จ.3.23})$$

หรือ

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (\text{จ.3.24})$$

จากสมการ (จ.3.22) ถึง (จ.3.24) เรานิยมใช้สมการ (จ.3.24) เนื่องจากง่ายต่อการคำนวณที่สุด  
 ขั้นต่อไปเราจะประเมินค่าของเวกเตอร์สเตรตและเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมที่เวลา  
 $t_{k+1}$  ในขณะที่ยังไม่มีการวัดที่เวลา  $t_{k+1}$  นั้น โดยการใช้สมการที่ (จ.3.1) เนื่องจาก  $w_k$  มีค่า  
 เฉลี่ย (mean) เป็นศูนย์และไม่มีสหสัมพันธ์กับลำดับ  $w_k$  ก่อนหน้า ดังนั้น

$$\hat{x}_{k+1}^- = \phi_k \hat{x}_k \quad (\text{จ.3.25})$$

เมตริกซ์ความแปรปรวนของความผิดพลาดของ  $\hat{x}_{k+1}^-$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} e_{k+1}^- &= x_{k+1} - \hat{x}_{k+1}^- \\ &= (\phi_k x_k + w_k) - \phi_k \hat{x}_k \\ &= \phi_k e_k + w_k \end{aligned} \quad (\text{จ.3.26})$$

เนื่องจาก  $e_k$  และ  $w_k$  ไม่มีสหสัมพันธ์ร่วมกัน ดังนั้นเราสามารถคำนวณ  $P_{k+1}^-$  ได้จาก

$$\begin{aligned} P_{k+1}^- &= E[e_{k+1}^- e_{k+1}^{-T}] = E[(\phi_k e_k + w_k)(\phi_k e_k + w_k)^T] \\ &= \phi_k P_k \phi_k^T + Q_k \end{aligned} \quad (\text{จ.3.27})$$

ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำค่าจากสมการที่ (จ.3.25) และ (จ.3.27) ไปเข้าวงต่อไปที่มีการเริ่มต้น  
 เช่นเดียวกับการอธิบายในขั้นแรก วงการทำงานของคาร์มานฟิลเตอร์โดยสรุปพิจารณาได้จาก  
 รูปที่ จ.8

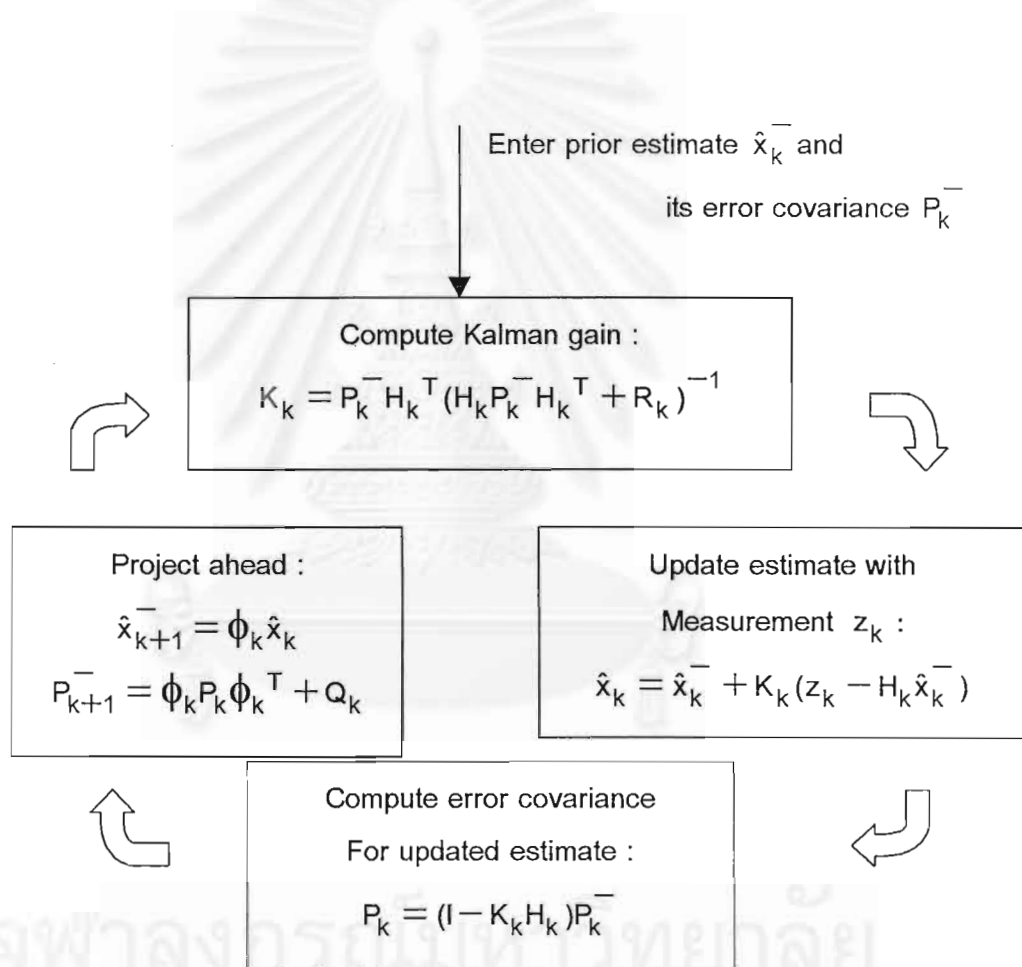
ในบางกรณีที่สมการสเตรตและสมการของการวัดของระบบที่พิจารณาไม่เป็นเชิงเส้น เรา  
 จำเป็นต้องแปลงความสัมพันธ์ของเวกเตอร์สเตรตให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้อนุกรมเทเลอร์ (Taylor

series) จากนั้นจึงสามารถคำนวณต่อไปโดยใช้กระบวนการที่ได้อธิบายข้างต้น พิจารณาระบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous-time system) ดังสมการ (ฉ.3.28) และ (ฉ.3.29)

$$\dot{x} = f(x,u,t) + w(t) \quad (\text{ฉ.3.28})$$

$$z = h(x,t) + v(t) \quad (\text{ฉ.3.29})$$

โดยที่  $f, h$  เป็นฟังก์ชันที่สามารถกำหนดได้  $u$  เป็นฟังก์ชันบังคับ (Forcing function) ที่สามารถกำหนดได้  $w$  และ  $v$  เป็นสัญญาณรบกวนขาว (White noise) ที่มีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ ฉ.8 อัลกอริทึมของคาร์ลมันฟิลเตอร์

สมมุติขณะนี้เรามีแนววิถี (Trajectory)  $x^*(t)$  ที่คำนวณมาจากวิธีใดๆ แนววิถีจริง  $x(t)$  (Actual trajectory) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$x(t) = x^*(t) + \Delta x(t) \quad (\text{ฉ.3.30})$$

แทนสมการที่ (ฉ.3.30) ใน (ฉ.3.28) และ (ฉ.3.29)

$$\dot{x}^* + \Delta\dot{x} = f(x^* + \Delta x, u, t) + w(t) \quad (\text{ฉ.3.31})$$

$$z = h(x^* + \Delta x, t) + v(t) \quad (\text{ฉ.3.32})$$

ประมาณฟังก์ชัน  $f$  และ  $h$  ด้วยอนุกรมเทเลอร์

$$\dot{x}^* + \Delta\dot{x} \approx f(x^*, u, t) + \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \right]_{x=x^*} \cdot \Delta x + w(t) \quad (\text{ฉ.3.33})$$

$$z \approx h(x^*, t) + \left[ \frac{\partial h}{\partial x} \right]_{x=x^*} \cdot \Delta x + v(t) \quad (\text{ฉ.3.34})$$

โดยที่

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}; \quad \frac{\partial h}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1}{\partial x_2} & \dots \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (\text{ฉ.3.35})$$

จากสมการ (ฉ.3.28) เมื่อระบบไม่มีสัญญาณรบกวน

$$\dot{x}^* = f(x^*, u, t) \quad (\text{ฉ.3.36})$$

แทนสมการ (ฉ.3.36) ใน (ฉ.3.33)

$$\Delta\dot{x} = \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \right]_{x=x^*} \cdot \Delta x + w(t) \quad (\text{ฉ.3.37})$$

$$z = h(x^*, t) + \left[ \frac{\partial h}{\partial x} \right]_{x=x^*} \cdot \Delta x + v(t) \quad (\text{ฉ.3.38})$$

จากสมการ (จ.3.37) และ (จ.3.38) หาก  $x^*$  เป็นแนววิถีที่ระบุไว้ (Nominal trajectory) โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามการปรับค่าของการวัด เราเรียกคัลมานฟิลเตอร์ชนิดนี้ว่าคัลมานฟิลเตอร์ชนิดทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearized Kalman filter) ในขณะที่เดียวกัน หาก  $x^*$  มีการปรับค่าทุกวงรอบของการทำงานขึ้นอยู่กับค่าที่ได้จากการวัด เราเรียกคัลมานฟิลเตอร์ชนิดนี้ว่าคัลมานฟิลเตอร์ชนิดขยาย (Extended Kalman filter) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้คัลมานฟิลเตอร์ชนิดหลัง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียน

นายศรณรงค์ สุวรรณนารักษ์ เกิดวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2516 ที่เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2539 และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2540 โดยระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาามหาบัณฑิต ได้รับทุนการศึกษาจาก ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย