



รายงานผลการวิจัย  
ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช

4  
เรื่อง

ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบดิจิทัล  
สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทศ  
วท 15  
008479

โดย

วีระพันธ์ รังสีจิตรประภา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช



รายงานผลการวิจัย

ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบดิจิตอล  
สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

สถาบันวิทยบริการ

โดย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วีระพันธ์ รังสีจิตรประภา

มิถุนายน 2538

I11964143

๓๓ ส.ค. 2542

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สังข์สะอาด ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจอ่านแก้ไขพิจารณารายงานการวิจัยจนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ คุณ สัมพันธ์ วงศ์ปาน กรรมการผู้จัดการบริษัท ธิรไทย ในการเอื้อเฟื้อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้ในการทดสอบวิเคราะห์ผลความถูกต้องของระบบวิเคราะห์ผลที่ออกแบบขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทางการเงินจาก เงินทุนวิจัยรัชดาภิเษกสม โภช ฝ่ายวิจัยฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ และขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ ที่ได้ให้กำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการวิจัย                   ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบดิจิทัล สำหรับ  
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง  
ชื่อผู้วิจัย                            นาย วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา  
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ        มิถุนายน 2538

ระบบวิเคราะห์แรงดันอิมพัลส์ BIL แบบดิจิทัล สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังถูกพัฒนา  
ขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ เวลาหน้าคลื่น  
เวลาหางคลื่น เวลาคลื่นตัด ขนาดของแรงดันและร้อยละของการฟุ้งเกิน ค่าแรงดันทดสอบจาก  
เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วัดด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ และกระแสที่ไหลผ่านขดลวดวัดได้จากชั้นด  
ความต้านทาน สัญญาณแอนะล็อกที่ได้เหล่านี้จะผ่านวงจรลดขนาดและเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัล  
โดยใช้ดิจิทัลออสซิลโลสโคปความถี่สูง แล้วนำข้อมูลเชิงเลขที่ได้มาทำการประมวลผลโดยโปร-  
แกรมที่พัฒนาขึ้น ผลของการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของแรงดันอิมพัลส์ที่ตรวจวัดได้ จะ  
แสดงผลบนจอภาพของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ และเก็บข้อมูลในแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อใช้ในการ  
อ้างอิงในภายหลัง การทดสอบระบบที่ได้พัฒนาขึ้นทำโดยการทดสอบ BIL บนหม้อแปลง  
ไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐานต่าง ๆ เช่น มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) และมาตรฐาน  
สากลอื่น ๆ ได้ผลการวิเคราะห์สำหรับการทดสอบมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่น่าพอใจ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title                                   DIGITAL IMPULSE TEST ANALYSING SYSTEM  
FOR POWER TRANSFORMERS  
Name of the Investigators                 MR. WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA  
Year    JUNE 1995

A digital impulse analysing system for the BIL test on power transformers is developed to check the generating impulse voltage waveform, i.e., the front time, tail time, chopped time, magnitude of voltage, and percent overshoot. The applied test voltage, obtained from the impulse generator, is measured by impulse voltage divider and the current flowing through the winding under test is measured by means of a resistive shunt. These analog signals are attenuated and changed to digital signals by a high frequency digital oscilloscope. These digital data are then processed by a developed program. The results from the analysis of the characteristics of the measured voltage are displayed on the monitor of a microcomputer and the data is saved in diskettes which can be later used. The developed system was tested by performing BIL test on power transformers according to the TIS standard and other international standards. The analyzed results of the tests give a satisfactory accuracy.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ .....	ii
บทคัดย่อภาษาไทย .....	iii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	iv
สารบัญ .....	v
รายการตารางประกอบ .....	viii
รายการภาพประกอบ .....	ix
 บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 บทนำทั่วไป .....	1
1.2 ที่มาของปัญหา .....	1
1.3 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของงานวิจัย .....	2
1.4 ผลงานการศึกษาที่เกี่ยวข้อง .....	3
 2. การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง .....	4
2.1 แรงดันกระจายเริ่มต้นเมื่อมีเสิร์จแรงดันรูปขึ้นกระทบต่อขดลวดหม้อแปลง ..	4
2.2 แรงดันทดสอบ BIL .....	7
2.3 อุปกรณ์การทดสอบ .....	10
2.3.1 วงจรทดสอบ .....	10
2.3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ .....	11
2.3.3 ระบบวัดแรงดัน .....	13
2.3.4 แก๊ปตัดคลื่น .....	14
2.3.5 ชั้นดับันที่กรุปคลื่นกระแส .....	14
2.4 วิธีทำการทดสอบ .....	16
2.4.1 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ .....	16
2.4.2 การปรับเทียบระบบวัดแรงดัน .....	18
2.4.3 ลำดับขั้นการทดสอบ .....	19
2.4.4 ตัวอย่างผลการทดสอบบนที่กรุปคลื่นอิมพัลส์ด้วยวิธีแอนะล็อก .....	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	23
2.5.1 การเปรียบเทียบภาพถ่ายแรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็ม .....	23
2.5.2 การเปรียบเทียบภาพถ่ายกระแส .....	24
3. การวัดและบันทึกผลการทดสอบ BIL ด้วยระบบดิจิทัล .....	25
3.1 ระบบการรับและส่งสัญญาณ โดยใช้ IEEE-488 (GPIB) .....	26
3.2 หลักการทำงานของระบบมาตรฐาน GPIB .....	28
3.3 การใช้งานซอฟต์แวร์รับระบบมาตรฐาน GPIB .....	30
3.4 การเขียนโปรแกรมควบคุมระบบการทำงาน GPIB ในงานวิจัย .....	30
4. เทคนิคการประมาณเชิงเส้น และการหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดัน .....	32
4.1 การประมาณเชิงเส้นสมการของข้อมูลที่วัดได้ .....	32
4.1.1 การถดถอยเชิงเส้น (line regression) .....	32
4.1.2 การประมาณเส้นสมการของข้อมูลที่เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น .....	33
4.2 ฟังก์ชันของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ .....	34
4.2.1 การประมาณเส้นสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า สำหรับช่วงเวลาหางคลื่น .....	36
4.2.2 การประมาณเส้นสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า สำหรับช่วงเวลาหน้าคลื่น .....	36
4.2.3 การประมาณเส้นสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน .....	37
4.2.4 การคำนวณค่าเวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ ) และหางคลื่น ( $T_2$ ) .....	37
5. การออกแบบระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL แบบดิจิทัล .....	39
5.1 ส่วนประกอบของระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL แบบดิจิทัล .....	39
5.2 การออกองค์ประกอบของตัวลดทอนสัญญาณ .....	41
5.2.1 การออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณแรงดัน .....	41
5.2.2 การออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณกระแส .....	43

## สารบัญ (ต่อ)

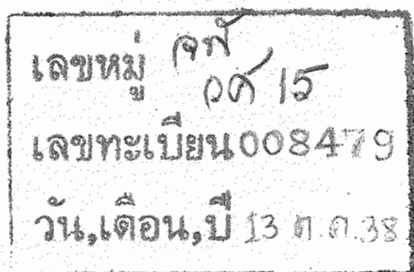
	หน้า
5.3 การออกแบบโปรแกรมวิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	46
5.3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงดัน ก่อนการทดสอบ .....	48
5.3.2 ลำดับขั้นตอนการทำงานของส่วนโปรแกรมสำหรับการเปรียบเทียบ รูปคลื่นมาตรฐาน .....	50
5.3.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสำหรับการทดสอบ BIL .....	53
5.3.4 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสำหรับการเรียกดูข้อมูลเก่า .....	55
6. การทดสอบใช้งานระบบการวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL .....	59
6.1 การทดสอบลักษณะสมบัติของตัวลวดทองสัญญาณภายในกล่อง ลวดทองสัญญาณ .....	59
6.1.1 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดันของตัวลวดทองสัญญาณ .....	59
6.1.2 การทดสอบผลตอบแทนของเวลาของตัวลวดทองสัญญาณ .....	60
6.2 การทดสอบการทำงานของระบบในการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน .....	62
6.3 การทดสอบการทำงานของระบบในการทดสอบ BIL ของ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง .....	69
7. สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ .....	72
7.1 สรุปผลการใช้โปรแกรม .....	72
7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	73
เอกสารอ้างอิง .....	75
ภาคผนวก ก. ....	77
ภาคผนวก ข. ....	81



## รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1 ระบบแรงดันสูงสุดและค่าแรงดันทดสอบ BIL สำหรับค่าแรงดันระบบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 300 กิโลโวลต์ .....	9
2.2 ลำดับขั้นการป้อนแรงดัน ขนาดและลักษณะของแรงดันทดสอบ .....	20
6.1 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าอัตราส่วนแบ่งแรงดันของตัวลวดทองสัญญาณภายในกล่องลวดทองสัญญาณ .....	60
6.2 ตารางแสดงผลการวัดค่าตอบสนองทางเวลาสำหรับตัวลวดทองสัญญาณ .....	61
6.3 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 $\mu\text{sec}$ .....	64
6.4 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 0.84/50 $\mu\text{sec}$ .....	65
6.5 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.56/50 $\mu\text{sec}$ .....	66
6.6 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/40 $\mu\text{sec}$ .....	67
6.7 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/60 $\mu\text{sec}$ .....	68

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลของขดลวดหม้อแปลงที่มีการกระจายขดลวดอย่างสม่ำเสมอ เมื่อมีเสิร์จมากระทบ .....	4
2.2 แสดงแรงดันกระจายเริ่มต้นที่เป็นผลตอบต่อแรงดันรูปขึ้น ของหม้อแปลงซึ่งมีขดลวดสม่ำเสมอ .....	6
2.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50 $\mu$ sec .....	7
2.4 วงจรทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง .....	10
2.5 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ .....	12
2.6 การต่อวงจรระบบวัดแรงดันสำหรับโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน .....	13
2.7 การต่อวงจรระบบวัดแรงดันสำหรับโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ .....	14
2.8 ชั้นตัววัดกระแส .....	15
2-9 รูปคลื่นกระแสผ่านขดลวดหม้อแปลง .....	15
2.10 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ .....	17
2.11 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ .....	18
2.12 ออสซิลโลแกรมแรงดันและกระแสจากการทดสอบ BIL ตามมาตรฐาน ANSI ของหม้อแปลง 3 เฟส 750 kVA 12/24 kV - 416/240 V .....	21
2.13 ออสซิลโลแกรมแรงดันและกระแสจากการทดสอบ BIL ตามมาตรฐาน IEC ของหม้อแปลง 3 เฟส 160 kVA 22 kV - 400/230 V .....	22
2.14 ภาพตัวอย่างรูปคลื่นที่ไม่สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าได้ .....	24
3.1 ตำแหน่งของสายไฟแต่ละเส้นที่ตำแหน่งเด้ารับตัวเมียของระบบมาตรฐาน GPIB .....	27
3.2 การจัดวางอุปกรณ์ในระบบ GPIB .....	28
4.1 เส้นกราฟแรงดันอิมพัลส์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา .....	35
4.2 วิธีหาค่าเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า .....	37
5.1 แผนภาพโดยรวมของระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL สำหรับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง .....	40
5.2 ภาพถ่ายแสดงส่วนประกอบของระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL สำหรับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง .....	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 รูปแสดงลักษณะและการต่อตัวลวดทอนสัญญาณแบบความต้านทานและแบบ ตัวเก็บประจุพร้อมด้วยความต้านทานเมทซิ่ง .....	41
5.4 วงจรแสดงการต่อตัวลวดทอนสัญญาณแบบตัวเก็บประจุแสดงตำแหน่งของ ความต้านทานหน่วงและความต้านทานเมทซิ่ง .....	42
5.5 แสดงการติดตั้งองค์ประกอบของตัวลวดทอนสัญญาณแบบตัวเก็บประจุ .....	43
5.6 วงจรแสดงการต่อของตัวลวดทอนสัญญาณแบบความต้านทานแสดงตำแหน่งของ ความต้านทานหน่วงและความต้านทานเมทซิ่ง .....	44
5.7 แสดงการติดตั้งองค์ประกอบของตัวลวดทอนสัญญาณแบบความต้านทาน .....	45
5.8 รูปแสดงกล่องอุปกรณ์ลวดทอนสัญญาณ ซึ่งแสดงให้เห็นส่วนของตัวลวดทอนสัญญาณ แบบตัวเก็บประจุ และตัวลวดทอนสัญญาณแบบความต้านทาน .....	46
5.9 ภาพกราฟฟิกลงในภาคการนำเสนอชื่อโครงการวิจัย .....	47
5.10 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนในไฟล์ DEFAULT.EXE .....	49
5.11 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อรับข้อมูลและการคำนวณกับ ส่วนโปรแกรม waveform.bil ในไฟล์ BIL.EXE .....	51
5.12 แสดงวงจรทดสอบที่นำเสนอในส่วนของโปรแกรมสำหรับการปรับเทียบ รูปคลื่นมาตรฐานและค่าองค์ประกอบที่ใช้ในวงจร .....	53
5.13 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อรับข้อมูลกับส่วน โปรแกรมการ ทดสอบ BIL ในไฟล์ BIL.EXE .....	56
5.14 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อการเรียกดูข้อมูลเก่า .....	57
6.1 เครื่องมือสำหรับการตรวจวัดค่าอัตราส่วนแบ่งแรงดัน .....	59
6.2 แสดงวงจรที่ใช้ในการหาผลตอบทางเวลาของตัวลวดทอนสัญญาณ .....	61
6.3 ภาพออสซิลโลแกรมผลตอบสนองทางเวลา .....	62
6.4 วงจรและค่าองค์ประกอบที่ใช้สำหรับการทดสอบการทำงานของระบบ ในการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน .....	63
6.5 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบคิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับ แรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 $\mu$ sec .....	64

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.6 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบคิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับ รูปคลื่นอิมพัลส์ 0.84/50 $\mu\text{sec}$ .....	65
6.7 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบคิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับ รูปคลื่นอิมพัลส์ 1.56/50 $\mu\text{sec}$ .....	66
6.8 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบคิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับ รูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/40 $\mu\text{sec}$ .....	67
6.9 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบคิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับ รูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/60 $\mu\text{sec}$ .....	68
6.10 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากระบบวิเคราะห์แบบคิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อก สำหรับการทดสอบ BIL บนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง .....	70
ก.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน .....	77
ก.2 วงจรการทดสอบหม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ .....	78
ก.3 รูปการต่อวงจรการทดสอบในกรณีที่หม้อแปลงมีค่า ( $L_t < 20 \text{ mH}$ ) .....	80

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ



#### 1.1 บทนำทั่วไป

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นและสำคัญในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยทำหน้าที่เพิ่มหรือลดระดับแรงดันในระดับแรงดันที่แตกต่างกัน เพื่อประโยชน์ในการลดกำลังงานสูญเสียในสายของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นด้วยอัตราสูงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นั้นหมายถึงความต้องการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายย่อมมีจำนวนมากขึ้น ฉะนั้นเพื่อให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่มีความเชื่อถือได้และมีประสิทธิภาพสูง หม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาใช้ในระบบจึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงที่มีคุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนด

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อนำไปใช้ติดตั้งในระบบส่งจ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบส่งจ่ายกำลังแรงดันสูงแบบสายจึงในอากาศอยู่กลางแจ้ง จึงมีโอกาที่จะได้รับแรงดันเกิน (Overvoltage) จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเรียกว่า เสรีจฟ้าผ่า (Lightning surge) ซึ่งอาจจะเป็นการผ่าโดยตรงบนสายส่ง หรือในบริเวณใกล้เคียงแล้วเกิดแรงดันเหนี่ยวนำทำให้เกิดคลื่นจรของแรงดันเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และแรงดันเกินที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์ตัดตอนอัตโนมัติ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เรียกว่า เสรีจสวิตชิง (Switching surge) ดังนั้นในมาตรฐานต่าง ๆ เช่น IEC, ANSI รวมทั้งมาตรฐานไทย (TIS) จึงได้กำหนดให้มีการทดสอบผลิตภัณฑ์หม้อแปลงไฟฟ้าก่อนนำไปติดตั้งใช้งานในระบบที่มีแรงดันต่ำกว่า 300 กิโลโวลต์ ด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (BIL) ที่จำลองรูปคลื่นแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบ และในระบบที่มีแรงดันสูงกว่า 300 กิโลโวลต์ ด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิง (SIL) [1] เพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่าการฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าเหล่านั้นสามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) ที่เกิดจากแรงดันเกินเหล่านี้ได้ โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายหรือมีอายุการใช้งานสั้นลง

#### 1.2 ที่มาของปัญหา

การทดสอบสภาพการฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ในหัวข้อการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าเรียกว่าการทดสอบ BIL (Basic Impulse Insulation Level) จัดเป็นการทดสอบเพื่อรับรองเฉพาะแบบ (type test) หรือเป็นการรับรองการออกแบบ

(design test) โดยอาศัยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่าพลังงานสูงพอเพียงเป็นตัวจ่ายแรงดันทดสอบที่จะทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ มีระบบวัดแรงดัน ระบบการบันทึกผลการตรวจลักษณะรูปคลื่นของแรงดัน และกระแสที่ได้จากการทดสอบเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด [1] และต้องอาศัยผู้ที่มีความรู้และความเชี่ยวชาญในการตรวจวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้

ในช่วงที่ผ่านมาการบันทึกภาพรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดสอบ BIL อาศัยระบบบันทึกผลที่เป็นแบบแอนะล็อก และถ่ายภาพด้วยฟิล์มโพลาลอยด์ การบันทึกสัญญาณภาพแบบแอนะล็อกนี้จะทำได้เพียงครั้งเดียว และไม่สามารถที่จะพิจารณารายละเอียดข้อมูลตรงช่วงเวลาที่เราสงสัยได้มากนัก ถ้าต้องการพิจารณาให้ชัดเจนจะต้องทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้กับหม้อแปลงที่กำลังตรวจสอบใหม่ ซึ่งการป้อนแรงดันซ้ำนั้นอาจทำให้ฉนวนของหม้อแปลงได้รับความเสียหายได้ แต่ถ้าการบันทึกสัญญาณนั้นทำด้วยการเข้ารหัสทางดิจิทัลแล้ว เราสามารถจะทำการเรียกดูข้อมูลนั้น ๆ ได้ทั้งหมด หรือทำการพิจารณาในช่วงเวลาที่สนใจใด ๆ อีกก็ครั้งก็ได้ ดังนั้นในปัจจุบันนี้จึงได้เกิดการพัฒนาระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแบบดิจิทัลในเชิงพาณิชย์ขึ้นแล้วในประเทศอุตสาหกรรม ซึ่งระบบวิเคราะห์แบบดิจิทัลดังกล่าวยังมีราคาแพงมาก จึงสมควรที่จะได้มีการพัฒนาออกแบบสร้างขึ้นมาเอง โดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดทั่วไป ร่วมกับเครื่องบันทึกสัญญาณแบบดิจิทัลที่มีความเร็วสูง และทำการออกแบบคำสั่งควบคุมการทำงานบนเครื่องบันทึกสัญญาณแบบดิจิทัล เพื่อให้ได้ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเป็นพื้นฐานและเกิดการพัฒนาเทคโนโลยีของตัวเองในด้านนี้ต่อไปอีกด้วย

### 1.3 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์และขอบข่ายเพื่อ ออกแบบและสร้างระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบดิจิทัล สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้อยู่ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยระบบดิจิทัลกับระบบแอนะล็อกที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบดิจิทัล ทำได้โดยการนำสัญญาณแอนะล็อกแรงดันและกระแสที่ได้จากวงจรทดสอบ ความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ผ่านอุปกรณ์ลดทอนขนาดสัญญาณ

ให้เล็กลง แล้วป้อนให้กับเครื่องออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล ทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล และสัญญาณดิจิทัลที่ได้จะส่งให้กับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์โดยผ่านทางบัสเชื่อมโยงแบบขนาน GPIB จากนั้นใช้โปรแกรมที่พัฒนาออกแบบขึ้น ทำการคำนวณผลหาค่าคงที่ทางเวลาทั้งหน้าคลื่นและหางคลื่น ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันพุ่งเกิน และนำเสนอข้อมูลทางภาพกราฟฟิคบนหน้าจอของเครื่องคอมพิวเตอร์ หรือเก็บข้อมูลไว้ในแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อไว้ใช้ในการอ้างอิงต่อไป รวมทั้งการรายงานผลที่ได้ออกจากเครื่องพิมพ์ หลังจากนั้นทำการทดสอบความสามารถของระบบวิเคราะห์ที่ออกแบบสร้าง ทำการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่าเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นที่แตกต่างกัน เพื่อหาค่าความผิดพลาดในการคำนวณเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากระบบการวัดแบบแอนะล็อก และทำการทดลองใช้งานในการตรวจวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง เพื่อศึกษาเชิงเปรียบเทียบกับระบบวัดแบบแอนะล็อก

#### 1.4 ผลงานการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (BIL) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามที่มาตรฐานสากลกำหนดนั้น ได้มีการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มาเป็นเวลานานแล้ว แต่ระบบที่ใช้เป็นระบบการบันทึกสัญญาณจากจอภาพของออสซิลโลสโคปแบบแอนะล็อกด้วยกล้องโพลาลอยด์ และใช้การตรวจวัดและพิจารณารูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดสอบ การประเมินผลการทดสอบ การวัดค่าเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น ซึ่งต้องทำโดยเจ้าหน้าที่ที่ทำการทดสอบ

ในอดีตได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการทดสอบ BIL ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ในเรื่องการเลือกใช้ชนิดเพื่อทำการตรวจวัดรูปคลื่นกระแส ผลของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับชนิด โดยนาย วุฒิกิจ บุญยสงวน เมื่อปีการศึกษา 2525 [2]

ในต่างประเทศเช่น ประเทศเยอรมัน โดยบริษัท DR. Strauss System-Electronic GmbH ได้พัฒนาระบบ Digital Impulse Voltage Measuring System, TR-AS 25-8/100-8/100-10 [3] บริษัท Siemens ได้พัฒนาระบบ Microcomputer System for Measuring and Control of Impulse Test Systems IMS 12-2 [4] ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดยบริษัท HAEFELY ได้มีการพัฒนาระบบ High-resolution impulse analysing system, HIAS 742 [5] ขึ้นมาทดแทนระบบเก่าที่เป็นแบบแอนะล็อก

## บทที่ 2

### การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ BIL

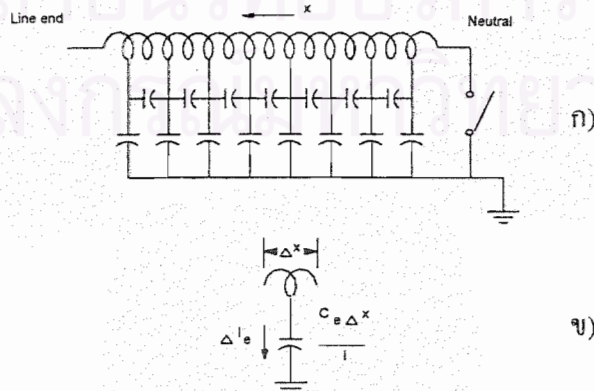
#### สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

การทดสอบ BIL คือการทดสอบสภาพการฉนวนของอุปกรณ์ด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (1.2/50  $\mu\text{sec}$ ) ที่เลียนแบบจากแรงดันเสิร์จที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในแรงดันสูงนั้น โดยส่วนใหญ่เป็นแบบตัวเก็บประจุ ดังนั้นเมื่อมีแรงดันเสิร์จเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเค้นความแตกต่างของแรงดันตามความยาวของตัวเก็บประจุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตอนต้นของการฉนวนจะได้รับแรงดันมากที่สุด ซึ่งถ้าการฉนวนในบริเวณดังกล่าวไม่ดีพอก็จะทำให้เกิดความเสียหายในการฉนวนและนำไปสู่การเกิดความผิดปกติได้ในที่สุด

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญยิ่งในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า การฉนวนของขดลวดในรูปขด ๆ จึงจำเป็นต้องมีมากพอเพื่อให้สามารถทนต่อเกรเดียนต์ของแรงดันเกินได้ ค่าแรงดันเกรเดียนต์จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการจัดวางของขดลวด และการพิจารณาว่าการฉนวนของหม้อแปลงจะมีคุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนดได้นั้น ต้องทำการพิจารณาผลการทดสอบ BIL โดยดูรูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรทดสอบ

#### 2.1 แรงดันกระจายเริ่มต้นเมื่อมีเสิร์จแรงดันรูปขั้นกระทบต่อขดลวดหม้อแปลง

ขดลวดของหม้อแปลงที่มีการกระจายขดลวดแบบสม่ำเสมอ จะมีวงจรสมมูลแสดงดังในรูปที่ 2.1 [3]



รูป 2.1 วงจรสมมูลของขดลวดหม้อแปลงที่มีการกระจาย  
ขดลวดอย่างสม่ำเสมอเมื่อมีเสิร์จมากระทบ



จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นได้ว่าในขดลวดจะมีค่าความจุไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอตามความยาวของขดลวด และในแต่ละช่วงสั้น ๆ ของขดลวดจะมีค่าความจุเทียบกับดิน และเทียบกับขดลวดที่อยู่ใกล้กัน(อนุกรม) ขั้วนิวทรัลของขดลวดจะต่อหรือไม่ต่อสามารถเขียนแทนได้ด้วยสวิตช์

การศึกษาผลกระทบของแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อขดลวดของหม้อแปลง สามารถศึกษาได้จากผลตอบสนองที่มีต่อแรงดันรูปขั้นของหม้อแปลงที่มีขดลวดเพียงขดเดียว และมีการกระจายของขดลวดสม่ำเสมอซึ่งเป็นกรณีศึกษาอย่างง่าย การวิเคราะห์ผลกระทบหลังจากที่เสร็จกระทบต่อขดลวดออกเป็นสามช่วงเวลา คือช่วงเวลาแรกเป็นช่วงเวลาที่น้อยที่สุด (ประมาณ น้อยกว่า 1 ไมโครวินาที) ในช่วงเวลานี้ปริมาณกระแสเนื่องจากเสิร์จของแรงดัน ยังไม่สามารถสังเกตได้เนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำของขดลวดในตัวหม้อแปลง กระแสที่ไหลผ่านจะเป็นกระแสกระจัด (displacement current) ที่ไหลผ่านทางความจุที่เทียบกับดินและความจุที่เกิดจากขดลวดที่อยู่ติดกัน (อนุกรม) ของขดลวด ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้เกิดแรงดันกระจายเริ่มต้น (initial distribution voltage) ขึ้น สำหรับในช่วงเวลาที่สามนั้นเป็นช่วงที่แรงดันกระจายของขดลวดอยู่ในสภาพอยู่ตัว และในช่วงเวลาที่สองซึ่งเป็นช่วงเวลาที่แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงจากสภาพเริ่มต้นไปสู่สภาพอยู่ตัว [6]

ในการวิเคราะห์หาค่าแรงดันกระจายเริ่มต้น ตามที่ Allan Greenwood ได้แสดงการวิเคราะห์ไว้ดังต่อไปนี้ [6] ในช่วงแรกจะไม่มีกระแสไหลผ่านขดลวดเนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำในขดลวด ดังนั้นในช่วงระยะเวลาดังกล่าวจะทำให้วงจรสมมูลในรูปที่ 2.1 ลดรูปลงเหลือเพียงแคว้งจรตาข่ายของค่าความจุเท่านั้น ถ้าให้ค่าความจุที่เทียบกับดินของขดลวดเป็น  $C_d$  และให้ค่าความจุนุกรมเป็น  $C_s$

ในกรณีที่ขั้วนิวทรัลเป็นดิน ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

$$\begin{aligned} \text{ที่ } x = 0 & \quad E = 0 \\ \text{ที่ } x = l & \quad E = V \end{aligned}$$

แทนขอบเขตเงื่อนไขเหล่านี้ ทำให้ได้แรงดันกระจายตามแนวความยาวของขดลวดเป็น

$$\begin{aligned} E &= \frac{V}{2 \sinh \alpha} \left[ e^{\alpha x / l} - e^{-\alpha x / l} \right] \\ &= V \frac{\sinh(\alpha x / l)}{\sinh \alpha} \end{aligned} \tag{2.1}$$

เมื่อ  $V$  เป็นขนาดของเสิร์จแรงดันรูปขั้น

และ 
$$\alpha = \sqrt{\frac{C_e}{C_s}}$$

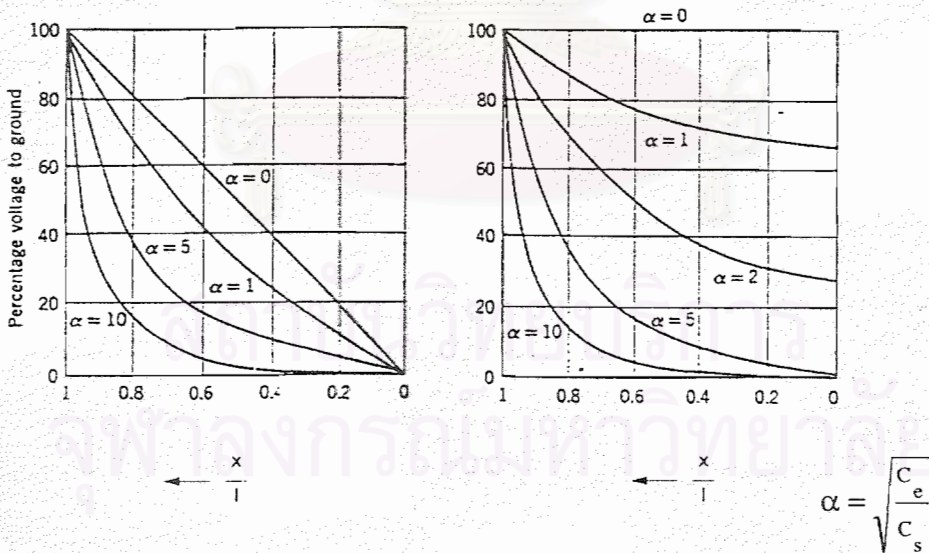
และถ้าขั้วนิวทรัลแยกอิสระจากดิน ขอบเขตของเงื่อนไขจะเป็น

$$\begin{aligned} \text{ที่ } x = l & \quad E = V \\ \text{ที่ } x = 0 & \quad I_s = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{dE}{dx} = 0 \end{aligned}$$

แทนขอบเขตเงื่อนไขเหล่านี้ ทำให้ได้แรงดันกระจายตามแนวความยาวของขดลวดเป็น

$$\begin{aligned} E &= \frac{V}{2 \cosh \alpha} \left[ e^{\alpha x / l} + e^{-\alpha x / l} \right] \\ &= V \frac{\cosh(\alpha x / l)}{\cosh \alpha} \end{aligned} \tag{2.2}$$

สมการ 2.1 และสมการ 2.2 อธิบายค่าแรงดันกระจายเริ่มต้นสำหรับขดลวดเมื่อมีเสิร์จแรงดันรูปขั้นมากระทบ และสังเกตได้ว่าทั้งสองกรณีขึ้นอยู่กับตัวแปร  $\alpha$  หรืออัตราส่วนของ  $[C_e/C_s]^{1/2}$  ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.2



ก) ขั้วนิวทรัลต่อลงดิน                      ข) ขั้วนิวทรัลแยกอิสระจากดิน  
รูปที่ 2.2 แสดงแรงดันกระจายเริ่มต้นที่เป็นผลตอบต่อแรงดันรูปขั้นของหม้อแปลงซึ่งมีขดลวดสม่ำเสมอ

เราสามารถสังเกตได้ทันทีว่าค่าแรงดันกระจายมีความไม่สม่ำเสมอสูงมากขึ้น เมื่อค่า  $\alpha$  มีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นที่  $\alpha = 10$  ค่าแรงดันประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ตกคร่อมอยู่กับขดลวดประมาณ

10 เปอร์เซนต์คอนตัน ค่าความชันที่ถูกต้อง ณ จุดขั้วต่อไฟสามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์สมการ 2.1 และ 2.2 ดังนี้

ก) กรณีที่ขั้วนิวทรัลต่อลงดิน

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\alpha}{l} V \frac{\cosh(\alpha x / l)}{\sinh \alpha}$$

ถ้า  $x = l$ ,  $\frac{dE}{dx} = \frac{\alpha V}{l} \coth \alpha$  (2.3)

ข) กรณีที่ขั้วนิวทรัลแยกอิสระจากดิน

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\alpha}{l} V \frac{\sinh(\alpha x / l)}{\cosh \alpha}$$

ถ้า  $x = l$ ,  $\frac{dE}{dx} = \frac{\alpha V}{l} \tanh \alpha$  (2.4)

สำหรับค่า  $\alpha$  ที่มีค่ามาก ๆ นั้น ทำให้  $\coth \alpha \approx \tanh \alpha \approx 1$  ดังนั้นที่ต้นขดลวดจะได้รับแรงดันกระจายมีค่าเท่ากับ  $dE/dx = \alpha V/l$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\alpha$  เท่าของค่าแรงดันกระจายโดยเฉลี่ย

ในสภาวะเสิร์จ ฉนวนระหว่างขดลวดที่บริเวณต้นขดลวดจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้ารุนแรงมากที่สุด ถ้าหากการฉนวนของขดลวดไม่ดีพอ ก็จะเป็นเหตุทำให้เกิดความผิดปกติเสียหายแก่หม้อแปลง ดังนั้นการออกแบบโครงสร้าง การวางขดลวด และการฉนวนขดลวดจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงแรงดันกระจายอิมพัลส์เริ่มต้นเป็นเรื่องสำคัญยิ่งประการหนึ่ง และเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าว่ามีคุณสมบัติทนต่อแรงดันเกินหน้าคลื่นชั้นได้ จึงจำเป็นต้องทดสอบความคงทนด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนด

## 2.2 แรงดันทดสอบ BIL

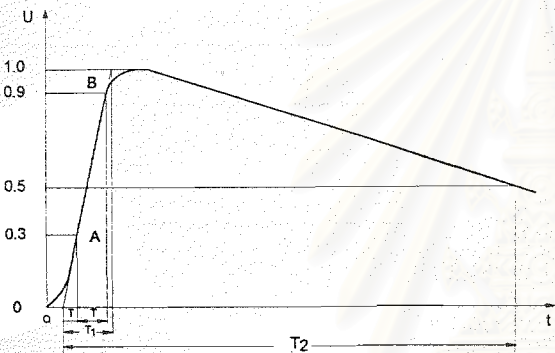
การทดสอบ BIL เป็นการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ที่กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  เวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$  ขนาดแรงดัน  $U_m$  ขั้วของแรงดันบวกหรือลบ รูปคลื่นเต็มคลื่นหรือรูปคลื่นตัด ซึ่งตามมาตรฐานนานาชาติเช่น มาตรฐาน IEC (International Electrotechnique Commission) หรือมาตรฐาน ANSI (American National Standard Institute) ได้กำหนดค่าไว้ดังในรูปที่ 2.3 เป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu\text{sec}$  ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC, ANSI [7,8]

การสร้างแรงดันอิมพัลส์ทดสอบบางกรณี ก็เป็นการยากที่จะปรับให้ได้รูปคลื่นตามที่กำหนดในมาตรฐานเพราะในวงจรทดสอบจะมีค่าความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ที่มักจะทำให้เกิดออสซิลเลชันหรือเกิดความคลาดเคลื่อนในรูปคลื่น เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่ต้องการทดสอบ ซึ่งในมาตรฐาน [7,8] ได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ได้กล่าวคือ

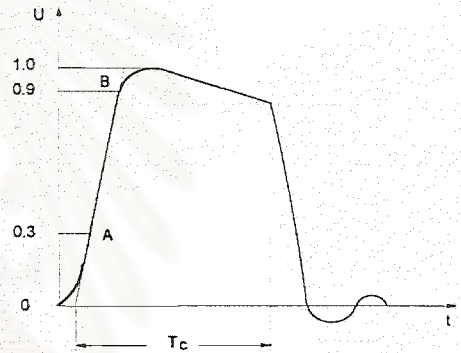
$$\text{เวลาช่วงหน้าคลื่น} \quad T_1 = 1.2 \mu\text{sec} \pm 30 \%$$

$$\text{เวลาช่วงหางคลื่น} \quad T_2 = 50 \mu\text{sec} \pm 20 \%$$

$$\text{ค่ายอดแรงดัน} \quad U_m \pm 3 \%$$



(ก) รูปคลื่นเต็ม



(ข) รูปคลื่นตัดช่วงหางคลื่น

รูปที่ 2.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu\text{sec}$

ค่าแรงดันทดสอบ BIL ขึ้นอยู่กับการเลือกทดสอบตามมาตรฐานใดเช่น IEC, ANSI ดังแสดงในตารางที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

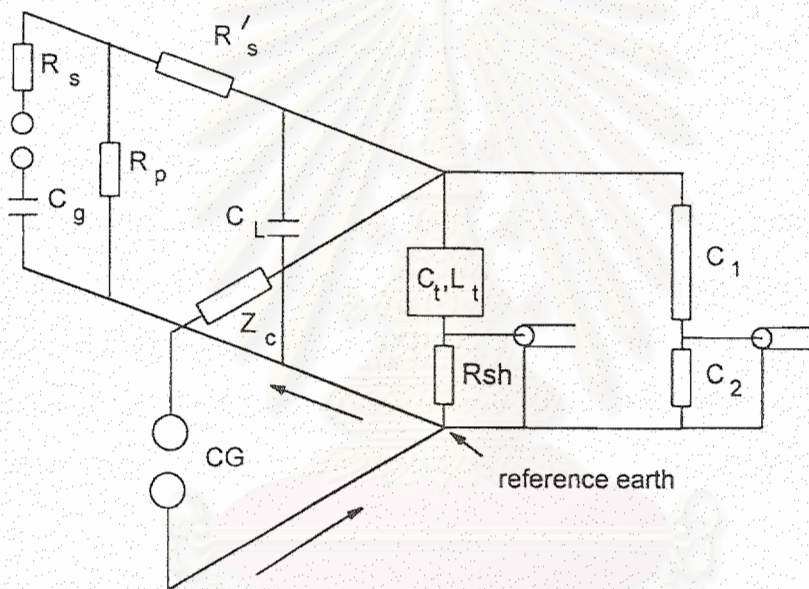
ตารางที่ 2.1 ระบบแรงดันสูงสุดและค่าแรงดันทดสอบ BIL สำหรับค่าแรงดันระบบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 300 กิโลโวลต์ (เฉพาะค่าแรงดันระบบที่ใช้ภายในประเทศ)

ระบบแรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)		แรงดันทดสอบอิมพัลส์ รูปคลื่นเต็ม (กิโลโวลต์)		แรงดันทดสอบอิมพัลส์ รูปคลื่นตัด (กิโลโวลต์)	
IEC[1]	ANSI[9]	IEC[1]	ANSI[9]	IEC[1]	ANSI[9]
≤ 1.1		-		-	
7.2		60		60	
	8.7		75		88
12		75		75	
	15		95		110
24		125		125	
	25		150		175
			125		145
	34.5		200		230
			150		175
36		170		170	
	69		350		400
72.5		325		325	
	115		550		630
			450		520
123		550		550	
		450		450	
	230		1050		1210
			900		1035
245		950		950	
		850		850	

## 2.3 อุปกรณ์การทดสอบ

### 2.3.1 วงจรทดสอบ

วงจรทดสอบความคงทนด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าของหม้อแปลง ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และองค์ประกอบปรับรูปคลื่น ระบบวัดแรงดันทดสอบและระบบวัดกระแสอิมพัลส์ที่ไหลผ่านขดลวดที่ทดสอบ อุปกรณ์สร้างรูปคลื่นตัด (ช่องว่างทรงกลม หรือช่องว่างปลายแหลม) อุปกรณ์เหล่านี้จะต่อเป็นวงจรที่สำคัญ 3 วงจรคือ วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ วงจรวัดแรงดันทดสอบ และวงจรสร้างคลื่นตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [10]



รูปที่ 2.4 วงจรทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

- $C_g$  = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ เพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์
- $C_L$  = ตัวเก็บประจุโหลดเพื่อช่วยในการปรับแก้ให้ได้รูปคลื่นแรงดันมาตรฐาน
- $C_t$  = ค่าตัวเก็บประจุของหม้อแปลงทดสอบ
- $L_t$  = ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงทดสอบ
- $R_{si}$  = ความต้านทานภายในอนุกรมของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- $R_{sc}$  = ความต้านทานภายนอกต่ออนุกรมสำหรับปรับหน้าคลื่น
- $R_p$  = ความต้านทานต่อแบบขนาน
- $Z_1, Z_2$  = อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงและภาคแรงดันต่ำตามลำดับของโวลเตจดีไวเดอร์
- $CG$  = แก๊สตัดคลื่น
- $R_{sh}$  = ชั้นตัววัดกระแส

การจัดวางวัสดุทดสอบและอุปกรณ์ทดสอบจะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากสิ่งที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณทดสอบควรจะต้องมีที่ว่างพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลงที่จะนำมาทดสอบ และขนาดแรงดันทดสอบ เกี่ยวกับการต่อลงดินก็เป็นเรื่องสำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องของผลการทดสอบ เนื่องจากแรงดันทดสอบและกระแสเป็นรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว ฉะนั้นการต่อลงดิน ณ จุดที่ถือเป็นศักย์ดินอ้างอิง (reference earth) จึงต้องเลือกจุดต่อที่เหมาะสม ในทางปฏิบัติจะใช้ระบบสายดินของห้องทดสอบเป็นศักย์ดินอ้างอิง โดยต่อจุดที่ใกล้กับวัสดุทดสอบคือ หม้อแปลงมากที่สุด สายต่อลงดินและสายป้อนแรงดันระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์กับ วัสดุทดสอบควรมีค่าความเหนี่ยวนำและค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมาก ๆ โดยทั่วไปมักใช้แถบทองแดง บางซึ่งมีความกว้างและหนาประมาณ 120 มม. และ 0.5 มม. ตามลำดับ [11]

### 2.3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์สำหรับการทดสอบ BIL ได้จากวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุแล้วปล่อยให้คายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าตัวองค์ประกอบให้ได้รูปคลื่นตามที่ต้องการดังรูปที่ 2.5 ก) เมื่อต้องการแรงดันทดสอบสูง ๆ (มากกว่า 200 kV) สามารถสร้างรูปคลื่นได้โดยใช้วงจรพื้นฐานมาต่อซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น ตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ (Marx's multiple circuit) ดังในรูปที่ 2.5 ข) (HAEFELY)

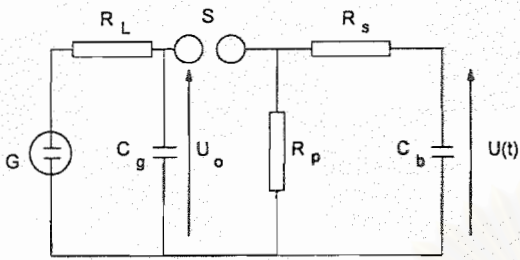
การเลือกเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับทดสอบ BIL จะกำหนดด้วย คุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ แรงดันอัดประจุ (ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ) และ พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิดซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

$$w = \frac{1}{2} C_g U_0^2 \times 10^{-9} \text{ kJ} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $U_0$  คือแรงดันอัดประจุรวมหน่วยเป็น kV

$C_g$  คือความจุไฟฟ้ารวมของเครื่องกำเนิดเป็น pF

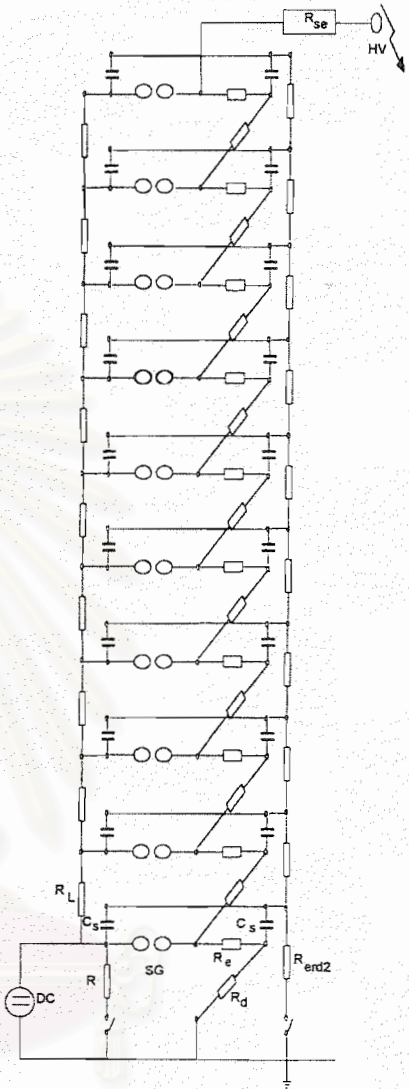
ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดหมายถึง อัตราส่วนแรงดันที่จ่ายออกต่อแรงดันที่ป้อนอัดประจุซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความจุ  $C_g$  เมื่อเทียบกับความจุไฟฟ้าโหลรวมทั้งหมด  $C_b = C_L + C_i$  และเทคนิคการปรับรูปคลื่นให้ได้รูปคลื่นมาตรฐานตามข้อแนะนำในมาตรฐานสากลเช่น IEC สามารถดูได้จากภาคผนวก ก. [15]



ก) วงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจร

- G คือตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง
- $U_0$  คือแรงดันอัดประจุกระแสตรง
- $C_g$  คือตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- $C_b$  คือโหลดตัวเก็บประจุ (รวมอุปกรณ์วัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ(ถ้ามี))
- $R_L$  คือความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
- $R_s$  คือความต้านทานหน่วง
- $R_p$  คือความต้านทานปล่อยประจุ
- $U(t)$  คือแรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
- S คือสปาร์กเก็ป



ข) วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

รูปที่ 2.5 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้รูปคลื่นตามมาตรฐานกำหนดและมีประสิทธิภาพสูง ความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้า  $C_g$  กับ  $C_b$  ควรเป็น

$$C_g \geq 10 * C_b \quad (2.6)$$

ในกรณีทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลง 3 เฟส ซึ่งทำการทดสอบทีละเฟสอีก 2 เฟสต่อลงดิน และทางด้านจ่ายออกก็ต่อลัดวงจรลงดิน ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_g$  อาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์ [12]



$$C_g \geq \frac{P_n \cdot 10^8}{U_n^2 \epsilon_{sc}} \text{ pF} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $P_n$  คือค่ากำลังที่กำหนดของหม้อแปลงเป็น MVA

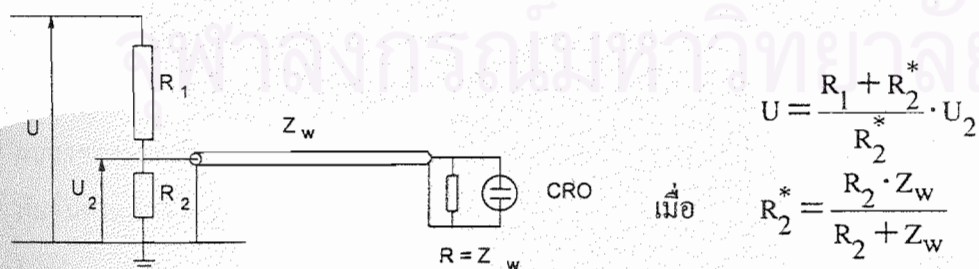
$U_n$  คือแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงเป็น kV

$\epsilon_{sc}$  คือแรงดันลัดวงจรเป็น %

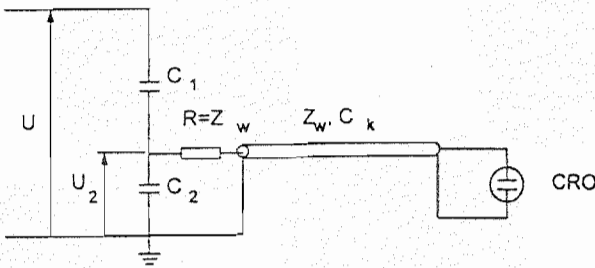
### 2.3.3 ระบบวัดแรงดัน

ระบบวัดแรงดันประกอบด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ เคเบิลวัด อุปกรณ์วัดและการบันทึกรูปคลื่นแรงดันภาคแรงต่ำ โวลเตจดีไวเดอร์อาจจะเป็นแบบความต้านทาน ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่มีขนาดไม่เกิน 2000 kV [11] ถ้าแรงดันสูงกว่านั้นจะใช้โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่มีความต้านทานหน่วง (damped capacitive voltage divider) คุณสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้วัดแรงดันทดสอบ จะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดเช่น เวลาตอบสนอง  $T$  ต้องน้อยกว่า  $0.2 \mu\text{sec}$  และความคลาดเคลื่อนของการวัดแรงดันค่ายอด  $\Delta U \leq 3 \%$  [10] และจะต้องไม่เป็นโหลดแก่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

อุปกรณ์วัดและการบันทึกรูปคลื่นแรงดันด้านภาคแรงต่ำ ของโวลเตจดีไวเดอร์ประกอบด้วยโวลท์มิเตอร์วัดค่ายอด และออสซิลโลสโคปที่มีอิมพีแดนซ์ป้อนเข้าสูง เพื่อไม่ให้ เป็นโหลดของโวลเตจดีไวเดอร์ และต้องมีชิลด์ป้องกันคลื่นรบกวน มีอัตราการบันทึกภาพสูง พิกัดแรงดันป้อนเข้าสูง ไม่มีแอมพลิฟายเออร์ มีแบนด์วิดท์สูง และเวลาตอบสนองน้อย สัญญาณที่ออกจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อเข้าโวลท์มิเตอร์หรือออสซิลโลสโคปต้องใช้เคเบิลมีชิลด์ และใช้เมทซิงอิมพีแดนซ์โดยต้องต่อให้ถูกต้องดังรูปที่ 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.6 การต่อวงจรระบบวัดแรงดันสำหรับ  
โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน



ความถี่สูง

$$U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot U_2$$

ความถี่ต่ำ

$$U = \frac{C_1 + C_2 + C_k}{C_1} \cdot U_2$$

รูปที่ 2.7 การต่อวงจรระบบวัดแรงดันสำหรับ  
โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

### 2.3.4 แก๊สตัดคลื่น

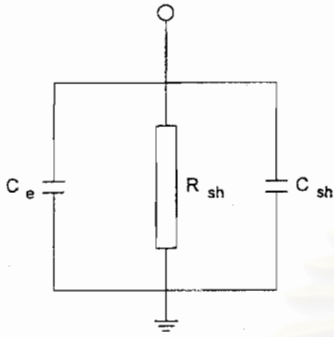
ในกรณีแรงดันทดสอบไม่สูงมากนักเช่น ทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงในระบบจำหน่ายซึ่งมีระบบแรงดันไม่เกิน 52 kV หรือ BIL ไม่เกิน 250 kV อาจสร้างคลื่นตัดได้โดยใช้ช่องว่างของแท่งกลมปลายแหลม (rod-rod gap) ปรับระยะช่องว่างให้พอเหมาะที่จะได้ช่วงคลื่นตัด  $T_c$  อยู่ในช่วง 2-6 ไมโครวินาที ตามที่มาตรฐานกำหนด [16] กรณีที่แรงดันสูงมากขึ้นต้องใช้ระยะแก๊สมากขึ้น การเกิดคลื่นตัดจะไม่แน่นอนเพราะขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศ จึงใช้แก๊สตัดคลื่นที่มีไอสวิตช์ที่สามารถควบคุมเวลาคลื่นตัดได้ [23] จะเป็นการลดอัตราเสี่ยงของหม้อแปลงอันเนื่องจากการลองผิดลองถูกเพื่อให้ได้เวลาคลื่นตัดตามมาตรฐานกำหนด

### 2.3.5 ชั้นดับที่รูปคลื่นกระแส

ชั้นดับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประการหนึ่ง ของวงจรทดสอบ BIL ของหม้อแปลงไฟฟ้า การตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเมื่อได้รับแรงดันทดสอบ อาจสังเกตได้จากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนถ้าหากความผิดพร่องที่เกิดขึ้นทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปมากเช่น เกิดการลัดวงจรลงดิน เป็นต้น แต่ในกรณีที่เกิดผิดพร่องเล็กน้อย เช่น เกิดผิดพร่องระหว่างรอบขดลวด เกิดลีสซาร์จบางส่วนภายใน เป็นต้น การตรวจจับโดยสังเกตจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทำได้ยาก ความผิดพร่องเล็กน้อยเช่นนี้ต้องตรวจจับโดยดูการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านชั้นดับที่อยู่ระหว่างปลายขดลวดด้านที่ไม่ได้ป้อนแรงดันทดสอบกับดินดังแสดงในรูปที่ 2.5

ชั้นดับสำหรับวัดกระแสดังกล่าวนี้จะเป็นความต้านทานล้วน มีความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำต่ำ และโดยที่วงจรสมมูลของหม้อแปลงเริ่มแรกที่ได้รับแรงดันอิมพัลส์จะมี

ลักษณะเป็นตาข่ายความจุไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นความต้านทานชั้นดีจะมีความจุไฟฟ้าระหว่างปลายขดลวดด้านต่อลงดินกับดินขนานอยู่ด้วยคือ  $C_e$  ดังแสดงในรูปที่ 2.8



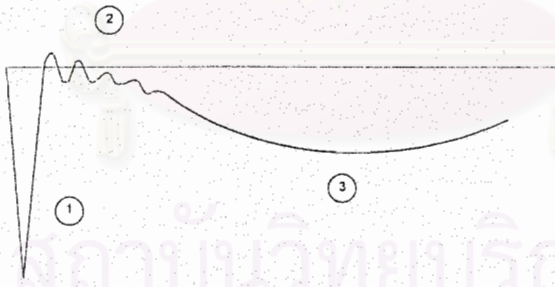
$C_e$  คือ ความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับดิน

$C_{sh}$  คือ ความจุไฟฟ้าที่อาจต่อเพิ่มขนานกับความต้านทานชั้นดี

$R_{sh}$  คือ ความต้านทานชั้นดี

รูปที่ 2.8 ชั้นดีวัดกระแส

รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านชั้นดีจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ ให้กับขดลวดหม้อแปลง อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ ส่วนต้นรูปคลื่นจะเป็นกระแสแบบประจุ (capacitive current) มีลักษณะเป็นพัลส์ความชันสูงคือส่วนที่ 1 ในรูปที่ 2.9 เรียกว่า กระแสสไปก์ ต่อจากสไปก์เป็น ส่วนที่สองมีลักษณะเป็นออสซิลเลชันที่มีค่าความถี่ธรรมชาติสูงส่วนที่ 2 ซึ่งเกิดจากความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำของขดลวดหม้อแปลง ในส่วนที่ 3 เป็นกระแสเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นกระแสผ่านขดลวดหม้อแปลง

ลักษณะสมบัติของชั้นดีวัดกระแสสำหรับตรวจจับความผิดปกติที่ควรพิจารณา มี 2 ประการ [2] คือ

1) เวลาคงตัวของชั้นดีคือ  $\tau_0 = R_{sh} C_e$  ซึ่งเป็นตัวกำหนดขีดความสามารถของชั้นดีว่า จะตรวจจับความผิดปกติได้ดีและละเอียดเพียงใด ถ้าเกิดความผิดปกติขึ้นในขดลวดจะทำให้เกิดออสซิลเลชันที่มีความถี่สูงเป็นเมกะเฮิรตซ์ ซึ่งสูงกว่าความถี่ธรรมชาติของกระแสที่ไหลผ่านขดลวด แต่มีขนาดเล็กมีลักษณะเป็นเพียงจุดกระตุ้นในรูปคลื่นกระแส ณ จุดที่เกิดผิด

พร้อม รูปภาพของกระแสพิศพร่อง จะแสดงออกมาให้เห็นได้หรือไม่ นั่นขึ้นอยู่กับว่าแรงดันคร่อม  
 ชั้นดี จะติดตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากความพิศพร่องได้มากน้อยเพียงใด ชั้นดีที่จะติดตามการ  
 เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ทันทีต้องเป็นชั้นดีที่มีเวลาคงตัว  $\tau_0$  น้อยกว่า 1 ใน 4 ของคาบการอ  
 ออสซิลเลชันของกระแสพิศพร่อง

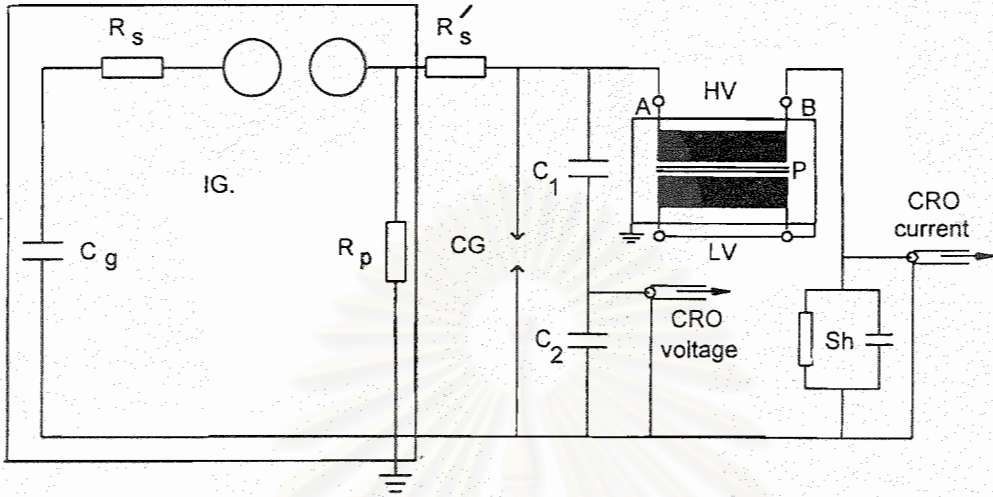
2) ความไวของชั้นดี (sensitivity) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงค่าในแนว  
 ความสูงของรูปคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงกระแส 1 หน่วย นั่นก็คือ การเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของแรง  
 ดันต่อการเปลี่ยนแปลงกระแส 1 หน่วย ความไวนี้แปรตามค่าความต้านทานชั้นดี ถ้าเพิ่มความ  
 ต้านทานของชั้นดีจะเพิ่มความไวสูงขึ้น รูปคลื่นกระแสจะโตขึ้น ทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงขึ้น  
 ลงได้ชัดเจนขึ้น แต่การเพิ่มความต้านทานชั้นดีจะทำให้เวลาคงตัวของชั้นดีเพิ่มขึ้นด้วย

## 2.4 วิธีทำการทดสอบ

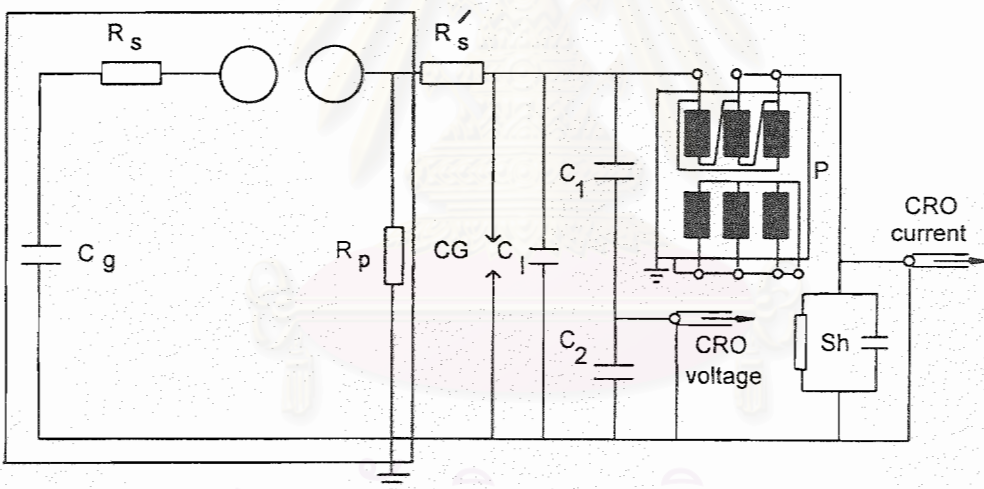
### 2.4.1 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ

หม้อแปลงที่นำมาทำการทดสอบ BIL อาจเป็นเฟสเดียวหรือสามเฟส การต่อ  
 วงจรทดสอบคล้ายกันคือ ทดสอบทีละเฟสโดยใช้ปลายขั้วข้างหนึ่งของขดลวดเฟสที่จะรับการ  
 ทดสอบเป็นที่ป้อนแรงดัน ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งของขดลวดจะต่อลงดินผ่านชั้นดีสำหรับวัด  
 กระแสอิมพัลส์ที่ไหลผ่านขดลวดนั้น สำหรับขั้วของขดลวดหรือเฟสที่ไม่ได้รับการทดสอบจะต่อ  
 ลงดินดังในรูปที่ 2.10(ก) และ 2.10 (ข) ซึ่งแสดงการต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบสำหรับ  
 หม้อแปลงเฟสเดียวและสามเฟสตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



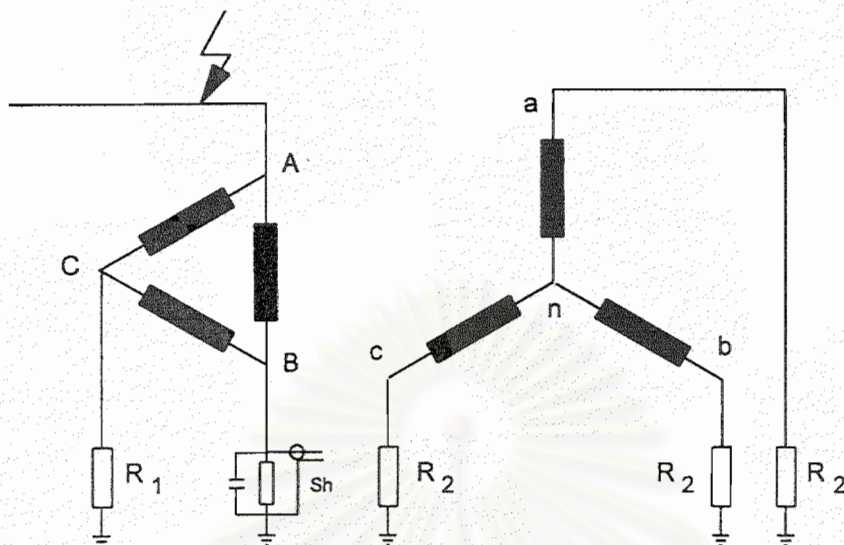
ก) หม้อแปลงรับการทดสอบเฟสเดียว



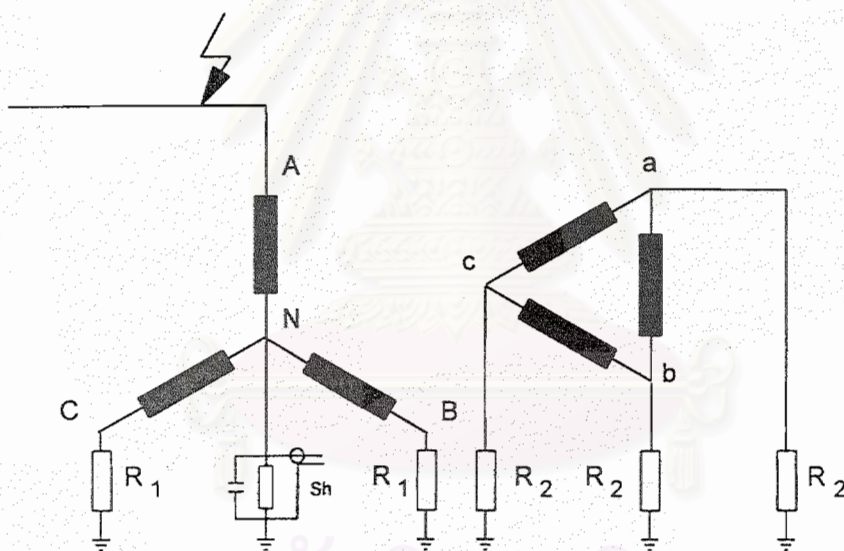
ข) หม้อแปลงรับการทดสอบสามเฟส

รูปที่ 2.10 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ

ในกรณีหม้อแปลง 3 เฟสขนาดใหญ่ มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ และตัวเก็บประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีขนาดจำกัด มักจะมีปัญหาความยุ่งยากในการที่จะปรับรูปคลื่นแรงดันทดสอบให้ได้เกณฑ์ที่กำหนดคือ รูปคลื่นมักจะมีออสซิลเลชัน และช่วงหางคลื่นมักจะสั้น การแก้ปัญหาอาจทำได้โดยต่อขั้วหรือเฟสที่มีได้รับการทดสอบผ่านความต้านทานลงดิน โดยที่ขั้วคลวดที่มีได้ทดสอบนั้นจะต้องมีแรงดันไม่เกิน 75 % ของแรงดันทดสอบ ดังการต่อในรูปที่



ก) หม้อแปลง 3 เฟส  $\Delta - Y$



ข) หม้อแปลง 3 เฟส จุดนิวทรัลต่อลงดิน

รูปที่ 2.11 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ BIL

สำหรับหม้อแปลงที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

### 2.4.2 การเปรียบเทียบระบบวัดแรงดัน

เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าระบบวัดแรงดันทดสอบนั้นมีความถูกต้อง จำเป็นต้องมีการตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบระบบวัดแรงดันที่จะทดสอบก่อนเริ่มต้นทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการทดสอบเพื่อตรวจรับปกติทั่วไป จะทำการเทียบระบบวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลม (sphere-gap) ตามข้อกำหนด IEC Publ.52 [14]

### 2.4.3 ลำดับขั้นการทดสอบ

หลังจากทำการเปรียบเทียบระบบวัดแรงดันเรียบร็อยแล้ว จะเป็นลำดับขั้นตอนการป้อนแรงดันทดสอบซึ่งขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องทราบแน่ชัดก่อนว่าจะทดสอบด้วยมาตรฐานใด แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงนั้นจะประกอบด้วย

1) การตรวจสอบและปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ให้ได้ตามเกณฑ์กำหนด คือ รูปคลื่นจะต้องมีเวลานำคลื่นอยู่ระหว่าง 0.84 - 1.56  $\mu\text{sec}$  และเวลาหางคลื่นอยู่ระหว่าง 40 - 60  $\mu\text{sec}$  การตรวจปรับรูปคลื่นจะทำในขณะที่มีหม้อแปลงรับการทดสอบต่ออยู่ด้วยและป้อนแรงดันไม่ควรเกิน 75 % ของค่า BIL โดยการปรับค่าองค์ประกอบของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

2) ทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์ลดระดับของคลื่นเต็ม (Reduced level full wave = RF) มีค่าระหว่าง 50 ถึง 75 % ของแรงดันทดสอบ บันทึกรูปคลื่นแรงดันและกระแสผ่านขดลวดทดสอบไว้เป็นรูปคลื่นอ้างอิง

3) ป้อนแรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็ม 100 % (Full wave = FW) 2 ครั้ง บันทึกแรงดันและกระแสไว้เช่นกัน

4) ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด (Chopped wave = CW) โดยการทดสอบรูปคลื่นตัดนี้จะทำตามมาตรฐานที่อ้างอิง หรือขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ให้ทดสอบ และจะทำการทดสอบรูปคลื่นตัดที่ส่วนหางของคลื่น 2 ครั้ง ขนาดและช่วงเวลาคลื่นตัดขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่อ้างอิง และจะทำการบันทึกภาพไว้

การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด โดยทั่วไปจะถือว่าเป็นการทดสอบพิเศษคือ จะทดสอบเมื่อระบุให้ทดสอบเท่านั้น ลำดับขั้นและจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันตามมาตรฐานที่นิยมใช้กันทั่วไปแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลำดับชั้นการป้อนแรงดัน ขนาดและลักษณะของแรงดันทดสอบ

มาตรฐาน	ทดสอบตามข้อ	ลำดับชั้นการป้อนแรงดันทดสอบ 1.2/50 $\mu$ sec	ค่ายอดแรงดันรูปคลื่นตัดเป็น % ของค่า BIL	ช่วงเวลากลิ่นตัด $T_c$ ( $\mu$ sec)
IEC[1] TIS[16]	12	1) 1 x RF 50%-75% 2) 3 x FW 100%	-	-
IEC[1] TIS[16]	13	1) 1 x RF 50%-75% 2) 1 x FW 100% 3) 2 x CW 100% 4) 1 x FW 100%	100	2 - 6
ANSI[9]	10.3	1) 1 x RF 50%-75% 2) 2 x CW 115% 3) 1 x FW 100%	115-125	1 - 3

RF = แรงดันรูปคลื่นเต็มแบบลดระดับ (Reduced level of full wave)

FW = แรงดันรูปคลื่นเต็ม (Full wave)

CW = แรงดันรูปคลื่นตัด (Chopped wave)

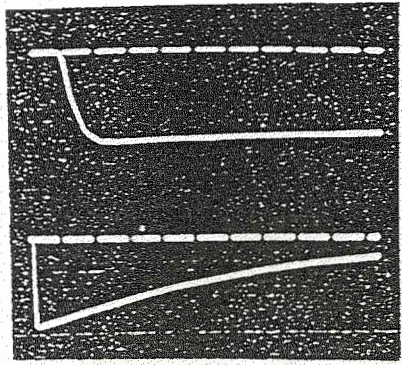
$T_c$  = เวลากลิ่นตัด (Chopping time)

#### 2.4.4 ตัวอย่างผลการทดสอบบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ด้วยวิธีแอนะล็อก

ตัวอย่างของออสซิลโลแกรมรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่บันทึกตามลำดับ จากการทดสอบหม้อแปลง 3 เฟส 160 kVA 22 kV - 400/230 ซึ่งมีค่า BIL = 125 kV (IEC) แสดงไว้ในรูปที่ 2.12

ตัวอย่างของออสซิลโลแกรมรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่บันทึกตามลำดับ จากการทดสอบหม้อแปลง 3 เฟส 750 kVA 12/24 kV - 416/240 V ซึ่งมีค่า BIL = 125 kV (ANSI) แสดงไว้ในรูปที่ 2.13

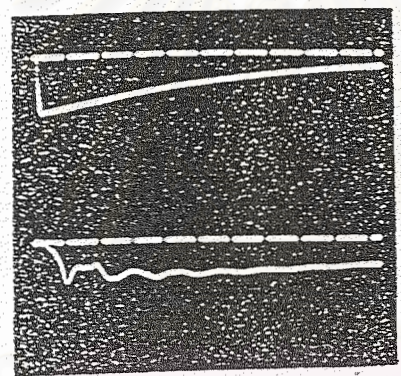




Wave front 1  $\mu\text{s}/\text{div}$

Wave tail 10  $\mu\text{s}/\text{div}$

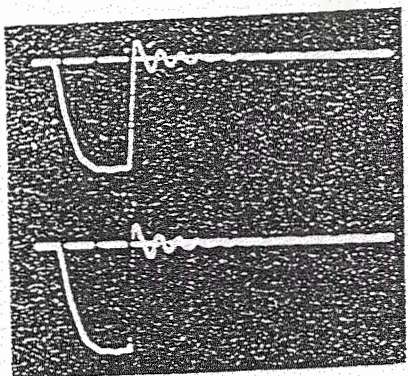
1) WF Calibrated voltage 75 kV (1.2/50  $\mu\text{sec}$ )



voltage 10  $\mu\text{s}/\text{div}$

current 50  $\mu\text{s}/\text{div}$

2) RW 75 kV



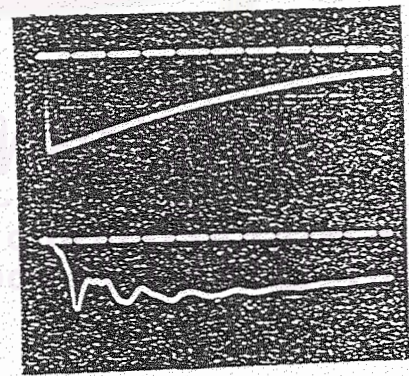
voltage

1  $\mu\text{s}/\text{div}$

voltage

1  $\mu\text{s}/\text{div}$

3) Two-CW 145 kV



voltage

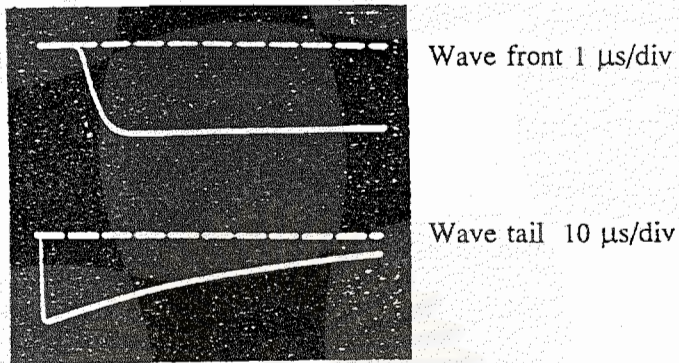
10  $\mu\text{s}/\text{div}$

current

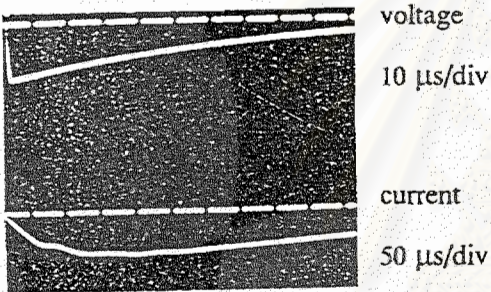
50  $\mu\text{s}/\text{div}$

4) FW 125 kV

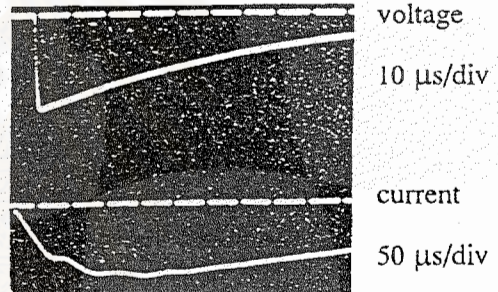
รูปที่ 2.12 ออสซิลโลแกรมแรงดันและกระแสจากการทดสอบ BIL ตามมาตรฐาน ANSI ของหม้อแปลง 3 เฟส 750 kVA 12/24 kV - 416/240 V



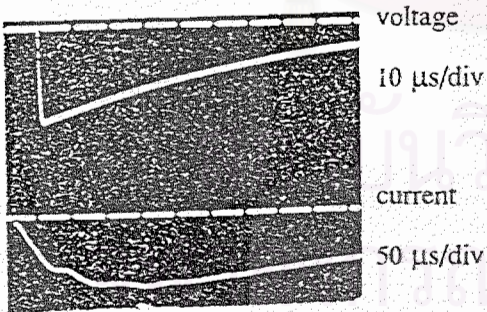
1) WF Calibrated voltage 75 kV (1.2/46 μsec)



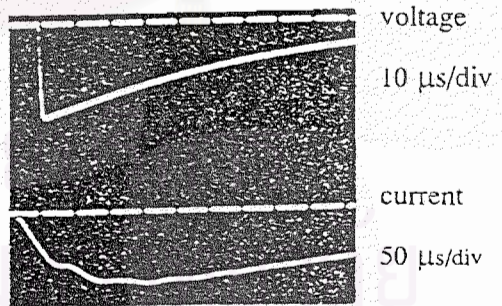
2) RW 75 kV



3) FW 125 kV



4) FW 125 kV



5) FW 125 kV

รูปที่ 2.13 ออสซิลโลแกรมแรงดันและกระแสจากการทดสอบ BIL ตามมาตรฐาน IEC ของหม้อแปลง 3 เฟส 160 kVA 22 kV - 400/230 V

ออสซิลโลแกรมที่แสดงในตัวอย่างลำดับขั้นทดสอบ BIL บนหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังตามรูปที่ 2.12 และ 2.13 เป็นภาพที่ได้จากการบันทึกด้วยกล้องโพลาลอยด์บนแอนะล็อก ออสซิลโลสโคป เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยออสซิลโลแกรมรูปแรกของการทดสอบ เป็นภาพการเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดัน ให้อยู่ในช่วงที่มาตรฐานยอมรับ โดยการใช้สเกลทางเวลาเป็น 1  $\mu\text{sec}$  เพื่อตรวจวัดหน้าคลื่นและ 10  $\mu\text{sec}$  เพื่อตรวจวัดหลังคลื่น สำหรับออสซิลโลแกรมลำดับขั้นตอนการทดสอบนั้น ปกติจะเป็นการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสในเวลาเดียวกัน โดยที่รูปบนจะเป็นแรงดันบันทึกด้วยสเกลทางเวลา 10  $\mu\text{sec}$  เพื่อสามารถใช้ตรวจความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรระหว่างขดลวด และรูปล่างเป็นกระแสบันทึกด้วยสเกลทางเวลาเป็น 25  $\mu\text{sec}$  และ 50  $\mu\text{sec}$  ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาที่มีค่ากระแสสูงสุดเนื่องจากการตรวจสอบความผิดปกติของหม้อแปลงที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จำเป็นต้องตรวจสอบในบริเวณที่กระแสมีค่าสูงสุด

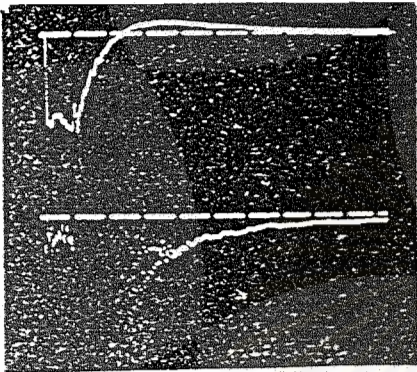
## 2.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL เพื่อวินิจฉัยว่าหม้อแปลงมีคุณภาพได้เกณฑ์ตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ จะอาศัยพิจารณาจากออสซิลโลแกรมของแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดสอบขณะป้อนแรงดันอิมพัลส์ โดยการเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันและกระแสรหว่างรูปคลื่นที่ได้จากแรงดันทดสอบลดระดับประมาณ 50-75% (RW) กับรูปคลื่นที่ได้จากแรงดันทดสอบที่กำหนด 100% (FW) กล่าวคือ เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสกับรูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นแรงดันกับรูปคลื่นแรงดัน โดยมีเกณฑ์ว่ารูปคลื่นจะต้องเหมือนกันทุกประการ ไม่มีข้อแตกต่างกันแม้แต่จุดเล็ก ๆ ในกรณีที่มีจุดสังเกตที่ผิดปกติ หรือมีความแตกต่างเกิดขึ้นนั้นคือมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าหม้อแปลงไม่สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตามที่มาตรฐานกำหนดได้ โดยที่การวินิจฉัยตัดสินการทดสอบลักษณะนี้ต้องอาศัยทักษะและประสบการณ์สูงเป็นพิเศษ เพราะความแตกต่างนั้นอาจเนื่องมาจากสิ่งรบกวนต่าง ๆ ได้มากมายหลายประการซึ่งต้องตรวจสอบให้แน่ชัด

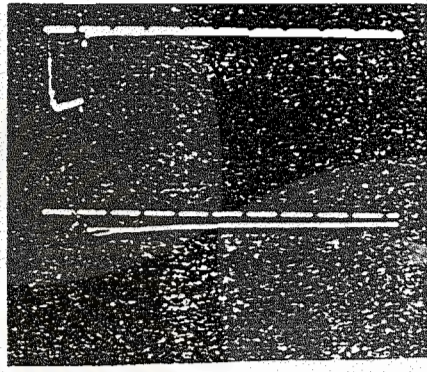
### 2.5.1 การเปรียบเทียบภาพถ่ายแรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็ม

ออสซิลโลแกรมของรูปคลื่นแรงดันทดสอบ มักจะไม่ค่อยมีความไวต่อการตรวจจับความผิดพร่อง ฉะนั้นการตรวจจับโดยดูจากรูปคลื่นแรงดันคลาดเคลื่อนไปจะใช้ได้สำหรับกรณีที่ผิดพร่องในฉนวนสำคัญและค่อนข้างมาก เช่นกรณีของความผิดพร่องลงดินในฉนวนสำคัญที่ใกล้ขั้วขดลวดที่ป้อนแรงดัน จะทำให้เกิดการหักหรือคลื่นตัดอย่างกระทันหันดังเช่น รูปที่

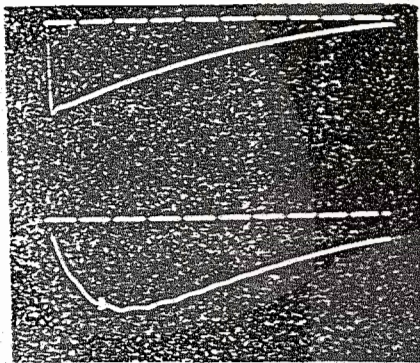
2.14 ข) เกิดการเสียดสภาพฉับพลันที่ปลอกถนนนำสายลงดิน หรือกรณีที่มีการเกิดวาบไฟตามผิวข้ามขดลวดหรือลัดวงจรบางส่วน จะทำให้อิมพีแดนซ์ของขดลวดลดลง เป็นผลให้เวลาช่วงทางคลื่นสั้นลง กระแสจะเพิ่มมากขึ้นดังเช่นในรูปที่ 2.14 ง) เป็นต้น



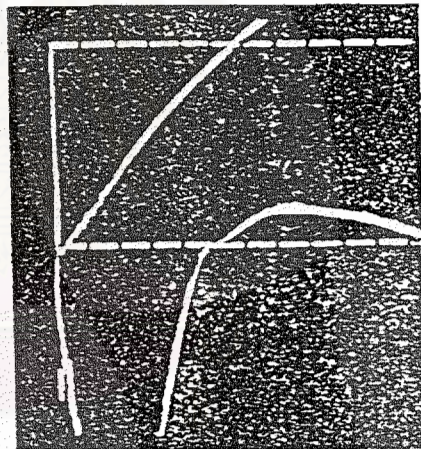
ก) เกิดการเสียดสภาพฉับพลันที่ขั้วภายนอกหม้อแปลง



ข) เกิดการเสียดสภาพฉับพลันที่ปลอกถนนนำสายลงดิน



ค) เกิดการคายประจุบางส่วนบริเวณสายนำภายในหม้อแปลง



ง) เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดภายในหม้อแปลง

รูป 2.14 ภาพตัวอย่างรูปคลื่นที่ไม่สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าได้

### 2.5.2 การเปรียบเทียบภาพถ่ายกระแส (แรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็ม)

ออสซิลโลแกรมรูปคลื่นกระแสจะมีความไวมากที่สุด สำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง อย่างไรก็ตามความไวในการตรวจจับนี้ก็ไวต่อสิ่งรบกวน จึงต้องใช้ความละเอียดในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสจะเป็นสิ่งชี้บอกถึงการเกิดเสียดสภาพฉนวนของขดลวด และลักษณะของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจใช้เป็นสิ่งชี้แนะถึงชนิดและตำแหน่งของการเกิดความผิดปกติ

### บทที่ 3

#### การวัดและบันทึกผลการทดสอบ BIL ด้วยระบบดิจิทัล

ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL ด้วยระบบดิจิทัล ทางภาควงจรทดสอบและลำดับขั้นตอนการทดสอบจะเหมือนกับระบบวิเคราะห์ผลแบบแอนะล็อก เพียงแต่แตกต่างกันในเรื่องการจัดการสัญญาณทางภาคแรงต่ำ โดยที่ระบบดิจิทัลเริ่มจากตำแหน่งปลายสายเคเบิลที่นำสัญญาณมาจากโวลเตจดีไวเซอร์ และขั้นตอนความต้านทาน ผ่านอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณให้มีขนาดเล็กลง เพื่อป้อนให้กับดิจิทัลออสซิลโลสโคปทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิต สัญญาณที่ได้จะส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่านระบบการเชื่อมโยงแบบขนาน GPIB

การส่งผ่านข้อมูลสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ภายในห้องปฏิบัติการ มีทั้งระบบการส่งผ่านสัญญาณแบบแอนะล็อกและแบบดิจิทัล ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้นั้นมีส่วนของวงจรที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแบบแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณแบบดิจิทัลหรือไม่ โดยทั่วไปเทคนิคการส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลจะเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณ แล้วจึงส่งผ่านทางสายนำสัญญาณไปยังอุปกรณ์ที่ต้องการเช่น เครื่องพิมพ์ หรือเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

เทคนิคการส่งสัญญาณทางดิจิทัลโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1) ระบบรับและส่งสัญญาณแบบขนาน (Parallel input/output) ในเทคนิคการรับและส่งสัญญาณแบบขนาน จะทำการส่งผ่านหรือรับจำนวนข้อมูลหลาย ๆ บิตในเวลาเดียวกัน ซึ่งอาจจะเป็นแบบ 8 หรือ 16 บิต และเพื่อที่จะส่งข้อมูลจำนวนดังกล่าวได้ จึงจำเป็นต้องมีสายสัญญาณจำนวนมากพอกับจำนวนบิตที่จะส่งผ่านสัญญาณ ต่อเชื่อมระหว่างอุปกรณ์ที่ต้องการใช้ร่วมกันเช่น ระบบ IEEE-488

2) ระบบรับและส่งสัญญาณแบบอนุกรม (Serial input/output) ในเทคนิคการรับและส่งสัญญาณแบบอนุกรม ข้อมูลทีละบิตจะส่งหรือรับผ่านสายนำสัญญาณต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นสายที่ใช้ในการนำสัญญาณจึงสามารถใช้สายเพียงเส้นเดียวต่อเชื่อมระหว่างอุปกรณ์ที่ต้องการใช้งานร่วมกันเช่น ระบบ RS-232C , หรือ RS-422

### 3.1 ระบบการรับและส่งสัญญาณโดยใช้ IEEE-488 (GPIB)

วิธีที่นิยมที่สุดวิธีหนึ่งสำหรับเทคนิคการส่งผ่านข้อมูลที่ต้องการความเร็วสูง ภายในห้องปฏิบัติการคือ การใช้ระบบเชื่อมโยงแบบขนาน ซึ่งในระบบนี้บริษัท Hewlett-Packard เป็นผู้เริ่มคิดขึ้นเพื่อใช้กับอุปกรณ์ของทางบริษัท และได้รับการยอมรับจากสถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (IEEE) ดังมีมาตรฐานกำหนดออกมาในปี ค.ศ. 1975, 1978, และ 1987 โดยจะเรียกชื่อระบบดังกล่าวว่า IEEE-488 นอกจากนี้ยังมีการอ้างชื่อเป็นอย่างอื่นอีกเช่น HP-IB (Hewlett-Packard Interface Bus) และ GPIB (General Purpose Interface Bus) และมาตรฐานสากลเช่น มาตรฐาน IEC ได้ออกมาตรฐานรับรองในฉบับเลขที่ IEC Publ.625

ข้อดีของระบบมาตรฐาน GPIB คือ มีข้อบังคับที่เข้มงวดทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะผลิตจากที่ใดจะสามารถนำมาต่อเชื่อมโยงกันได้ทั้งหมด ซึ่งแตกต่างจากระบบอนุกรม RS-232C ที่มีปัญหาในการต่อเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์ ในระบบ GPIB ยังยอมให้สามารถต่อพ่วงอุปกรณ์ได้มากกว่า 1 อุปกรณ์เข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำการควบคุม ทำให้ราคาของระบบโดยรวมถูกลง นอกจากนี้ในระบบดังกล่าวยังมีหัวต่อเพียงแบบเดียวทำให้การต่อเชื่อมระหว่างอุปกรณ์จึงไม่มีปัญหาเรื่องหัวต่อผิดทาง และสุดท้ายความเร็วในระบบควบคุม โดยที่ในระบบนี้จะสามารถส่งผ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็ว 1 เมกะไบต์ต่อวินาที ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์และสายนำสัญญาณที่นำมาใช้

ข้อเสียของระบบมาตรฐาน GPIB คือ ในอุปกรณ์ที่มีการติดตั้งระบบดังกล่าวจะมีราคาที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงมักจะไม่มีพบในอุปกรณ์ดิจิทัลที่มีราคาต่ำ ความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีอัตราสูงนั้นบางครั้งจะไม่จำเป็นในอุปกรณ์ที่มีฟังก์ชันการทำงานง่ายๆ เช่น มิเตอร์วัดแรงดันแบบดิจิทัล

ข้อกำหนดที่สำคัญของการใช้อุปกรณ์มาตรฐาน IEEE-488 มีดังนี้

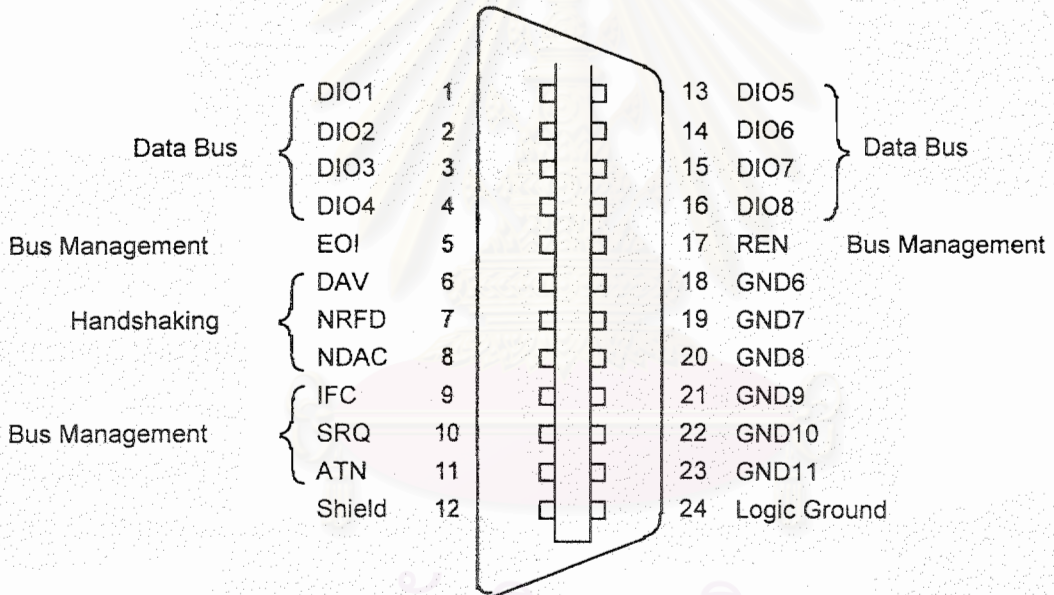
- 1) สามารถนำอุปกรณ์มาต่อพ่วงภายในระบบเดียวได้จำนวนมากถึง 15 อุปกรณ์
- 2) ความยาวของสายนำสัญญาณทั้งหมดที่ใช้ในการต่อพ่วงอุปกรณ์จะต้องน้อยกว่า 20 เมตร (ถ้าไม่มีหน่วยความจำสำรอง (buffer) เพิ่มเติม) และความยาวของสายนำสัญญาณระหว่างอุปกรณ์แต่ละตัวจะมีความยาวเพียง 2 เมตร
- 3) จำนวนของสายไฟในเคเบิลหนึ่งเส้นจะมีจำนวนทั้งสิ้น 24 สาย ซึ่งมีฟังก์ชัน

การทำงานที่กำหนดไว้แน่นอนดังนี้

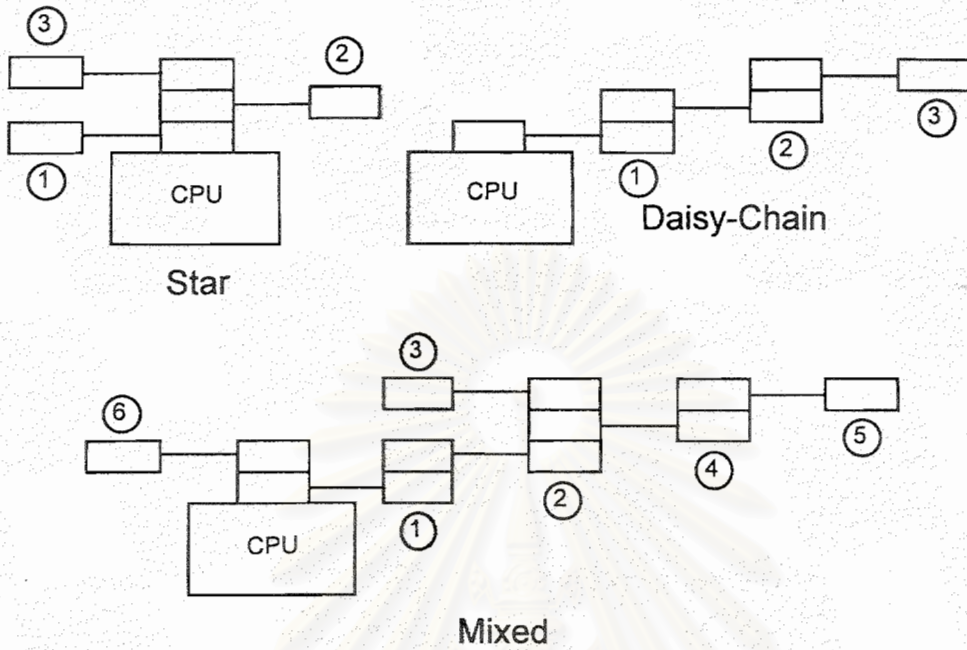
- จำนวนสายไฟที่ใช้ในการส่งถ่ายข้อมูล 8 บิตมีจำนวน 8 เส้น
- จำนวนสายไฟที่ใช้ในการควบคุมการส่งถ่ายข้อมูลจำนวน 8 เส้น
- จำนวนสายไฟที่ใช้สำหรับกราวด์ และชิลด์ จำนวน 8 เส้น

โดยสามารถดูตำแหน่งของสายไฟแต่ละเส้น ที่ตำแหน่งเต้ารับ ตัวเมียของระบบมาตรฐาน GPIB ได้ดังรูปที่ 3.1 จำนวนสายไฟ 16 เส้นของสายข้อมูลและสายควบคุมจะรวมและเรียกชื่อเป็น บัส (bus) ของระบบมาตรฐาน GPIB

- 4) อุปกรณ์ที่ใช้สามารถจัดวางได้ตามความสะดวกของผู้ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2
- 5) อัตราการส่งข้อมูลสูงสุดคือ 1 เมกะไบต์/วินาที



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งของสายไฟแต่ละเส้นที่ตำแหน่งเต้ารับตัวเมียของระบบมาตรฐาน GPIB



1,2,3,4,5 และ 6 หมายถึงอุปกรณ์ดิจิทัลต่าง ๆ ที่ต่ออยู่บนระบบมาตรฐาน GPIB

รูปที่ 3.2 การจัดวางอุปกรณ์ในระบบ GPIB

### 3.2 หลักการทำงานของระบบมาตรฐาน GPIB

เนื่องจากระบบมาตรฐาน IEEE-488 สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ได้หลายอุปกรณ์บนระบบเครือข่ายเดียวกัน การควบคุมระบบการทำงานของอุปกรณ์เหล่านั้นจึงกลายเป็นสิ่งที่จำเป็น เปรียบเสมือนความสามารถในการจัดระบบจราจร ให้อุปกรณ์ส่งข้อมูลและรับข้อมูลซึ่งกันและกัน ดังนั้นในระบบมาตรฐาน IEEE-488 จึงจำเป็นต้องมีตัวควบคุมที่เรียกว่าผู้ควบคุม อยู่เพียงตัวเดียว ตลอดเวลาซึ่งก็คือเครื่องคอมพิวเตอร์นั่นเอง ผู้ควบคุมนี้จะทำการจัดวางการทำงานทั้งหมดของ อุปกรณ์ต่าง ๆ บนระบบโดยการจัดลำดับการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับผู้ควบคุม

ในมาตรฐานยังกำหนดว่าในการส่งถ่ายข้อมูลกันนั้น จะทำได้เพียงอุปกรณ์เดียวเท่านั้น ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ๆ เพื่อป้องกันปัญหาการรบกวนทางข้อมูลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จัดส่งพร้อมกันในเวลาหนึ่ง อุปกรณ์ที่ส่งข้อมูลตามมาตรฐานจะเรียกว่า ผู้พูด ฟังก์ชันการทำงานของผู้ควบคุม จะสามารถสั่งให้อุปกรณ์ใดก็ได้เพียงอุปกรณ์เดียวในระบบเป็นผู้พูด และบางครั้งผู้ควบคุมเอง สามารถที่จะเป็นผู้พูดได้เหมือนกัน ในทำนองเดียวกันในมาตรฐานยังได้กำหนดให้อุปกรณ์ใด ๆ หรือทั้งหมดที่ต่ออยู่บนระบบเดียวกัน (รวมทั้งผู้ควบคุม) เป็นตัวรับข้อมูลหรือที่เรียกว่าผู้ฟัง



ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะมีอุปกรณ์หลายตัวที่สามารถรับคำสั่งหรือข้อมูลในเวลาเดียวกัน และอุปกรณ์ที่จะเป็นผู้ฟังได้นั้น ผู้ควบคุมจะเป็นผู้สั่งโดยใช้ฟังก์ชันคำสั่งของระบบ

ผู้ควบคุมจะทำการกำหนดที่อยู่ของแต่ละอุปกรณ์ หรือแม้แต่บางครั้งอาจจะกำหนดให้กับส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์เดียวกัน โดยกำหนดตำแหน่งที่อยู่เป็นเฉพาะก็ได้ ซึ่งจะมีที่อยู่เป็นหมายเลขตั้งแต่ 0 จนถึง 31 โดยที่อยู่เหล่านี้สามารถเปลี่ยนได้ด้วยสวิตช์ตัวเลือกที่อยู่ของอุปกรณ์นั้น ๆ

ตัวอย่างการทำงานของระบบ GPIB กับเครื่องออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล (DSO) โดยการสมมุติให้ DSO มีที่อยู่เป็น 7 และผู้ใช้ต้องเสียบการ์ด GPIB ลงในสล็อตที่ว่างของเครื่องคอมพิวเตอร์และใช้สายเคเบิล GPIB สำเร็จรูป ต่อเชื่อมระหว่างคอมพิวเตอร์กับ DSO จากนั้นจึงใช้โปรแกรมทำการควบคุมการทำงานโดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดให้ตัวคอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุม (ตำแหน่งที่อยู่จะเป็น 0 เสมอ)
- 2) ผู้ควบคุมส่งคำสั่งไปที่ DSO เพื่อบอกให้เป็นผู้ฟัง
- 3) ผู้ควบคุมสั่งตัวเองให้เป็นผู้พูด และส่งคำสั่งไปที่ DSO เพื่อสั่งให้เตรียมพร้อมที่จะทำงานในการรับข้อมูลสัญญาณที่ต้องการวัด
- 4) ผู้ควบคุมส่งคำสั่งไปที่ DSO เพื่อจะเริ่มอ่านข้อมูล
- 5) ผู้ควบคุมสั่งให้ DSO เป็นผู้พูดและตัวเองเป็นผู้ฟัง
- 6) ผู้ควบคุมจะรอรับข้อมูลที่ส่งมาจาก DSO
- 7) เก็บข้อมูล

การทำระบบควบคุมดังกล่าวเป็นไปได้ที่จะส่งคำสั่งจากผู้ควบคุมไปยังอุปกรณ์ DSO ที่มากกว่า 1 เครื่องเพื่อให้พร้อมที่จะบันทึกสัญญาณ แต่อย่างไรก็ตามจะมีผู้พูดเพียงอุปกรณ์เดียวเท่านั้นในเวลาหนึ่ง ๆ ดังนั้นจึงต้องมีสายสัญญาณควบคุมหนึ่งสายที่จะรายงานให้ผู้ควบคุมทราบเมื่อเครื่อง DSO เครื่องใดเครื่องหนึ่งพร้อมที่จะส่งข้อมูล สายสัญญาณเส้นนี้ในมาตรฐาน GPIB เรียกว่า service request (SRQ) ซึ่งเป็นหนึ่งใน 16 สายสัญญาณ สัญญาณ service request นี้จะส่งมาจาก DSO ที่พร้อมจะส่งข้อมูลให้กับผู้ควบคุมทราบ เพื่อให้ผู้ควบคุมทำการสั่งให้เครื่อง DSO ดังกล่าวเป็นผู้พูด และเครื่องคอมพิวเตอร์จะเป็นผู้ฟัง จากนั้นข้อมูลที่เก็บไว้ใน DSO จะส่งมายังคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป และจะมีสายนำสัญญาณอีกเส้นที่ทำหน้าที่บอกผู้ควบคุม

คุมเมื่อ DSO ได้ส่งข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยสายนำสัญญาณดังกล่าวเรียกว่า end of identify (EOI) ซึ่งจะส่งสัญญาณมาที่ผู้ควบคุมพร้อมกับชุดข้อมูลสุดท้าย

### 3.3 การใช้งานซอฟต์แวร์บนระบบมาตรฐาน GPIB

ตามมาตรฐานระบบ GPIB เพื่อให้การควบคุมโดยการพัฒนาซอฟต์แวร์ด้วยภาษาสูงที่ใช้เช่น Qbasic, C, หรือ Pascal สามารถทำได้ด้วยวิธีที่ง่ายจึงจำเป็นต้องสร้างโปรแกรมโดยการใช้งานร่วมกันระหว่าง ตัวขับอุปกรณ์ (device driver) และไฟล์ควบคุมตามภาษาสูงที่ใช้ ไฟล์ที่ใช้เป็นตัวขับอุปกรณ์จำเป็นต้องเรียกเก็บในหน่วยความจำในขณะเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ ก่อนที่จะมีการใช้งานและจะค้างอยู่ในหน่วยความจำจนกระทั่งปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ ในกรณีนี้ตัวขับอุปกรณ์จะมีชื่อว่า GPIB216.COM และจากที่ไฟล์ตัวขับอุปกรณ์นี้จำเป็นต้องอยู่ในหน่วยความจำจึงต้องใส่ไฟล์นี้ลงใน CONFIG.SYS ซึ่งเป็นไฟล์ที่ใช้ในตอนเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อกำหนดหรือแจ้งให้กับหน่วยประมวลผล CPU ทราบว่ามีอุปกรณ์อะไรบ้างที่ต่ออยู่ในระบบการทำงาน โดยที่ประโยคคำสั่งนี้สามารถเขียนได้ดังนี้

```
Device = \GPIB-AT\GPIB216.COM
```

โดยที่สมมุติว่าไฟล์ GPIB216.COM เก็บอยู่ในรากย่อย (subdirectory) ของ GPIB-AT เนื่องจากไฟล์ตัวขับอุปกรณ์นี้นามสกุลของไฟล์เป็น .COM ซึ่งหมายถึงว่า ไฟล์ดังกล่าวสามารถทำงานได้บนระบบการทำงานของคอมพิวเตอร์ (DOS) แต่เนื่องจากว่าเมื่อเรียกไฟล์ดังกล่าวบน DOS แล้วระบบการทำงานจะไม่สามารถทำงานต่อได้ และจำเป็นต้องทำการบูต (boot) เครื่องใหม่ ดังนั้นจึงควรจะทำกรเปลี่ยนนามสกุลของไฟล์ตัวขับอุปกรณ์ GPIB216.COM ให้เป็นนามสกุลใหม่คือ GPIB216.SYS ซึ่งจะทำให้คำสั่งในไฟล์ CONFIG.SYS เปลี่ยนไปดังนี้

```
DEVICE = \GPIB-AT\GPIB216.SYS
```

### 3.4 การเขียนโปรแกรมควบคุมระบบการทำงาน GPIB ในงานวิจัย

การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบ GPIB ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ภาษา C ซึ่งเป็นภาษาที่นิยมในการเขียนโปรแกรมที่มีฟังก์ชันการทำงานที่ต้องการความเร็วสูง และในซอฟต์แวร์ที่ทางบริษัทผู้ผลิตการ์ด GPIB จำหน่ายมีโปรแกรม Driver สำหรับภาษา C ให้ด้วย ทำให้การพัฒนาโปรแกรมสามารถทำได้โดยไม่ต้องไปเขียนภาษาเครื่อง เพื่อควบคุมการทำงานของระบบ GPIB

โครงสร้างของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบ GPIB นั้นประกอบด้วยชุดคำสั่งที่จะต้องทำงานตามลำดับดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการควบคุม DSO เพื่อทำการกำหนดค่าตั้งต้นสำหรับการรื้อข้อมูลแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดสอบ BIL โดยแยกการควบคุมออกเป็น 2 ระบบกล่าวคือ ระบบแรกจะทำการรับข้อมูลของแรงดันเพื่อทำการตรวจสอบลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน และระบบที่สองจะทำการรับข้อมูลของการทดสอบ เพื่อทำการเก็บข้อมูลของแรงดันและกระแส

ลำดับขั้นการทำงานของโปรแกรมระบบควบคุมสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) จัดสถานะเริ่มต้นของระบบ
- 2) กำหนดข้อมูลที่ตกค้างบนอุปกรณ์ DSO
- 3) กำหนดหน้าที่การทำงานให้กับอุปกรณ์ DSO เพื่อที่จะทำการติดต่อด้วยในเรื่องการตั้งค่าต่าง ๆ บนหน้าจอภาพของ DSO เช่น ขนาดของแรงดันต่อช่อง ช่วงเวลา ตลอดจนตำแหน่งและขนาดของสัญญาณที่จะทำให้ DSO เริ่มต้นเก็บข้อมูล เป็นต้น
- 4) ให้สัญญาณเพื่อให้อุปกรณ์ DSO พร้อมที่จะรับข้อมูล (triggering)
- 5) ทำการอ่านข้อมูลที่เก็บได้จากอุปกรณ์ DSO
- 6) วิเคราะห์และแสดงผลให้กับรูปคลื่นที่อ่านได้ เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากคิจิตอล ออสซิลโลสโคปเป็นข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องเหมือนแบบแอนะล็อก และมีการเข้ารหัสสัญญาณทางคิจิตอลซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นวิธีการในการวิเคราะห์ผลจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการประมาณเชิงเส้น ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในเทคนิคการประมาณเชิงเส้นในบทที่ 4 ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### เทคนิคการประมาณเชิงเส้น และการหาค่า องค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดัน

#### 4.1 การประมาณเชิงเส้นสมการของข้อมูลที่วัดได้

เนื่องจากจุดข้อมูลที่ได้จากระบบวิเคราะห์ผลแบบดิจิทัล เป็นจุดที่ไม่มีความต่อเนื่อง และมีค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเข้ารหัสข้อมูลทางดิจิทัล รวมทั้งลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการทดสอบ BIL ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะมีการออสซิลเลชันเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นในการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันเพื่อหาค่าเวลาน้ำคลื่น  $T_1$  และค่าเวลาหางคลื่น  $T_2$  ตามที่มาตรฐานสากลกำหนด จึงต้องทำการประมาณลักษณะรูปคลื่นที่ไม่มีการออสซิลเลชันก่อนที่จะทำการวัดเวลาน้ำคลื่นและหางคลื่น

การประมาณฟังก์ชันให้กับจุดข้อมูลอาจทำได้ โดยการพิจารณาฟังก์ชันของจำนวนตัวแปรอิสระน้อย ๆ และพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าเบี่ยงเบนของฟังก์ชันจากจุดข้อมูลให้น้อยที่สุด การลดการเบี่ยงเบนสามารถทำได้โดยการใช้วิธีการที่สองน้อยที่สุด (least square method) ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้สำหรับค่าตัวแปรอิสระตัวแปรเดียวก็คือ การถดถอยเชิงเส้น

##### 4.1.1 การถดถอยเชิงเส้น (line regression)

การวิเคราะห์หาสมการเชิงเส้นของ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือการเก็บรวบรวมข้อมูลที่มีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวอาจหาได้จากวิธีที่เรียกว่า เส้นกราฟถดถอย (regression line) ตัวอย่างเช่นถ้าต้องการหาฟังก์ชันเชิงเส้น เพื่อประมาณฟังก์ชันของข้อมูลตามตารางที่ 4.1 (ดูรูปที่ 4.1 ประกอบ) ให้มีการเบี่ยงเบนน้อยที่สุดอาจทำได้ดังนี้ เนื่องจากฟังก์ชันเชิงเส้นสามารถแสดงได้ในรูปแบบของ

$$g(x) = a + bx \quad (4.1)$$

โดยที่  $a$  และ  $b$  เป็นค่าคงที่ ค่าการเบี่ยงเบนของฟังก์ชันเชิงเส้นประมาณที่ได้จากจุดข้อมูลแต่ละจุดสามารถหาได้ดังนี้

$$r_i = y_i - g(x_i) = y_i - (a + bx_i) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (4.2)$$

โดยที่  $L$  เป็นจำนวนทั้งหมดของจุดข้อมูล

ค่ากำลังสองทั้งหมดของการเบี่ยงเบนสามารถหาได้จาก [17]

$$R = \sum_{i=1}^L (r_i)^2 = \sum_{i=1}^L (y_i - a - bx_i)^2 \quad (4.3)$$

เพื่อที่จะหาค่า  $R$  น้อยที่สุด จะต้องทำการหาค่าอนุพันธ์บางส่วนของ  $R$  เทียบกับค่า  $a$  และ  $b$  และให้มีค่าเท่ากับ 0

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial a} &= -2 \sum_{i=1}^L (y_i - a - bx_i) = 0 \\ \frac{\partial R}{\partial b} &= -2 \sum_{i=1}^L x_i (y_i - a - bx_i) = 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

ซึ่งอาจเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้หลังจากหารด้วย -2 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } A_{11} &= L & A_{12} &= \sum x_i & Z_1 &= \sum y_i \\ A_{21} &= \sum x_i & A_{22} &= \sum (x_i)^2 & Z_2 &= \sum x_i y_i \end{aligned}$$

ดังนั้นคำตอบของสมการที่ 4.5 สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} a &= \frac{A_{22}Z_1 - A_{12}Z_2}{d} \\ b &= \frac{A_{11}Z_2 - A_{21}Z_1}{d} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\text{โดยที่ } d = A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}$$

#### 4.1.2 การประมาณเส้นสมการของข้อมูลที่เป็นฟังก์ชัน ไม่เชิงเส้น

วิธีการถดถอยเชิงเส้นสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการประมาณฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของชุดข้อมูลในบางกรณีได้ ถ้าเราพิจารณาการประมาณในรูปแบบของตัวแปรยกกำลังดังต่อไปนี้

$$y = g(x) = Cx^b \quad (4.7)$$

โดยที่ข้อมูลที่ได้อยู่ในรูปของตัวแปร  $(x_i, y_i)$  ซึ่งมีค่า  $C$  และ  $b$  เป็นค่าคงที่ที่ต้องการหา และจากสมการที่ 4.7 ถ้าต้องการหาค่า  $C$  และ  $b$  จะต้องทำการแก้สมการโดยใช้หลักการของฟังก์ชันลอการิทึม ซึ่งจะได้

$$\log(y) = \log(C) + b \log(x) \quad (4.8)$$

ถ้ากำหนดให้

$$Y = \log(y), \quad X = \log(x), \quad a = \log(C) \quad (4.9)$$

ทำให้สมการ 4.8 สามารถลดรูปเหลือเป็น

$$Y = a + bX \quad (4.10)$$

ซึ่งเห็นได้ว่าสมการที่ 4.10 เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น โดยการเปลี่ยนรูปของข้อมูลที่ได้ให้อยู่ในรูปของ  $\log(x_i)$  และ  $\log(y_i)$  จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่า  $a$  และ  $b$  ตามวิธีการที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.1.1 ต่อไป

#### 4.2 ฟังก์ชันของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่สร้างได้จาก วงจรทรานเซียนต์ RC ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 รูปที่ 2-6 ก) และสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันทางเวลาจะได้ว่า [18]

$$U(t) = \frac{U_0}{K} \cdot \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot \left\{ e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t} \right\} \quad (4.11)$$

หรือ

$$U(t) = A \cdot \left\{ e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t} \right\} \quad (4.12)$$

โดยที่

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{B_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{B_1}{2}\right)^2 - B_0} \quad (4.13)$$

เมื่อ

$$B_0 = \frac{1}{R_d R_e C_b C_s}$$

$$B_1 = \frac{R_d C_s + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_b C_s} \quad (4.14)$$

และ  $A$  คือค่าคงที่มีค่าเท่ากับ  $\frac{U_0}{K} \cdot \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)}$

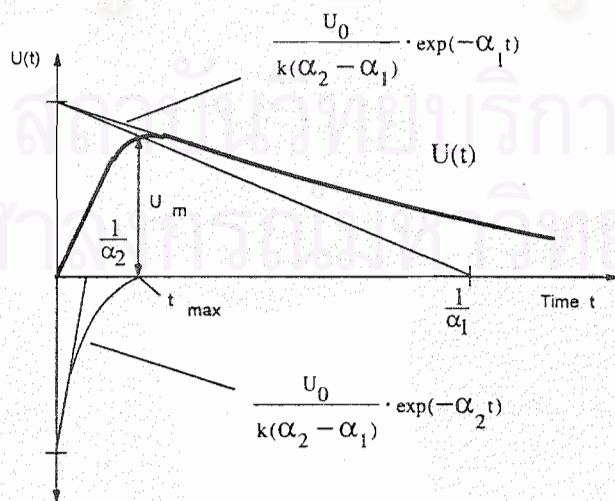
สมการของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นั้นจะแปรตามเวลาและมีค่าคงตัวทางเวลาอยู่ 2 ตัว คือ ค่า  $\alpha_1$  และค่า  $\alpha_2$  โดยค่าคงที่ทางเวลา  $\alpha_2$  จะมีผลต่อเวลาช่วงหน้าคลื่น ( $T_1$ ) และค่าคงที่ทางเวลา  $\alpha_1$  จะมีผลต่อเวลาช่วงหางคลื่น ( $T_2$ ) ตามสมการ 4.15 หรือแสดงดังในรูปที่ 4.2

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{k_2}{\alpha_2} \\ T_2 &= \frac{k_1}{\alpha_1} \end{aligned} \quad (4.15)$$

เมื่อค่าคงที่  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  สามารถกำหนดได้สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ใด ๆ ในกรณีของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าค่า  $1.2/50 \mu\text{sec}$  จะมีค่าคงที่ดังกล่าวเป็นดังนี้ [2]

$$\begin{aligned} k_1 &= 0.73 & k_2 &= 2.96 \\ \alpha_1 &= 14.6 \text{ nsec}^{-1} & \alpha_2 &= 2470 \text{ nsec}^{-1} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าค่าคงตัวทางเวลา  $\alpha_1$  และค่า  $\alpha_2$  นั้นมีค่าแตกต่างกันมากประมาณ 169 เท่าทำให้อิทธิพลของค่าคงที่ทางเวลาช่วงหน้าคลื่น  $\alpha_2$  ไม่มีผลกระทบต่อค่าแรงดันในช่วงหางคลื่นที่เวลาค่ามาก ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ดังนั้นการประมาณเส้นสมการแรงดันอิมพัลส์จึงสามารถทำการแยกการประมาณได้ โดยแบ่งออกเป็นการประมาณเชิงเส้นทางด้านหางคลื่นและทางด้านหน้าคลื่น



รูปที่ 4.1 เส้นกราฟแรงดันอิมพัลส์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา

#### 4.2.1 การประมาณเส้นสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับช่วงเวลาทางคลื่น

จากรูปที่ 4.2 สมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในช่วงเวลาทางคลื่นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U_1(t) = A_1 \cdot e^{-\alpha_1 t} \quad (4.16)$$

และจากสมการที่ 4.16 เพื่อหาค่าคงที่  $A_1$  และ  $\alpha_1$  สามารถหาได้โดยใช้ฟังก์ชันลอการิทึมจะได้ว่า

$$\log[u_1(t)] = \log A_1 + \text{Log}(e^{-\alpha_1 t}) \quad (4.17)$$

ซึ่งสามารถนำไปทำการประมาณเชิงเส้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1

#### 4.2.2 การประมาณเส้นสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับช่วงเวลาหน้าคลื่น

หลังจากที่ได้ข้อมูลของเส้นสมการแรงดันอิมพัลส์ ฟ้าผ่าทางด้านทางคลื่นตามข้อ 4.2.1 และจากสมการที่ 4.2 จะทำให้สามารถคำนวณหาข้อมูลเพื่อทำการประมาณช่วงเวลาหน้าคลื่นได้ตามสมการที่ 4.18 ดังนี้

$$U_2(t) = A_1 \cdot e^{-\alpha_1 t} - U(t) \quad (4.18)$$

และจากสมการที่ 4.12 จะได้สมการประมาณของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทางด้านหน้าคลื่นเป็นดังนี้

$$U_2(t) = A_2 e^{-\alpha_2 t} \quad (4.19)$$

ทำการแก้ปัญหาคือหาค่าคงที่  $A_2$  และ  $\alpha_2$  โดยใช้ฟังก์ชันลอการิทึมซึ่งจะได้ว่า

$$\log[u_2(t)] = \log A_2 + \text{Log}(e^{-\alpha_2 t}) \quad (4.20)$$

จากสมการ 4.20 สามารถนำไปทำการประมาณเชิงเส้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1



#### 4.2.3 การประมาณเส้นสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

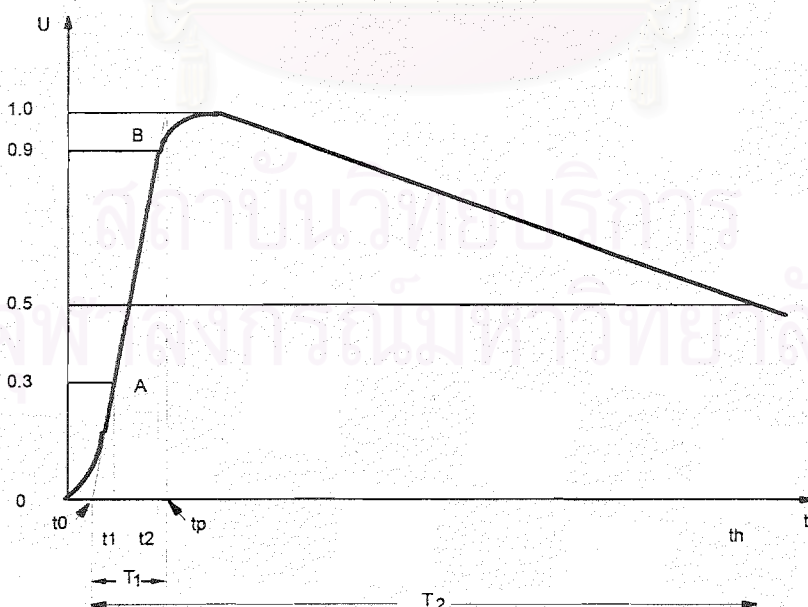
ผลของการแก้สมการ 4.17 และ 4.20 ด้วยวิธีการตามข้อ 4.1.1 แล้วจะทำให้ได้ค่าของตัวแปร  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  ซึ่งเป็นค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการแรงดันอิมพัลส์ และถ้านำค่าคงที่ เหล่านี้แทนค่าเพื่อหาเส้นสมการแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นลบประมาณซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$U(t) = A_1 \cdot e^{-\alpha_1 t} - A_2 \cdot e^{-\alpha_2 t} \quad (4.21)$$

จากเส้นกราฟประมาณของแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากสมการที่ 4.21 สามารถนำไปหาค่าเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นตามข้อกำหนดในมาตรฐานเช่นเดียวกับวิธีที่ใช้ในแบบแอนะล็อกดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.1 และรูปที่ 2.3

#### 4.2.4 การคำนวณค่าเวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ ) และหางคลื่น ( $T_2$ )

การหาค่าเวลา  $T_1$  และ  $T_2$  ตามที่มาตรฐานกำหนดให้หาจากเส้นที่ลากผ่านจุด 0.3, 0.5 และ 0.9 เท่าของค่าแรงดันสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $v_t[t_1(0.3 \cdot U_{\max})]$ ,  $v_t[t_2(0.5 \cdot U_{\max})]$ , และ  $v_t[t_3(0.9 \cdot U_{\max})]$  ตามลำดับแล้ว หลังจากนั้นจะต้องทำการหาสมการเส้นตรงเพื่อหาจุดเริ่มต้นที่ 0 และจุดที่ค่าแรงดันมีค่าเท่ากับค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ เพื่อหาค่าคงตัวทางเวลาดังสมการที่ 4.22 ถึง สมการที่ 4.25



รูปที่ 4.2 วิธีหาค่าเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.2 สามารถหาค่าเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นได้จาก

$$t_p = \frac{t_2 - t_1}{v_t[t_2] - v_t[t_1]} \cdot (\max v - v_t[t_1]) + t \quad (4.22)$$

$$t_0 = \frac{t_2 - t_1}{v_t[t_2] - v_t[t_1]} \cdot (0 - v_t[t_1]) + t \quad (4.23)$$

ค่าคงตัวทางเวลาหน้าคลื่นจึงสามารถหาได้จากสมการ

$$t_1 = t_p - t_0 \quad (4.24)$$

ค่าคงตัวทางเวลาสำหรับหางคลื่นสามารถหาได้จากสมการ

$$t_2 = t - t_0 \quad (4.25)$$

สำหรับค่าแรงดันพุ่งเกินนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$(\% \text{ แรงดันพุ่งเกิน}) = \frac{(\text{ค่ายอดแรงดันจริง} - \text{ค่ายอดแรงดันประมาณ})}{\text{ค่ายอดแรงดันประมาณ}} \times 100 \quad (4.26)$$

## บทที่ 5

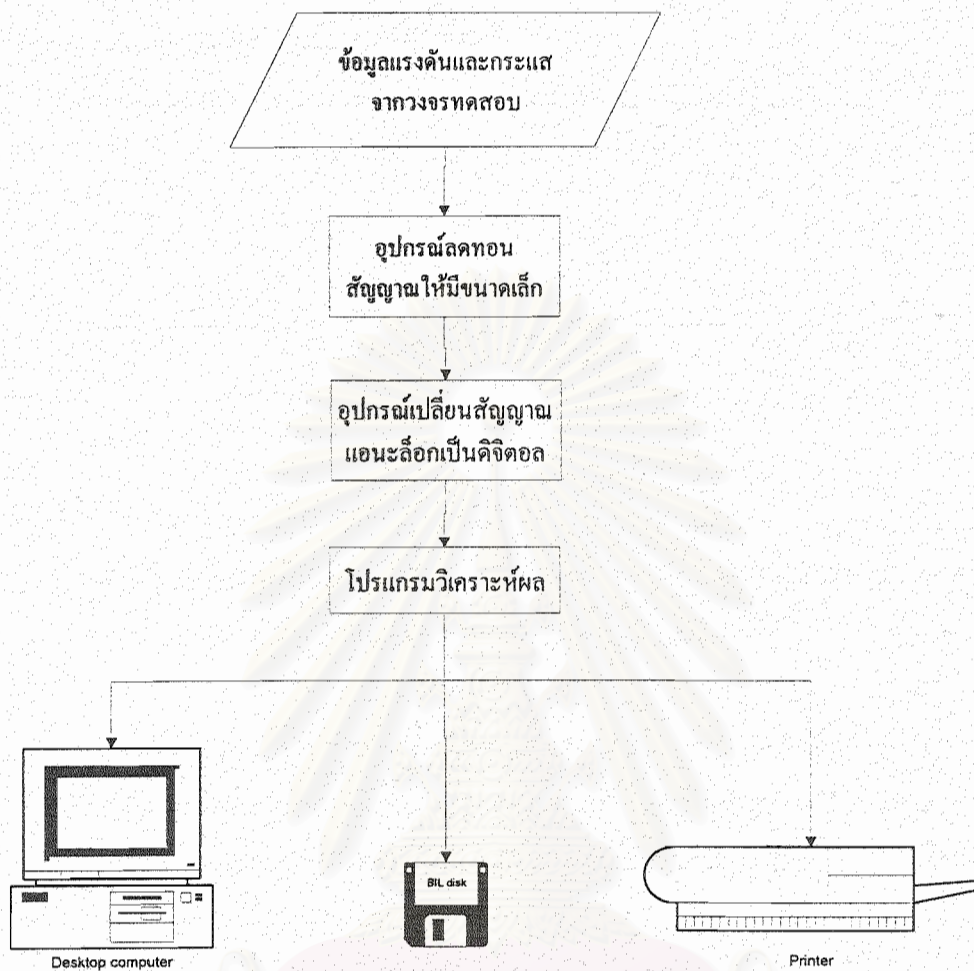
### การออกแบบระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL แบบดิจิทัล

เนื่องจากระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแบบดิจิทัล ต้องการข้อมูลที่อยู่ในรูปสัญญาณดิจิทัล ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้โปรแกรมทางด้านซอฟต์แวร์เพื่อหาค่าเวลาหน้าคลื่น เวลาหางคลื่น และค่าร้อยละของแรงดันพุ่งเกินต่าง ๆ แต่ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเองเป็นข้อมูลสัญญาณแอนะล็อก 2 สัญญาณ โดยสัญญาณแรกเป็นสัญญาณของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนให้กับหม้อแปลงที่ต้องการทดสอบ และสัญญาณที่สองเป็นสัญญาณของรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านขดลวดด้านที่กำลังทดสอบ ขนาดของสัญญาณทั้งสองจะมีขนาดแรงดันค่อนข้างสูง เพื่อป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นสัญญาณทั้งสองส่วนจะส่งผ่านสายนำสัญญาณมีชีลด์ (coaxial cable) มายังบริเวณห้องควบคุม

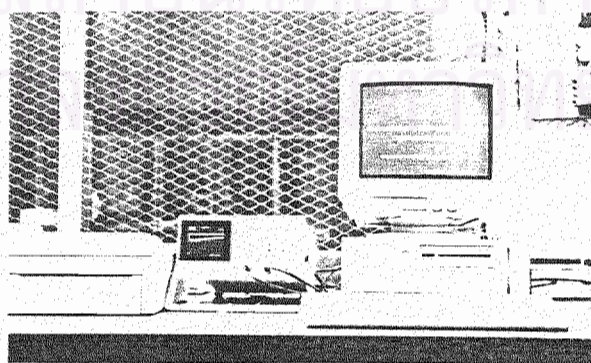
#### 5.1 ส่วนประกอบของระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL แบบดิจิทัล

ส่วนประกอบของระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL จะประกอบด้วย อุปกรณ์ลดทอนสัญญาณ ดิจิตอลออสซิลโลสโคปที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากแอนะล็อกให้เป็นดิจิทัล และชุดคอมพิวเตอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยประมวลผล และเครื่องพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และภาพถ่ายในรูปที่ 5.2

จากแผนภาพระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL ที่แสดงในรูปที่ 5.1 ผู้ทดสอบจะได้รับสัญญาณที่จะทำการวิเคราะห์จากวงจรทดสอบซึ่งปกติจะมีขนาดค่อนข้างสูง จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ลดทอนสัญญาณให้มีขนาดเล็กลง ในอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณจะประกอบด้วยส่วนของโวลเตจดิไวเดอร์สองวงจร รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อที่ 5.1 และสัญญาณจากอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณที่มีขนาดเล็กลง จะได้รับการแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกให้เป็นดิจิทัล โดยดิจิตอลออสซิลโลสโคปที่มีอัตราการสุ่มสัญญาณสูง (ประมาณมากกว่า 100 ล้านตัวอย่างในหนึ่งวินาที) เพื่อให้มีความผิดพลาดในการสุ่มสัญญาณต่ำ จึงเลือกใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปที่มีอัตราการสุ่มสัญญาณ 200 ล้านตัวอย่างในหนึ่งวินาที สัญญาณดิจิทัลที่ได้จะส่งผ่านไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการทำงานของระบบโดยใช้บัสเชื่อมโยงแบบขนาน GPIB ข้อมูลที่ได้จะได้รับการประมวลผล และนำเสนอแสดงผลผ่านทางจอภาพ เครื่องพิมพ์ หรือบันทึกไว้ในแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อใช้ในการอ้างอิงภายหลังได้



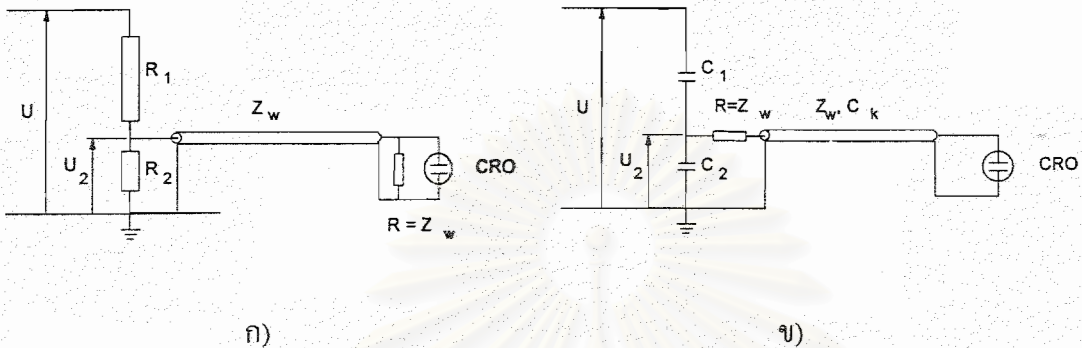
รูปที่ 5.1 แผนภาพโดยรวมของระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL  
สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายแสดงส่วนประกอบของระบบวิเคราะห์ผล  
การทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

## 5.2 การออกแบบส่วนของอุปกรณ์โวลเตจดีไวเดอร์

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.2.3 และรูปที่ 5.3 ดังแสดงข้างล่าง



รูปที่ 5.3 รูปแสดงลักษณะและการต่อโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน และแบบตัวเก็บประจุพร้อมด้วยความต้านทานแมทซิ่ง

ในกล่องอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณจะประกอบด้วยวงจร 2 ส่วน กล่าวคือ

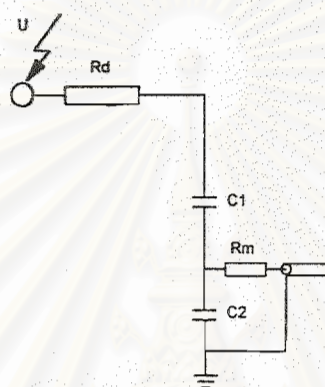
- 1) วงจรลดทอนขนาดของสัญญาณแรงดันที่ได้จากการทดสอบ
- 2) วงจรลดทอนขนาดของสัญญาณกระแสที่ได้จากการทดสอบ

### 5.2.1 การออกแบบโวลเตจดีไวเดอร์ของสัญญาณแรงดัน

เนื่องจากสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณของแรงดันที่มีความถี่ประมาณ 10 MHz จึงจำเป็นต้องใช้โวลเตจดีไวเดอร์เป็นแบบตัวเก็บประจุ และเพื่อให้อุปกรณ์วัดมีค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูง ป้องกันการวัดที่ผิดพลาด จึงให้ทำการออกแบบค่าอิมพีแดนซ์รวมทางภาคแรงสูงประมาณ 100 pF โดยการใชตัวเก็บประจุย่อยขนาด 1000 pF ซึ่งแต่ละตัวสามารถทนแรงดันกระแสตรงได้ 2000 โวลต์เป็นจำนวน 10 ตัว นำมาต่ออนุกรมกัน และมีค่าอิมพีแดนซ์รวมทางภาคแรงต่ำประมาณ 4 nF เพื่อให้อัตราส่วนการแบ่งแรงดันมีค่าประมาณ 40 (แรงดันสูงสุดทางภาคแรงสูงมีค่าเท่ากับ 1600 โวลต์และแรงดันสูงสุดทางภาคแรงต่ำมีค่าเท่ากับ 40 โวลต์) ดังแสดงเป็นวงจรได้ดังในรูปที่ 5.4

โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุนั้นจำเป็นต้องใส่ความต้านทานหน่วง ( $R_D$ ) ไว้ที่ส่วนภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อทำหน้าที่หน่วงการแกว่งที่เกิดขึ้นภายในโวลเตจดีไวเดอร์ เนื่องจากวงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ จะประกอบด้วยค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวดที่เชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 5.4

จากรูปที่ 5.3 ก) เนื่องจากกล่องอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณดังกล่าวต้องนำไปต่อกับสายนำสัญญาณที่ป้อนให้กับดิจิทัลออสซิลโลสโคป และเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับอันเป็นเหตุให้เกิดความผิดพลาดในการวัดได้ จึงต้องใส่ความต้านทานแมทซิ่ง ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของความต้านทานแมทซิ่งนี้ จะต้องมีค่าเท่ากับเสรีจิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณเส้นดังกล่าวด้วย และตำแหน่งการต่อความต้านทานแมทซิ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ แสดงตำแหน่งของความต้านทานหน่วงและความต้านทานแมทซิ่ง

โดยที่  $U$  คือแรงดันทดสอบที่ต้องการวัด

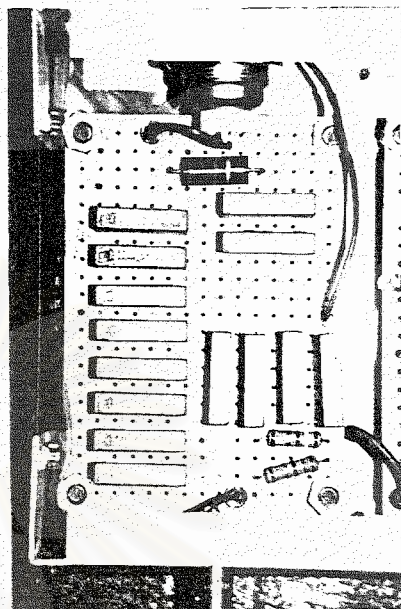
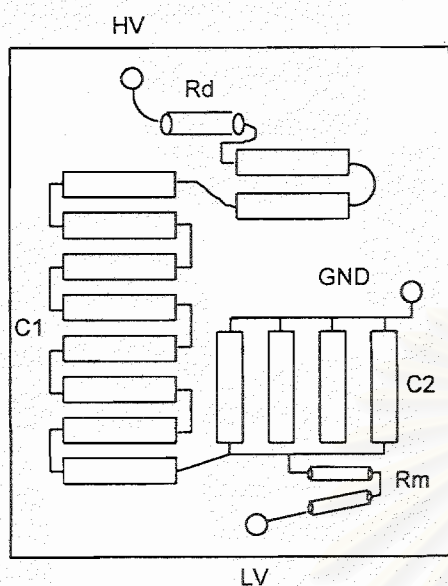
$C_1$  คือตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์

$C_2$  คือตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์

$R_d$  คือความต้านทานหน่วงเพื่อลดผลของการแกว่ง

$R_m$  คือความต้านทานแมทซิ่ง

การจัดวางค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการประกอบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ สามารถดูได้จากรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงตำแหน่งติดตั้งบนแผงวงจรของโวลต์จดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ

ค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของโวลต์จดีไวเซอร์รูปคลื่นแรงดันเป็นดังนี้

- 1) ค่าความจุทางภาคแรงสูง C1 ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุขนาด 1000 nF สามารถทนแรงดันกระแสตรงได้ 2000 โวลต์ ต่ออนุกรมจำนวน 10 ตัว

$$\text{วัดค่าความจุทางไฟฟ้าได้} \quad 103.2 \text{ pF}$$

- 2) ค่าความจุทางภาคแรงต่ำ C2 ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุขนาด 1000 nF สามารถทนแรงดันกระแสตรงได้ 2000 โวลต์ ต่อขนานกันจำนวน 4 ตัว

$$\text{วัดค่าความจุทางไฟฟ้าได้} \quad 3903.2 \text{ pF}$$

ดังนั้นสามารถคำนวณอัตราส่วนการแบ่งแรงดันได้ตามสมการ

$$a = \frac{C1 + C2}{C1} = \frac{103.2 + 3903.2}{103.2} = 38.82$$

- 3) ค่าความต้านทานหน่วง ( $R_d$ ) มีค่าเท่ากับ 227.2  $\Omega$

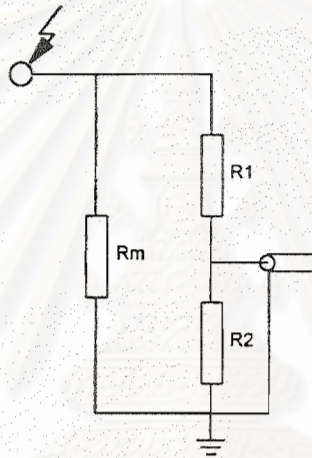
- 4) ค่าความต้านทานแมทซิ่ง ( $R_m$ ) มีค่าเท่ากับ 74.82  $\Omega$

### 5.2.2 การออกแบบโวลต์จดีไวเซอร์ของสัญญาณกระแส

เนื่องจากสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณของกระแสมีความถี่ประมาณ 100 kHz จึงสามารถใช้โวลต์จดีไวเซอร์เป็นแบบความต้านทานได้ และเพื่อให้อุปกรณ์วัดมีค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูง จึงได้ทำการออกแบบค่าอิมพีแดนซ์รวมทางภาคแรงสูง(ไม่รวมความต้านทานแมทซิ่ง) มีค่า

ประมาณ  $1\text{ M}\Omega$  โดยการใช้ความต้านทานย่อยจำนวน 9 ตัว นำมาต่ออนุกรมกัน และมีค่าอิมพีแดนซ์รวมทางภาคแรงต่ำประมาณ  $25\text{ k}\Omega$  เพื่อให้อัตราส่วนการแบ่งแรงดันมีค่าประมาณ 40 (แรงดันสูงสุดทางภาคแรงสูงมีค่าเท่ากับ 1600 โวลต์และแรงดันสูงสุดทางภาคแรงต่ำมีค่าเท่ากับ 40 โวลต์) ดังแสดงเป็นวงจรได้ดังในรูปที่ 5.6

โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานนั้นจำเป็นต้องใส่ความต้านทานเมทซิ่ง ไว้ที่ปลายสายเคเบิลวัดก่อนเข้าสู่โวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการอ่านค่าแรงดันที่โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 5.6

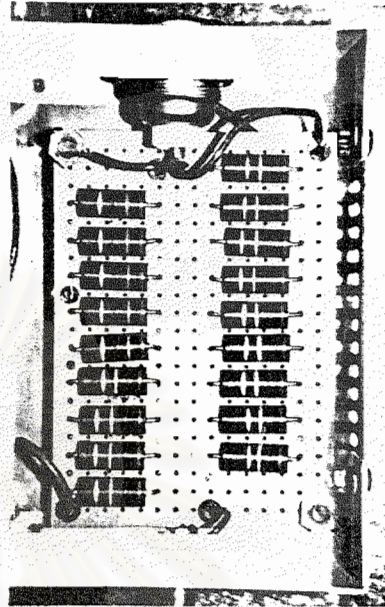
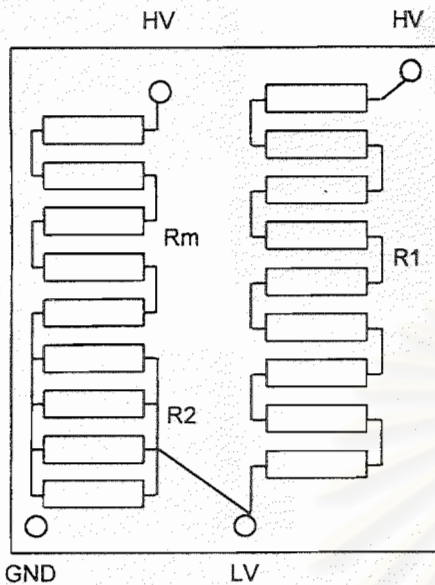


รูปที่ 5.6 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน แสดงตำแหน่งของความต้านทานหน่วงและความต้านทานเมทซิ่ง

การจัดวางค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการประกอบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน สามารถดูได้จากรูปที่ 5.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 5.7 แสดงตำแหน่งติดตั้งบนแผงวงจรของโวลต์จดีไวเซอร์แบบความต้านทาน

ค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของโวลต์จดีไวเซอร์รูปคลื่นกระแสเป็นดังนี้

- 1) ค่าความต้านทานทางภาคแรงสูง R1 ประกอบด้วย ค่าความต้านทานขนาด 100 k $\Omega$  จำนวน 4 ตัว และค่าความต้านทานขนาด 120 k $\Omega$  ต่ออนุกรม จำนวน 5 ตัว

$$\text{วัดค่าความต้านทานได้} \quad 1057 \text{ k}\Omega$$

- 2) ค่าความต้านทานทางภาคแรงต่ำ R2 ประกอบด้วย ค่าความต้านทานขนาด 100 k $\Omega$  ต่อขนานกันจำนวน 4 ตัว

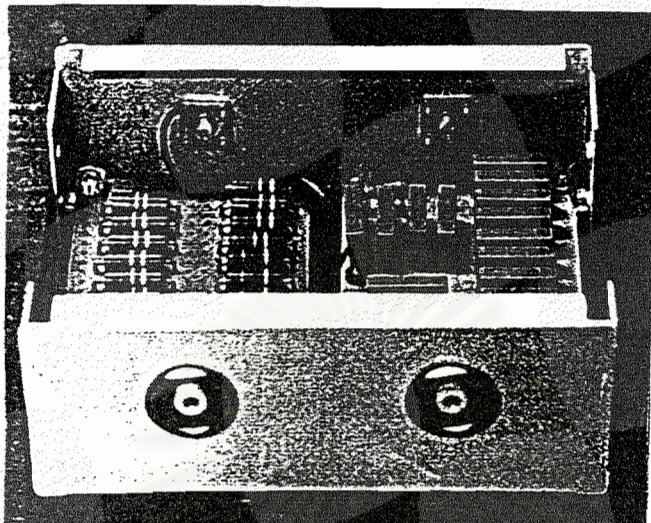
$$\text{วัดค่าความต้านทานได้} \quad 26.57 \text{ k}\Omega$$

ดังนั้นสามารถคำนวณอัตราส่วนการแบ่งแรงดันได้ตามสมการ

$$a = \frac{R1 + R2}{R2} = \frac{1057 + 26.65}{26.65} = 40.66$$

- 3) ค่าความต้านทานเมทซิ่ง ( $R_m$ ) มีค่าเท่ากับ 77.69  $\Omega$

เมื่อนำส่วนของโวลต์จดีไวเซอร์ทั้งแบบตัวเก็บประจุ และความต้านทาน มาประกอบในกล่องอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณ สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 5.8 สำหรับการทดลองหาผลตอบสนองทางเวลา จะแสดงไว้ในผลการทดลองการหาค่าคงตัวทางเวลาในหัวข้อที่ 6.1 ต่อไป



รูปที่ 5.8 รูปแสดงกล่องอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณ ซึ่งแสดงให้เห็นส่วน  
ของโวลเตจคิไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ และ โวลเตจคิไวเตอร์แบบความต้านทาน

### 5.3 การออกแบบส่วนของโปรแกรมวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL สำหรับ  
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้นได้ใช้ภาษาคอมพิวเตอร์คือ ภาษา C เนื่องจากทางผู้ผลิตอุปกรณ์  
มาตรฐาน GPIB ของบริษัท NI Instrument ได้พัฒนาคำสั่งควบคุมการทำงานของระบบ  
มาตรฐานดังกล่าว เพื่อให้ทางผู้ใช้งานสามารถนำคำสั่งเหล่านี้มาใช้ในงานควบคุมการทำงานของ  
อุปกรณ์ทางดิจิทัลได้

แนวความคิดในการออกแบบโปรแกรมคือ ต้องการให้ผู้ใช้ทุกระดับสามารถใช้งานได้  
มีลำดับขั้นตอนการทำงานง่าย ๆ มีคำสั่งแนะนำการทำงานตลอดเวลา โดยมีส่วนต่าง ๆ ของ  
โปรแกรมที่สามารถนำเสนอได้ดังนี้

- 1) ภาคการปรับเทียบอัตราส่วนของแรงดันก่อนเริ่มการทดสอบ
- 2) ภาคการนำเสนอชื่อโครงการวิจัย และผู้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย แสดงได้  
ดังในรูปที่ 5.9

- 3) ภาคการเตรียมแผ่นเก็บข้อมูล โดยการตรวจสอบเนื้อที่ว่างในแผ่นบันทึกข้อมูล  
ของช่องเก็บข้อมูลที่ทางผู้ใช้ได้เลือกไว้ในส่วนของค่าเริ่มต้น ถ้าแผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้อย่างไม่ได้รับ  
การจัดระเบียบ (unformat) ก็จะทำให้การจัดระเบียบให้ และถ้าเนื้อที่ว่างมีไม่พอในการเก็บข้อมูล

(น้อยกว่า 152,000 ไบต์) จะมีการรายงานความผิดพลาดและออกจากโปรแกรมเพื่อให้มีการเปลี่ยนแผ่นเก็บบันทึกข้อมูลใหม่ต่อไป

4) ภาคของช่องรายการเลือก เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกการทำงานได้เช่น เริ่มการทดสอบใหม่ หรือทำการเรียกข้อมูลเก่ามาดู

5) ภาคการจัดเก็บข้อมูลลักษณะจำเพาะของหม้อแปลงเช่น บริษัทผู้ผลิต หน่วยงานที่ต้องการให้ทดสอบ ขนาดกำลังงานของหม้อแปลง ขนาดแรงดันของหม้อแปลงที่ต้องการทดสอบ และหมายเลขเครื่องของหม้อแปลงที่นำมาทดสอบ เป็นต้น

6) ภาคการควบคุมการทำงานดิจิทัลลอจิสติกส์ และการรับข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการคำนวณจากดิจิทัลลอจิสติกส์

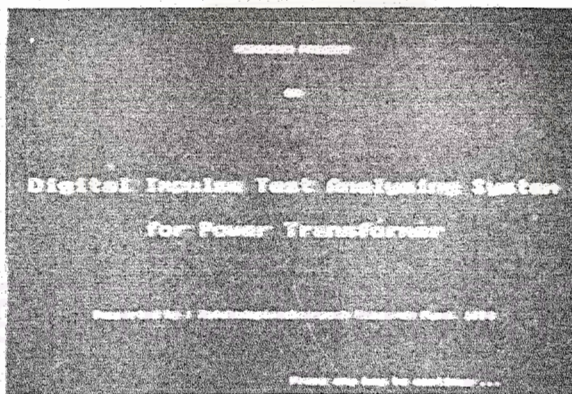
7) ภาคการคำนวณหาค่าเวลาหน้าคลื่น ค่าเวลาหางคลื่น ค่ายอดของแรงดัน และค่าร้อยละของแรงดันพุ่งเกิน

8) ภาคการเลือกชนิดของมาตรฐานที่จะใช้ในการตรวจวิเคราะห์

9) ภาคการแสดงผลกราฟฟิคทางจอภาพ

10) ภาคการพิมพ์รายงานผลการทดสอบทางเครื่องพิมพ์

11) ภาคการเรียกเพิ่มข้อมูลเก่าที่ได้จัดเก็บไว้มาดู



รูปที่ 5.9 ภาพกราฟฟิคในภาคการนำเสนอชื่อโครงการวิจัย

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้โดยต้องมืองค์ประกอบของไฟล์ต่าง ๆ ต่อไปนี้

1) ไฟล์ BIL.EXE เป็นไฟล์โปรแกรมหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ และแสดงผล

2) ไฟล์ DEFAULT.BIL เป็นไฟล์ช่วย มีหน้าที่ในการเก็บค่าอัตราส่วนสำหรับสัญญาณแรงดัน และกระแส เป็นที่เก็บตัวเลือกของช่องเพิ่มข้อมูล (A หรือ B) และเป็นที่ยกข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบอื่น ๆ ที่สำคัญ

3) ไฟล์ DEFAULT.EXE เป็นไฟล์สร้าง DEFAULT.BIL มีหน้าที่ควบคุมการทำงานของดิจิตอลออสซิลโลสโคป และอ่านข้อมูลพร้อมกับวิเคราะห์หาอัตราส่วนแบ่งแรงดันสำหรับสัญญาณแรงดัน และสัญญาณกระแส

4) แบตช์ไฟล์ DSKREADY.BAT เพื่อให้โปรแกรมได้เรียกใช้เพื่อตรวจสอบแผ่น บันทึกข้อมูลว่ามีความพร้อมในการบันทึกข้อมูลหรือไม่ ในแบตช์ไฟล์จะมีไฟล์ประกอบด้วยคือ DREADY.COM และ VOLUME.BAT

5) ไฟล์ DRIVE.TEM เป็นไฟล์ชั่วคราวที่โปรแกรมจะสร้างขึ้น เมื่อมีการเริ่มโปรแกรม โดยจะเก็บข้อมูลเกี่ยวกับช่องเก็บข้อมูลที่เลือกไว้ใน default.bil ชื่อของไดเรกทอรีที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และเนื่องจากไฟล์ดังกล่าวเป็นไฟล์ชั่วคราวที่สร้างขึ้นในขณะที่โปรแกรมกำลังทำงาน และจะลบทิ้งทันทีที่มีการออกจากโปรแกรม

6) ไฟล์ DATA.TEM เป็นไฟล์ชั่วคราวที่โปรแกรมสร้างขึ้น เพื่อใช้เป็นที่เก็บข้อมูลที่ได้รับจากดิจิตอลออสซิลโลสโคป และจะมีการเรียกใช้ในโปรแกรมภาคการวิเคราะห์และประมวลผล ไฟล์ดังกล่าวจะลบออกทันทีที่มีการออกจากโปรแกรม

7) ไฟล์ PRINT\_CI.PZD เป็นไฟล์จัดเก็บค่าองค์ประกอบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในโปรแกรมช่วยพิมพ์ PIZZA ใช้ในการจัดพิมพ์ภาพวงจรทดสอบ BIL ออกผ่านทางเครื่องพิมพ์

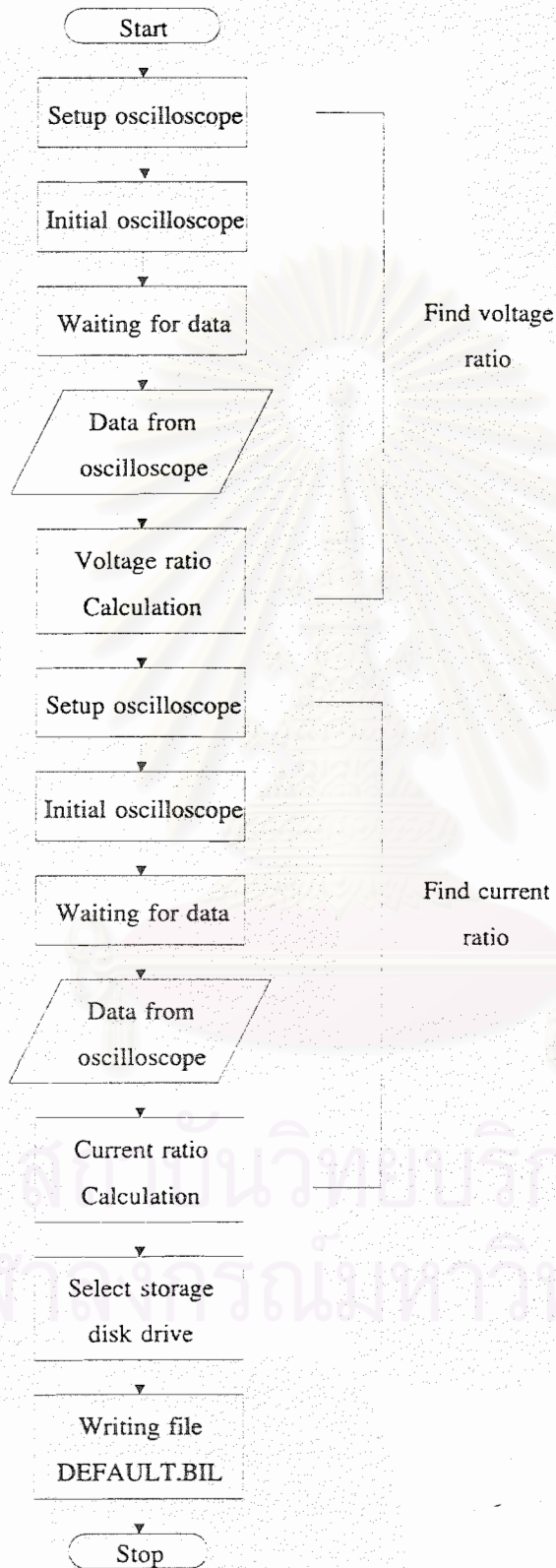
8) ไฟล์ PRINT\_OS.PZD เป็นไฟล์จัดเก็บค่าองค์ประกอบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในโปรแกรมช่วยพิมพ์ PIZZA ใช้ในการจัดพิมพ์ภาพออสซิลโลแกรมแต่ละขั้นตอนระหว่างการทดสอบออกผ่านทางเครื่องพิมพ์

ส่วนรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงาน และการออกแบบโปรแกรมในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL บางส่วนนั้น สามารถนำเสนอได้ดังนี้

### 5.3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงดันก่อนการทดสอบ

ความสำคัญของส่วนโปรแกรมนี้อีกคือ ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงดันก่อนการทดสอบ ซึ่งจะใช้เป็นโปรแกรมเพื่อตั้งค่า (default) ต่าง ๆ ให้กับโปรแกรมใหญ่ BIL.EXE ข้อมูลที่ได้ประกอบด้วย ช่องเก็บข้อมูล (A หรือ B) ชื่อไดเรกทอรีที่จะนำข้อมูลไปเก็บ อัตราส่วนแบ่งแรงดันสำหรับสัญญาณรูปคลื่นแรงดัน และอัตราส่วนแบ่งแรงดันสำหรับสัญญาณรูปคลื่นกระแส

ลำดับขั้นการทำงานของโปรแกรมสามารถอธิบายได้ดังในแผนภาพรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนในไฟล์ DEFAULT.EXE

โครงสร้างของไฟล์ DEFAULT.EXE ประกอบไปด้วย ส่วนทำการปรับเทียบ อัตราส่วนแบ่งแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์สัญญาณรูปคลื่นแรงดัน และการปรับเทียบอัตราส่วนแบ่งแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์สัญญาณรูปคลื่นกระแส ซึ่งการทำงานของโปรแกรมนี้ต้องอาศัยการทำงานร่วมกับ ดิจิตอลลอจิสติกโคปในการรวบรวมข้อมูลที่อ่านได้ของสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแส เพื่อนำมาหาค่าอัตราส่วนแบ่งแรงดัน และนำค่าอัตราส่วนที่หาได้นี้ ไปเก็บไว้ในแฟ้มชื่อ default.bil

แฟ้ม default.bil ประกอบด้วยตัวแปรดังต่อไปนี้

UNIT	ใช้สำหรับเก็บจำนวนหม้อแปลงที่ทดสอบแล้วในวันที่ทดสอบ
DRIVE	ใช้สำหรับเก็บตัวเลขของช่องเก็บข้อมูล (0 = 'A', 1 = 'B')
VOLT_DIV	อัตราส่วนแบ่งแรงดันสำหรับ โวลเตจดีไวเดอร์สัญญาณแรงดัน
CURR_DIV	อัตราส่วนแบ่งแรงดันสำหรับ โวลเตจดีไวเดอร์สัญญาณกระแส
NAME	ชื่อของไคเร็กทอรี และชื่อเริ่มต้นของไฟล์เก็บข้อมูล ซึ่งโครงสร้างของชื่อไคเร็กทอรีจะประกอบด้วย วัน, เดือนและลำดับที่ทำการทดสอบ เช่น ทำการทดสอบวันที่ 15 กุมภาพันธ์ หม้อแปลงใบที่ 2 ดังนั้นชื่อไคเร็กทอรีจะเป็น 021502 โดยสองตัวแรกแทนเดือน(02 = กุมภาพันธ์) สองตัวถัดมาแทนวันที่(15) และสองตัวสุดท้ายแทนลำดับที่ทำการทดสอบ(02) เป็นต้น

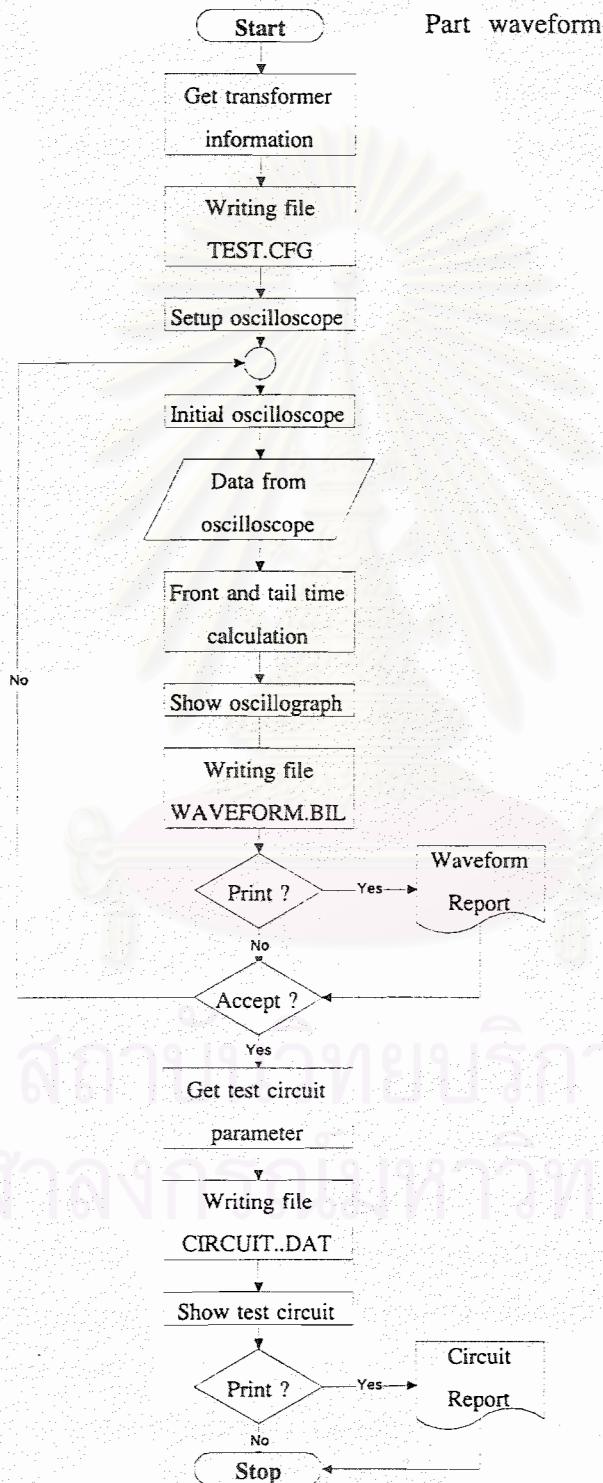
### 5.3.2 ลำดับขั้นตอนการทำงานของส่วนโปรแกรมสำหรับการปรับเทียบรูปคลื่น

#### มาตรฐาน

หน้าที่ของส่วนโปรแกรมการปรับเทียบรูปคลื่นมาตรฐานนี้คือ ทำการปรับเทียบรูปคลื่นอิมพัลส์แรงดันทดสอบ เพื่อให้ได้รูปคลื่นตามที่มาตรฐานกำหนดก่อนทำการทดสอบ BIL ซึ่งเป็นส่วนโปรแกรมที่จะต้องทำงานก่อนที่จะมีการขูดวงจรทดสอบ และเลือกมาตรฐานในเมนูรายการหลัก เนื่องจากในส่วนของโปรแกรมเหล่านั้นต้องการค่าของข้อมูลต่าง ๆ ที่เก็บอยู่ในไฟล์ TEST.CFG และ CIRCUIT.DAT ซึ่งล้วนเป็นไฟล์ที่สร้างขึ้นจากส่วนของโปรแกรมนี้

ส่วนของโปรแกรมนี้จะทำการรับข้อมูลแรงดันทดสอบ แล้วจะทำการคำนวณหา ค่าเวลาหน้าคลื่น และหางคลื่น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 และจะนำค่าที่ได้เก็บไว้ในแฟ้มชื่อ

WAVEFORM.BIL ในไดเรกทอรีที่กำหนดให้เป็นที่เก็บข้อมูล เพื่อใช้ในการอ้างอิงต่อไปลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถอธิบายได้ดังในแผนภาพรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อรับข้อมูลและคำนวณกับส่วนโปรแกรม waveform ในไฟล์ BIL.EXE

จากรูปที่ 5.11 แสดงลำดับขั้นตอนในส่วนหนึ่งของโปรแกรม BIL.EXE เพื่อทำการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน โดยในส่วนโปรแกรมดังกล่าวสามารถอธิบายลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

1) เริ่มจากการรับข้อมูลจำเพาะของหม้อแปลง เช่น ชื่อของบริษัทผู้ผลิต ชื่อผู้ให้ทดสอบ กำลังงานพิกัด หมายเลขเครื่องของหม้อแปลงที่นำมาทดสอบ ระบบแรงดันและระดับแรงดัน BIL ของขดลวดด้านที่ต้องการทดสอบ

2) ข้อมูลจำเพาะของหม้อแปลง จะเก็บอยู่ในไฟล์ TEST.CFG ซึ่งในไฟล์นี้จะประกอบด้วย ชื่อไฟล์ข้อมูลทั้งหมดในไดเรกทอรี วันที่ทำการทดสอบ ข้อมูลจำเพาะของหม้อแปลง มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ เป็นต้น

3) ชุดคำสั่งควบคุมการทำงานของดิจิตอลออสซิลโลสโคป เพื่อตั้งค่าต่าง ๆ ให้พร้อมรับข้อมูลจากการทดสอบ และจัดส่งข้อมูลที่ได้รับให้กับคอมพิวเตอร์ในรูปแบบของสัญญาณดิจิตอลต่อไป การตั้งค่าฐานเวลาของดิจิตอลออสซิลโลสโคปจะตั้งไว้ที่ 5  $\mu\text{sec}$  เพื่อที่จะสามารถนำแสดงผลทั้งหน้าคลื่นและหางคลื่นได้ในเวลาเดียวกัน โดยที่

- จำนวนข้อมูลทั้งหมดต่อ 1 สัญญาณเท่ากับ 501 จุดข้อมูล เวลาเทียบเท่า 50  $\mu\text{sec}$
- สัญญาณแรงดันหน้าคลื่นจะประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 100 จุดข้อมูล เวลาเทียบ

เท่า 10  $\mu\text{sec}$

- สัญญาณแรงดันหางคลื่นจะประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 501 จุดข้อมูล รวมกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากสมการเส้นกราฟหางคลื่น เพื่อให้เวลาเทียบเท่าเป็น 100  $\mu\text{sec}$

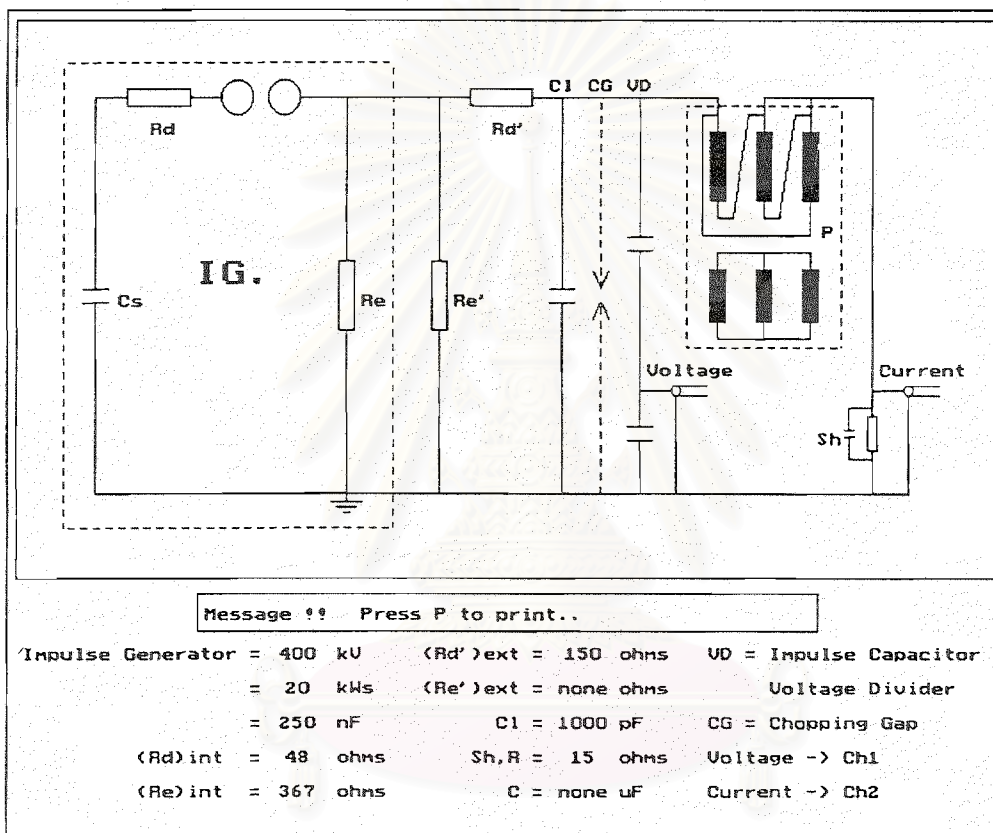
4) ภาคการคำนวณค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ ค่าเวลาหน้าคลื่น เวลาหางคลื่นร้อยละของค่าแรงดันพุ่งเกิน ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไปแล้วในบทที่ 4

5) ภาคการนำแสดงข้อมูลพร้อมรูปภาพที่ได้ออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ และพิมพ์ออกทางเครื่องพิมพ์ พร้อมกับนำเก็บในแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อใช้อ้างอิงในภายหลังได้ ถ้ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ยังไม่เป็นไปตามมาตรฐาน สามารถเลือกที่จะให้โปรแกรมดังกล่าวทำงานอีกทีรอบก็ได้ (หลังจากที่ได้ปรับปรุงองค์ประกอบความต้านทานในวงจรเครื่องกำเนิดแล้ว) และถ้าได้รูปคลื่นตามที่มาตรฐานกำหนด หรือเป็นที่พอใจแก่ผู้ทดสอบแล้ว โปรแกรมการทดสอบจะผ่านไปยังขั้นตอนต่อไป

6) ภาคการนำเสนอวงจรทดสอบ หลังจากที่ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แล้ว ส่วนของโปรแกรมนี้อาจถาม องค์ประกอบที่ใช้ภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิด) ค่าความต้านทานหน้าทั้งภายในวงจรและภายนอกวงจร ค่าความต้านทานคายประจุทั้งภายในและภายนอก



วงจร ค่าตัวเก็บประจุโหลด ค่าความต้านทานชั้นดี เป็นต้น หลังจากนั้นจะแสดงวงจรทดสอบ พร้อมค่าองค์ประกอบที่ใช้ในวงจรทดสอบ ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.12 และผู้ทดสอบสามารถพิมพ์ ภาพดังกล่าวออกทางเครื่องพิมพ์ได้อีกด้วย หลังจากนั้นโปรแกรมจะกลับไปสู่เมนูรายการหลักเพื่อ รอการทำงานต่อไป



รูปที่ 5.12 แสดงวงจรทดสอบที่นำเสนอในส่วนของส่วนโปรแกรมสำหรับการปรับเทียบรูปคลื่นมาตรฐานและค่าองค์ประกอบที่ใช้ในวงจร

### 5.3.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสำหรับการทดสอบ BIL

หน้าที่ของส่วนโปรแกรมนี้คือ ทำการทดสอบ BIL โดยการเลือกมาตรฐานที่ต้องการใช้ เนื่องจากมาตรฐานที่ทดสอบมีลำดับขั้นตอนที่เหมือนและแตกต่างกันกล่าวคือ

- ในมาตรฐาน IEC และ สมอ. มีลำดับขั้นตอนเหมือนกัน ประกอบด้วย

- 1) ระดับแรงดันลดระดับประมาณ 50-75 % ของระดับแรงดันทดสอบ 1 ครั้ง
- 2) ระดับแรงดันทดสอบ 100 %

3 ครั้ง

- ในมาตรฐาน ANSI มีลำดับขั้นตอนประกอบด้วย

- 1) ระดับแรงดันลดระดับประมาณ 50-75 % ของระดับแรงดันทดสอบ 1 ครั้ง
- 2) แรงดันรูปคลื่นตัดประมาณ 100-115 % ของระดับแรงดันทดสอบ 2 ครั้ง
- 3) ระดับแรงดันทดสอบ 100 % 1 ครั้ง

เนื่องจากการตั้งค่าฐานเวลาเพื่อรองรับสัญญาณในแต่ละขั้นตอนแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องมีการเลือกมาตรฐานที่ต้องการทดสอบ โดยในการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสทดสอบลดระดับและที่ระดับแรงดันทดสอบใช้ค่าฐานเวลาสำหรับดิจิตอลออสซิลโลสโคปเป็น 50  $\mu\text{sec}$

- จำนวนข้อมูลทั้งหมดต่อ 1 สัญญาณเท่ากับ 501 จุดข้อมูลเวลาเทียบเท่า 500  $\mu\text{sec}$
- สัญญาณรูปคลื่นแรงดันจะประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 100 จุดข้อมูลเวลาเทียบเท่า 100  $\mu\text{sec}$
- สัญญาณรูปคลื่นกระแสจะประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 250 หรือ 500 จุดข้อมูลเวลาเทียบเท่า 250 หรือ 500  $\mu\text{sec}$  ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับขนาดของค่ายอดรูปคลื่นกระแสที่ตำแหน่งท้ายสุดของรูปคลื่นกระแสกล่าวคือ เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณขนาดค่ายอดของรูปคลื่นกระแส ถ้าปรากฏว่าขนาดดังกล่าวน้อยกว่า 50 % ของค่ายอดของรูปคลื่นกระแส ข้อมูลของเวลาจะเทียบเท่า 250  $\mu\text{sec}$  และถ้าขนาดมากกว่า 50 % โปรแกรมจะนำเสนอข้อมูลทั้งหมดซึ่งเทียบเท่า 500  $\mu\text{sec}$

ในการตรวจสอบสำหรับการทดสอบ BIL ขั้นตอนของการทำรูปคลื่นตัด จะต้องตั้งค่าฐานเวลาที่ 1  $\mu\text{sec}$  เพื่อให้สามารถเก็บรายละเอียดของรูปคลื่นได้ทั้งหมด ลำดับขั้นตอนการทำงานของส่วนโปรแกรมการทดสอบ BIL สามารถอธิบายได้ดังในแผนภาพรูปที่ 5.13

จากรูปที่ 5.13 ส่วนของโปรแกรมดังกล่าว เริ่มจากการเลือกมาตรฐานที่ต้องการทำการทดสอบ หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการตั้งค่าดิจิตอลออสซิลโลสโคป เพื่อให้ดิจิตอล ออสซิลโลสโคปพร้อมที่จะรับข้อมูล และเมื่อรับข้อมูลแล้ว จะส่งข้อมูลมาให้กับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการคำนวณและนำเสนอทางภาพกราฟฟิก พร้อมทั้งเก็บข้อมูลในแผ่นบันทึกข้อมูล และสามารถพิมพ์รายงานผ่านทางเครื่องพิมพ์ได้

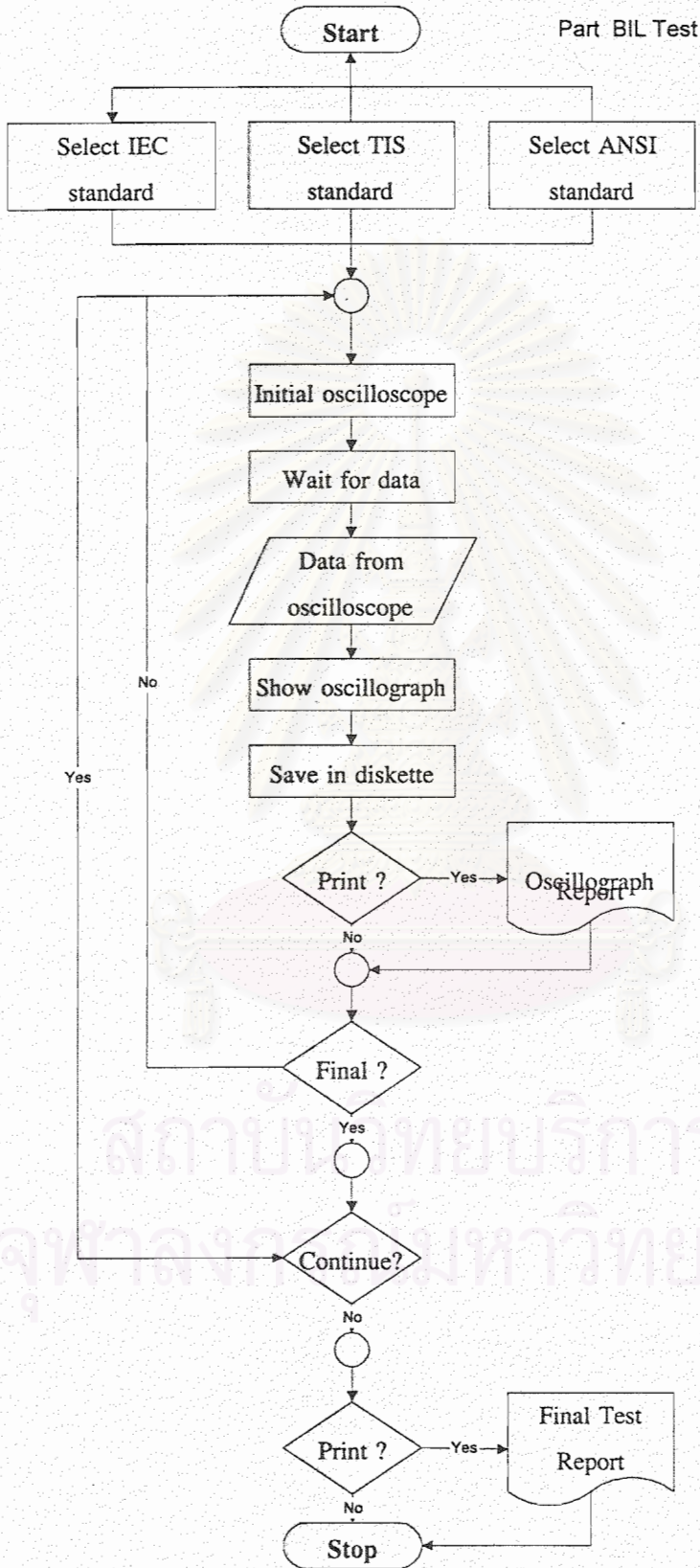
เมื่อทำการเสร็จสิ้นแต่ละขั้นตอน โปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่าสิ้นสุดขั้นตอนตามที่มาตรฐานกำหนดแล้วหรือไม่ ถ้าไม่ก็จะมีการทำงานซ้ำ แต่ถ้าสิ้นสุดขั้นตอนตามแต่ละเฟสแล้ว โปรแกรมจะผ่านไปที่ขั้นตอนเพื่อ สอบถามผู้ทดสอบว่าต้องการทำงานต่อหรือไม่ ถ้าต้องการทำต่อโปรแกรมจะทำงานต่อไป แต่ถ้าไม่ทำงานต่อโปรแกรมจะออกจากส่วนของโปรแกรม โดยการสอบถามถึง ความต้องการในการพิมพ์รายงานผลการทดสอบ และกลับเข้าสู่เมนูรายการหลักต่อไป

#### 5.3.4 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสำหรับการเรียกดูข้อมูลเก่า

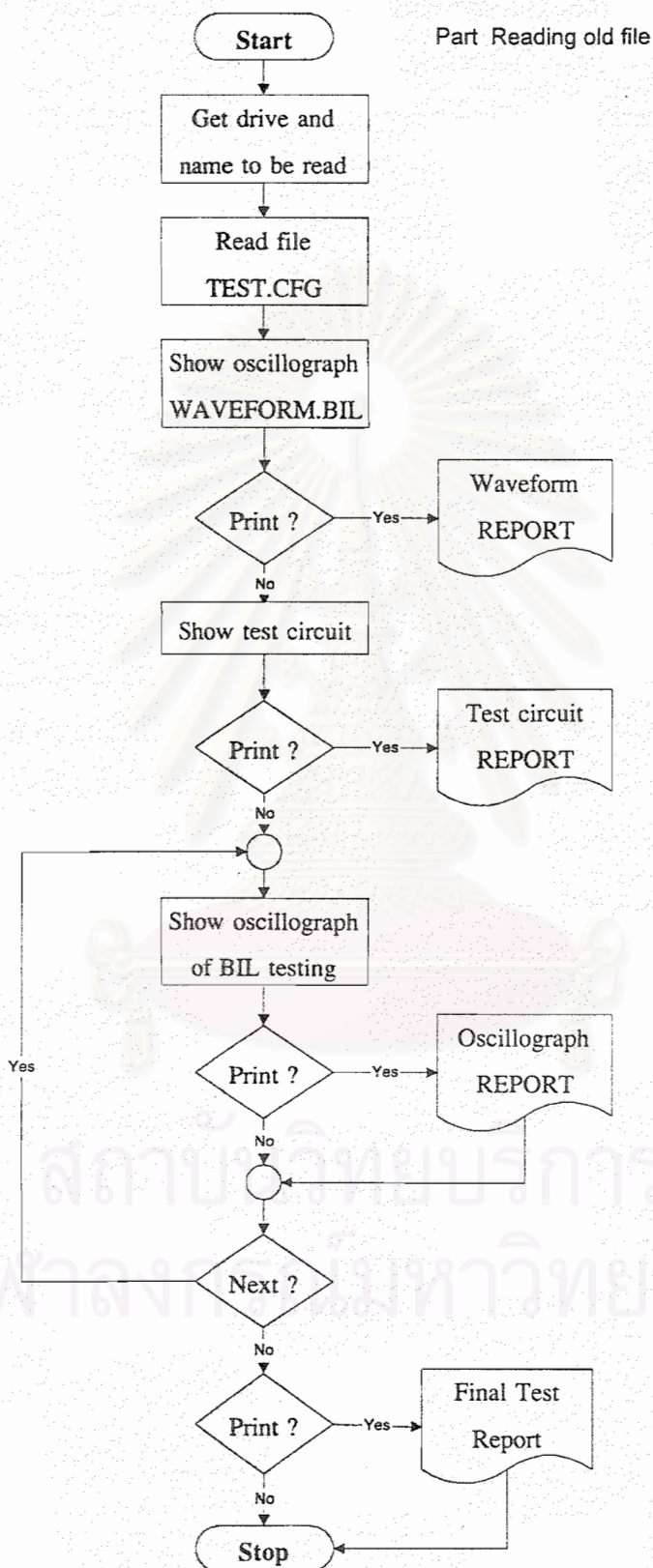
หน้าที่ของส่วนโปรแกรมนี้อีกคือ การเรียกข้อมูลเก่าที่ได้ทำการทดสอบไว้แล้วออกมาดู เพื่อการวิเคราะห์และคุณลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และรูปคลื่นกระแส สำหรับหม้อแปลงที่ได้รับการทดสอบ เพื่อสามารถเข้าใจถึงหลักการออกแบบ การวางขดลวดของหม้อแปลงที่ต้องการลดความแตกต่างของแรงดันกระจายที่ไม่สม่ำเสมอ และการจัดการฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถอธิบายได้ดังในรูปที่ 5.14

จากรูปที่ 5.14 ส่วนของโปรแกรมหดกล่าว สามารถอธิบายโดยเริ่มจากนำแผ่นข้อมูลที่มีไฟล์ต้องการเรียกดูใส่ในช่องบันทึกข้อมูล หลังจากนั้นให้เลือกช่องเก็บข้อมูลให้ตรงกับแผ่นข้อมูลที่ต้องการเรียกดู โปรแกรมจะถามชื่อไดเรกทอรีที่ต้องการเรียกเช่น "A:\.." หรือ "B:\.." เมื่อแผ่นข้อมูลได้รับการอ่านจากโปรแกรม โปรแกรมจะทำการอ่านข้อมูลเฉพาะของการทดสอบ จากไฟล์ TEST.CFG ก่อนซึ่งจะทำให้ทราบเกี่ยวกับข้อมูลต่าง ๆ รวมทั้งจำนวนและชื่อแฟ้มที่กำลังจะเรียกดู หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการอ่านไฟล์ WAVEFORM.BIL เพื่อแสดงภาพกราฟฟิคของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบ พร้อมทั้งมีคำสั่งให้เลือกการพิมพ์รายงาน เมื่อเสร็จแล้วโปรแกรมจะทำการอ่านและแสดงผลภาพกราฟฟิคเกี่ยวกับวงจรทดสอบ พร้อมทั้งมีคำสั่งให้เลือกการพิมพ์รายงาน ขึ้นต่อไปโปรแกรมจะทำการอ่านข้อมูลการทดสอบที่ละภาพจนครบจำนวน พร้อมทั้งมีคำสั่งให้เลือกการพิมพ์ หลังจากที่น่าแสดงข้อมูลหมดแล้ว ในท้ายสุดของโปรแกรมจะมีคำสั่งให้เลือกพิมพ์รายงาน และกลับเข้าสู่เมนูรายการหลัก เพื่อทำงานอื่นต่อไป

สำหรับโครงสร้างไฟล์ในไดเรกทอรีที่เก็บข้อมูลการทดสอบ จะประกอบด้วยไฟล์ต่าง โดยสมมติตัวอย่างให้หม้อแปลงได้รับการทดสอบเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ ลำดับที่ของหม้อแปลงที่ทดสอบในวันนั้นเท่ากับ 2 ดังนั้นจะได้ชื่อของไดเรกทอรีเป็น 021002 ในไดเรกทอรี 021002 จะประกอบด้วยไฟล์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.13 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อรับข้อมูล  
กับส่วนโปรแกรมการทดสอบ BIL ในไฟล์ BIL.EXE



รูปที่ 5.14 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงาน  
เพื่อการเรียกดูข้อมูลเก่า

- 1) WAVEFORM.BIL เป็นไฟล์ที่เก็บข้อมูลของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด
- 2) TEST.CFG เป็นไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลจำเพาะของหม้อแปลงที่ทดสอบเช่น วันที่ทดสอบ มาตรฐานที่ใช้ ชื่อเพิ่มที่อยู่ในไดเรกทอรี 021002 และจำนวนรูปคลื่นที่บันทึกไว้ เป็นต้น
- 3) CIRCUIT.DAT ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลเกี่ยวกับวงจรทดสอบ
- 4) 021002A1.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 1 ของเฟส A
- 5) 021002A2.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 2 ของเฟส A
- 6) 021002A3.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 3 ของเฟส A
- 7) 021002A4.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 4 ของเฟส A
- 8) 021002B1.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 1 ของเฟส B
- 9) 021002B2.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 2 ของเฟส B
- 10) 021002B3.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 3 ของเฟส B
- 11) 021002B4.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 4 ของเฟส B
- 12) 021002C1.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 1 ของเฟส C
- 13) 021002C2.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 2 ของเฟส C
- 14) 021002C3.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 3 ของเฟส C
- 15) 021002C4.BIL ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลลำดับขั้นที่ 4 ของเฟส C

สำหรับรายงานผลการทดสอบนั้นสามารถดูได้จากเอกสารในภาคผนวก ข

สถาบันวิจัยปรีภค  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### การทดสอบใช้งานระบบการวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL

เพื่อให้สามารถรู้ได้ว่า ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL ที่ได้ออกแบบไว้สามารถใช้งานวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ตามที่กำหนดไว้ จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบ โดยหัวข้อการทดสอบจะเป็นไปตามลำดับดังนี้

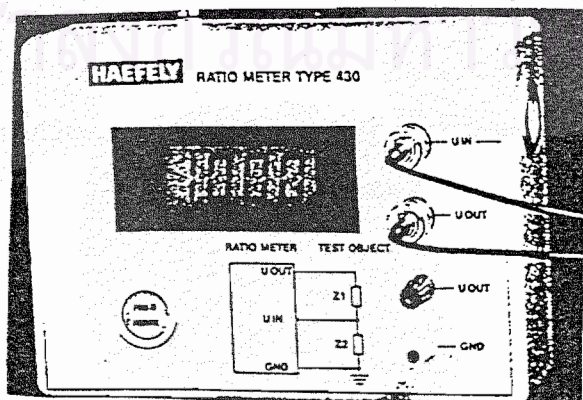
- 1) การทดสอบหลักคุณสมบัติของตัวลวดทองสัญญาณภายในกล่องลวดทองสัญญาณ
- 2) การทดสอบการทำงานของระบบในการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน
- 3) การทดสอบการทำงานของระบบในการทดสอบ BIL ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

#### 6.1 การทดสอบหลักคุณสมบัติของตัวลวดทองสัญญาณภายในกล่องลวดทองสัญญาณ

การทดสอบหลักคุณสมบัติของตัวลวดทองสัญญาณ เพื่อเป็นการพิจารณาถึงค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดัน และผลตอบสนองทางเวลา เป็นอย่างไร โดยการทดสอบเป็นไปตามลำดับขั้นตอนดังนี้

##### 6.1.1 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดันของตัวลวดทองสัญญาณ

ภายในกล่องลวดทองสัญญาณประกอบด้วยตัวลวดทองสัญญาณ แบบตัวเก็บประจุ และแบบความต้านทาน การหาค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดันของตัวลวดทองสัญญาณสามารถทำได้ โดยการใช้เครื่องมือทดสอบที่เรียกว่า RATIO METER, type 430 ของบริษัท HAEFELY ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ผลการตรวจสอบค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดัน แสดงดังในตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.1 เครื่องมือสำหรับการตรวจวัดค่าอัตราส่วนแบ่งแรงดัน

ตารางที่ 6.1 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าอัตราส่วนแบ่งแรงดันของตัวลวดทอนสัญญาณภายในกล่องลวดทอนสัญญาณ

ลักษณะของ ตัวลวดทอนสัญญาณ	ค่าที่คำนวณ ได้	ค่าที่อ่านได้ จาก RATIO METER	ร้อยละ ความแตกต่าง
แบบตัวเก็บประจุ สำหรับสัญญาณแรงดัน	38.82	43.05	10.9
แบบความต้านทาน สำหรับสัญญาณกระแส	40.66	40.77	0.3

จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าตัวลวดทอนสัญญาณแบบตัวเก็บประจุนั้นมีค่าอัตราส่วนแรงดัน แตกต่างจากค่าที่คำนวณได้ตามสมการหาอัตราส่วนแรงดัน

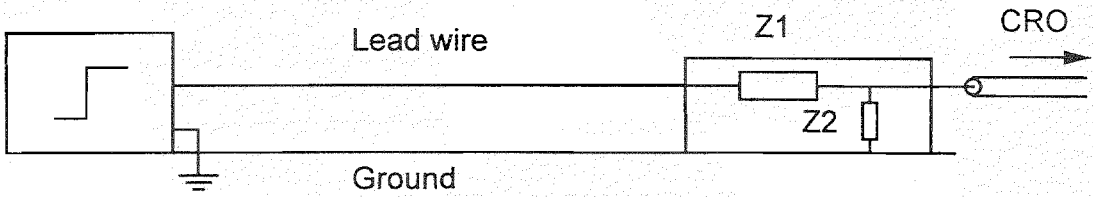
$$a = (C_1 + C_2)/C_1$$

เนื่องจากในโครงสร้างของตัวลวดทอนสัญญาณ นอกจากมีตัวเก็บประจุซึ่งเป็นค่าองค์ประกอบที่สำคัญแล้ว ยังมีส่วนที่เรียกว่าความต้านทานเมทซิ่ง และความต้านทานหน่วงในภาคแรงสูงรวมอยู่ด้วย จึงทำให้ค่าอัตราส่วนที่วัดได้มีความผิดพลาดมากถึง 10 % สำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานนั้น มีค่าอัตราส่วนแรงดันที่วัดได้จาก RATIO METER ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้เนื่องจากในโครงสร้างของตัวลวดทอนสัญญาณนั้น ไม่มีทั้งความต้านทานเมทซิ่งและความต้านทานหน่วง ทำให้ไม่มีองค์ประกอบอื่น ๆ เข้าไปเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบหลักเหมือนกับตัวลวดทอนสัญญาณแบบตัวเก็บประจุ

#### 6.1.2 การทดสอบผลตอบสนองทางเวลาของตัวลวดทอนสัญญาณ

การทดสอบผลตอบสนองทางเวลาของตัวลวดทอนสัญญาณนั้นทำได้ โดยการป้อนแรงดันรูปซันที่มีค่าความชันน้อยกว่า 5 nsec [25] ให้ทางภาคแรงสูงของตัวลวดทอนสัญญาณ และดูลักษณะผลตอบสนองทางเวลาที่ภาคแรงต่ำของตัวลวดทอนสัญญาณ รูปวงจรทดสอบหาผลตอบสนองทางเวลาดูได้จากรูปที่ 6.2



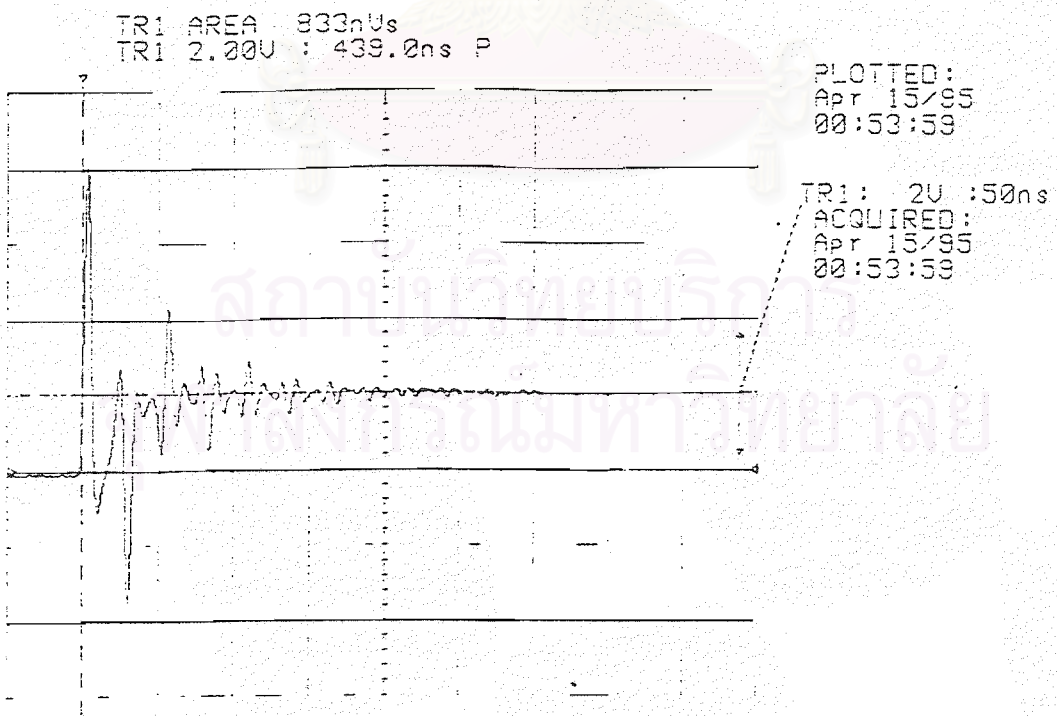


รูปที่ 6.2 แสดงวงจรที่ใช้ในการหาผลตอบทางเวลาของตัวลวดทอนสัญญาณ

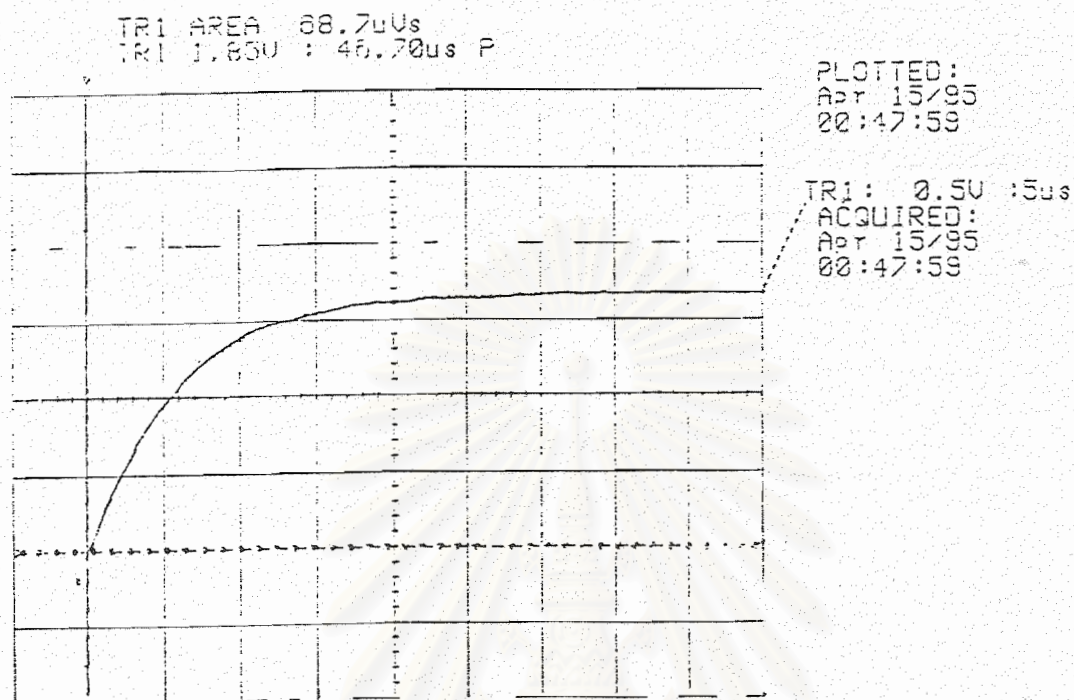
ผลการทดสอบหาค่าคงตัวทางเวลาสำหรับตัวลวดทอนสัญญาณแบบตัวเก็บประจุ และแบบความต้านทาน สามารถดูได้จากตารางที่ 6.2 และรูปที่ 6.3 ก), 6-3 ข)

ตารางที่ 6.2 ตารางแสดงผลการวัดค่าตอบสนองทางเวลาสำหรับตัวลวดทอนสัญญาณ

ลักษณะของตัวลวดทอนสัญญาณ	ผลตอบสนองทางเวลา
แบบตัวเก็บประจุ สำหรับสัญญาณแรงดัน	22.5 nsec
แบบความต้านทาน สำหรับสัญญาณกระแส	9.56 $\mu$ sec



ก) สำหรับตัวลวดทอนสัญญาณแบบตัวเก็บประจุ



ข) สำหรับตัวลดทอนสัญญาณแบบความต้านทาน  
รูปที่ 6.3 ภาพออสซิลโลแกรมผลตอบสนองทางเวลา (ต่อ)

## 6.2 การทดสอบการทำงานของระบบในการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน

การทดสอบการทำงานของระบบในการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันนั้น เพื่อตรวจสอบการคำนวณที่ได้ตั้งสมมติฐานการประมาณไว้ ดังแสดงในบทที่ 4 ด้วยลักษณะรูปคลื่นที่แตกต่างกัน ลำดับขั้นวิธีการทดสอบเป็นดังนี้

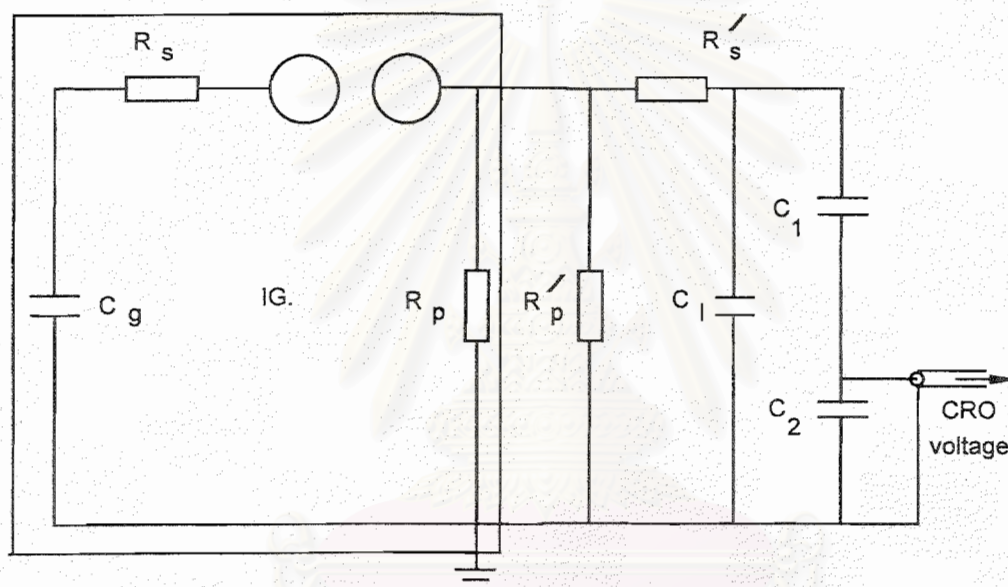
1) ทำการคำนวณสำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐานรูปคลื่นลบ 1.2/50  $\mu\text{sec}$  พร้อมภาพถ่ายจากแอนะล็อกออสซิลโลสโคป เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

2) ทำการคำนวณรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้าที่มีเวลาทางหน้าคลื่น 0.84  $\mu\text{sec}$  และเวลาหางคลื่น 50  $\mu\text{sec}$  พร้อมภาพถ่ายจากแอนะล็อกออสซิลโลสโคป เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

3) ทำการคำนวณรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้าที่มีเวลาทางหน้าคลื่น 1.56  $\mu\text{sec}$  และเวลาหางคลื่น 50  $\mu\text{sec}$  พร้อมภาพถ่ายจากแอนะล็อกออสซิลโลสโคป เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

4) ทำการคำนวณรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้าที่มีเวลาทางหน้าคลื่น 1.2  $\mu\text{sec}$  และเวลาหางคลื่น 40  $\mu\text{sec}$  พร้อมภาพถ่ายจากแอนะล็อกออสซิลโลสโคป เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

การทดสอบในแต่ละขั้นตอนจะทำการทดสอบ 5 ครั้ง เพื่อดูความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าของแรงดันทดสอบ ค่าความแปรปรวนสำหรับช่วงเวลาหน้าคลื่น ค่าความแปรปรวนสำหรับช่วงเวลาหางคลื่น และค่าความแปรปรวนสำหรับร้อยละของค่าแรงดันพุ่งเกิน โดยก่อนการทดสอบจะทำการปรับเทียบแรงดัน โดยใช้ไฟล์ DEFAULT.BIL เพื่อใช้ในการตั้งค่าอัตราส่วนแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 100 kV ซึ่งจะเป็นระดับแรงดันที่ใช้ตลอดการทดสอบในส่วนนี้ วงจรที่ใช้ในการทดสอบการทดสอบการทำงานของระบบ ในการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันสามารถดูได้จากรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 วงจรและค่าองค์ประกอบที่ใช้สำหรับการทดสอบ  
การทำงานของระบบในการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน

ค่าองค์ประกอบในวงจรตามรูปที่ 6.4 เป็นดังนี้

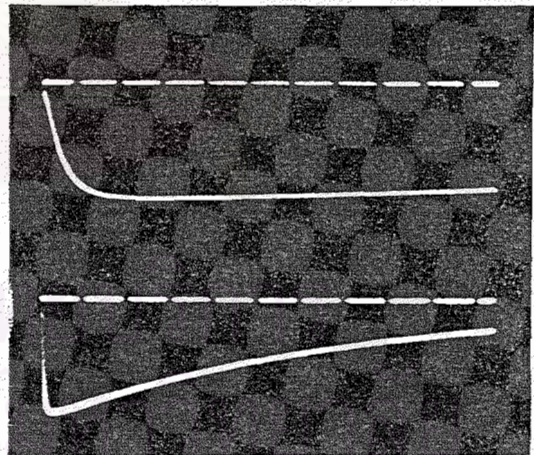
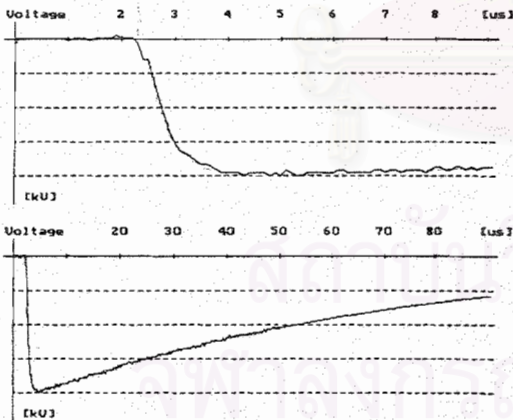
- IG คือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาดแรงดัน 400 kV 20 kWs 250 nF
- $R_s$  คือความต้านทานหน่วงภายในมีขนาดเท่ากับ 48 โอห์ม
- $R'_s$  คือความต้านทานหน่วงภายนอกมีขนาดขึ้นอยู่กับแต่ละการทดสอบ
- $R_p$  คือความต้านทานคายประจุภายในมีขนาดขึ้นอยู่กับแต่ละการทดสอบ
- $R'_p$  คือความต้านทานคายประจุภายนอกมีขนาดขึ้นอยู่กับแต่ละการทดสอบ
- $C_1$  คือตัวเก็บประจุโพลีมีลมีขนาดเท่ากับ 1000 pF
- $C_1, C_2$  คือตัวลวดทองสัญญาณแบบตัวเก็บประจุขนาด 500 pF 400 kV

ผลการทดสอบดูได้จากตารางที่ 6.3 ถึงตารางที่ 6.7 และภาพเปรียบเทียบของรูปคลื่นที่ได้จากระบบดิจิทัล กับแอนะล็อก ดูได้จากรูปที่ 6.5 ถึงรูปที่ 6.9

ตารางที่ 6.3 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{sec}$

	$T_1$ ( $\mu\text{sec}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{sec}$ )	Overshoot (%)	ค่าแรงดัน (kV)
ค่าที่วัดได้จริง	1.2	50	0	100
ค่าที่อ่านได้	1.2	50	0	100.9
	1.2	51	0	100.8
	1.3	51	0	100.7
	1.3	51	0	100.8
	1.2	51	0	100.2

ค่าองค์ประกอบที่ใช้ในวงจร  $R_d' = 297 \Omega$ ,  $R_e = 367 \Omega$ ,  $R_e' = 0 \Omega$



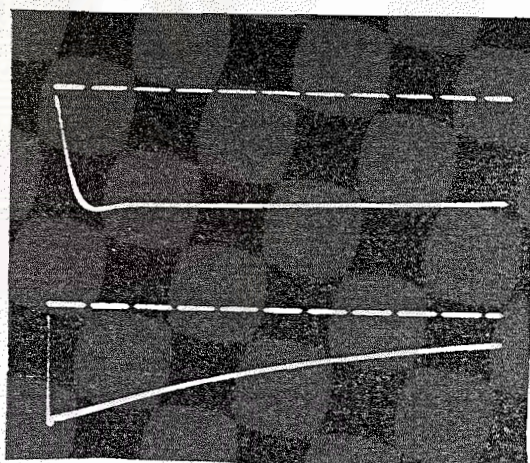
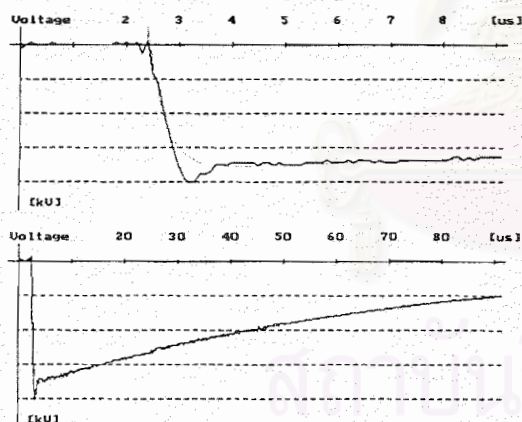
รูปที่ 6.5 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบดิจิทัลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{sec}$

จากตารางที่ 6.3 ความแตกต่างในการคำนวณกับค่าที่วัดได้จริงสำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานนั้น ไม่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนมีแต่เพียงค่ายอดของแรงดันซึ่งมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการค่าความผิดพลาดในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

ตารางที่ 6.4 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 0.84/50  $\mu\text{sec}$

	$T_1$ ( $\mu\text{sec}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{sec}$ )	Overshoot (%)	ค่าแรงดัน (kV)
ค่าที่วัดได้จริง	0.8	50	4	103.5
ค่าที่อ่านได้	0.74	50	4.6	105
	1.1	51	4.5	105.4
	0.95	50	4.0	105
	0.93	50	3.9	155.5
	0.79	50	3.3	104.8

ค่าองค์ประกอบที่ใช้ในวงจร  $R_d' = 180 \Omega$ ,  $R_e = 367 \Omega$ ,  $R_e' = 0 \Omega$



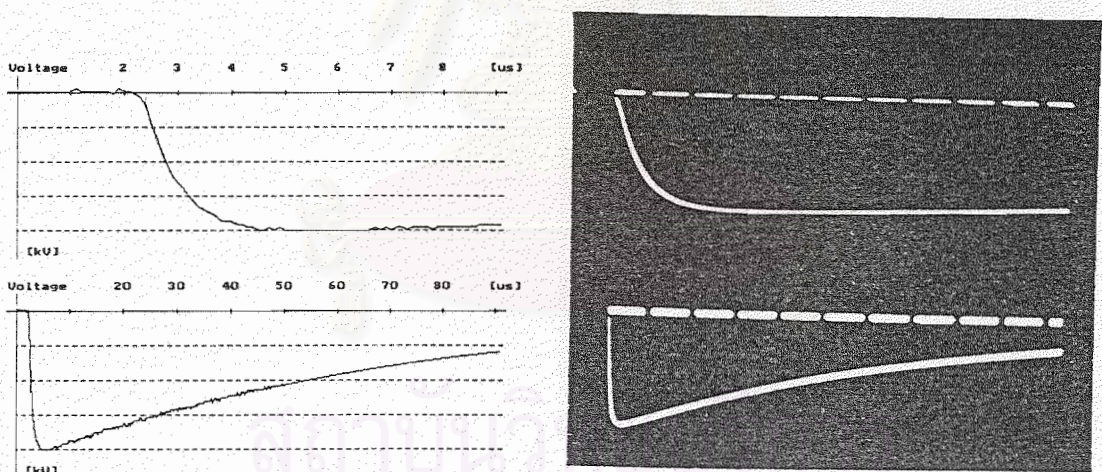
รูปที่ 6.6 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบดิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์ 0.84/50  $\mu\text{sec}$

สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 0.84/50  $\mu\text{sec}$  นั้นจะสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างที่เกิดจากการคำนวณค่าเวลาหน้าคลื่น ซึ่งความผิดพลาดดังกล่าวอาจเกิดจากลักษณะรูปคลื่นมีการแกว่งตัวค่อนข้างสูง และการเข้ารหัสดิจิตอลในช่วงสัญญาณดังกล่าวมีค่าน้อยเกินไปทำให้การประมาณค่าเวลาหน้าคลื่นในช่วงดังกล่าว เกิดความผิดพลาดในการคำนวณ

ตารางที่ 6.5 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.56/50  $\mu\text{sec}$

	$T_1$ ( $\mu\text{sec}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{sec}$ )	Overshoot (%)	ค่าแรงดัน (kV)
ค่าที่วัดได้จริง	1.6	52	0	98
ค่าที่อ่านได้	1.7	51	0	100.6
	1.7	51	0	100.1
	1.7	52	0	100.2
	1.7	52	0	99.5
	1.7	52	0	98.5

ค่าองค์ประกอบที่ใช้ในวงจร  $R_d' = 430 \Omega$ ,  $R_e = 367 \Omega$ ,  $R_c' = 0 \Omega$



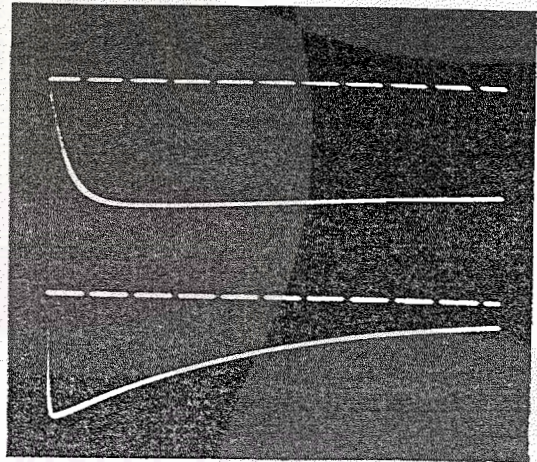
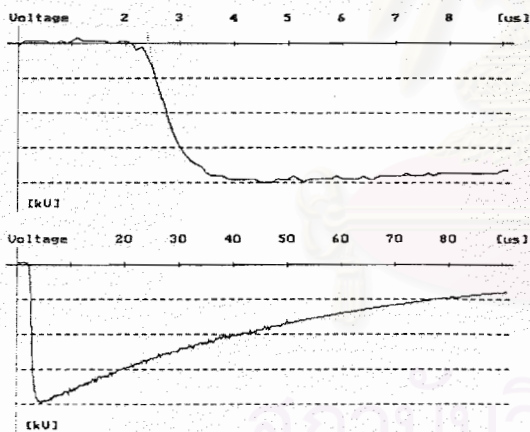
รูปที่ 6.7 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบดิจิทัลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์ 1.56/50  $\mu\text{sec}$

สำหรับรูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นชดจําคับบนของช่วงเวลาหน้าคลื่น ไม่สามารถสังเกตเห็นความผิดปกติของโปรแกรมในการคำนวณค่าเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น ซึ่งการประมาณลักษณะรูปคลื่น สามารถเลียนแบบได้เหมือนรูปคลื่นของจริงทำให้ค่าความผิดพลาดจึงมีค่าต่ำด้วย

ตารางที่ 6.6 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/40  $\mu\text{sec}$

	$T_1$ ( $\mu\text{sec}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{sec}$ )	Overshoot (%)	ค่าแรงดัน (kV)
ค่าที่วัดได้จริง	1.2	40	0	90
ค่าที่อ่านได้	1.1	40	0	91.64
	1.2	40	1.2	92.55
	1.2	40	1.2	92.55
	1.1	39	0	92.4
	1.1	39	0	91.73

ค่าองค์ประกอบที่ใช้ในวงจร  $R_d' = 297 \Omega$ ,  $R_c = 550 \Omega$ ,  $R_c' = 617 \Omega$



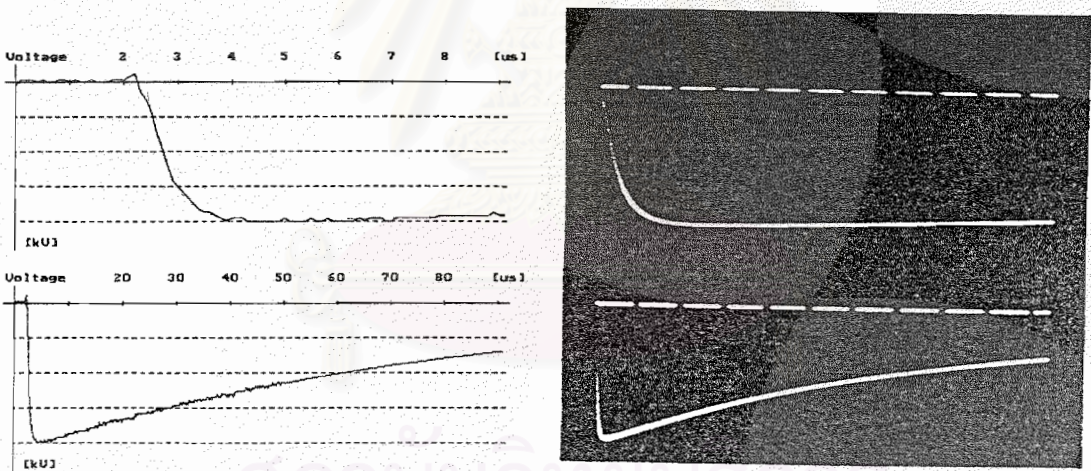
รูปที่ 6.8 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบดิจิทัลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/40  $\mu\text{sec}$

สำหรับรูปคลื่น 1.2/40  $\mu\text{sec}$  การประมาณค่าทางเวลาทางคลื่นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง สำหรับค่ายอดของแรงดันรูปคลื่น 1.2/40  $\mu\text{sec}$  มีค่าต่ำกว่ารูปคลื่น 1.2/50  $\mu\text{sec}$  นั้น มีสาเหตุเนื่องมาจากการคายประจุจากโหลดให้กับความต้านทานคายประจุทำได้เร็วขึ้น (ความต้านทานคายประจุมีค่าน้อยกว่า) ทำให้ค่าแรงดันค่ายอดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 6.7 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/60  $\mu\text{sec}$

	$T_1$ ( $\mu\text{sec}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{sec}$ )	Overshoot (%)	ค่าแรงดัน (kV)
ค่าที่วัดได้จริง	1.2	60	0	98.2
ค่าที่อ่านได้	1.3	60	0	100.4
	1.3	59	1.5	101.8
	1.3	59	1.6	102.0
	1.2	59	1.2	101.2
	1.2	59	0	99.64

ค่าองค์ประกอบที่ใช้ในวงจร  $R_d' = 297 \Omega$ ,  $R_c = 550 \Omega$ ,  $R_c' = 0 \Omega$



รูปที่ 6.9 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/60  $\mu\text{sec}$

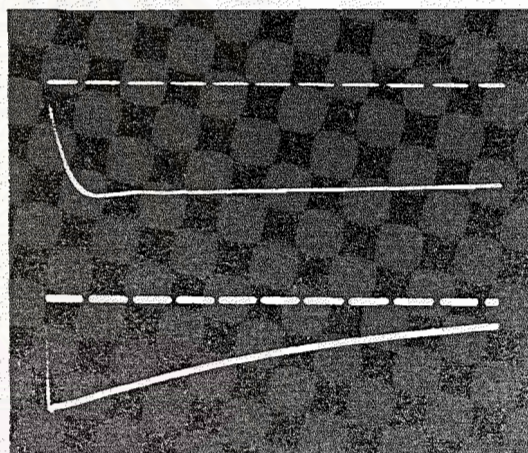
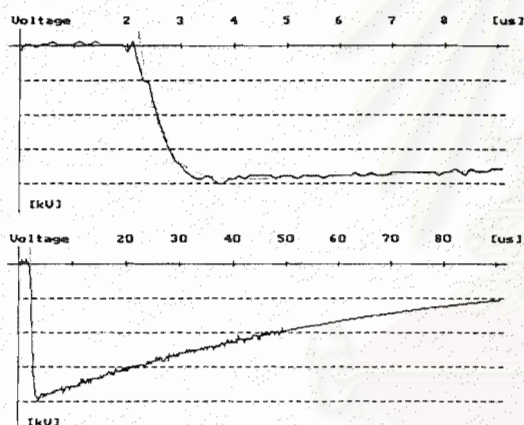
ในรูปคลื่น 1.2/60  $\mu\text{sec}$  ค่าของแรงดันมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่น 1.2/50  $\mu\text{sec}$  เนื่องจากค่าความต้านทานคายประจุมีค่าค่อนข้างสูง ความสามารถในการคายประจุของโหลดต้องใช้เวลามากขึ้น ทำให้แรงดันที่ได้จึงมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่น 1.2/50  $\mu\text{sec}$



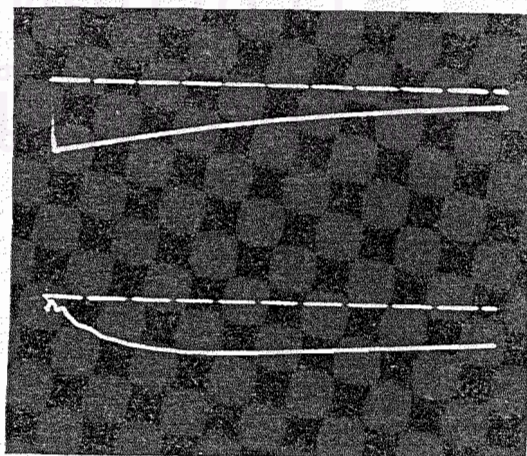
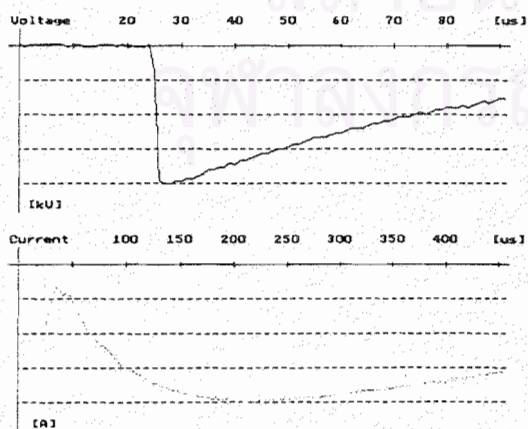
### 6.3 การทดสอบการทำงานของระบบในการทดสอบ BIL ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

การทดสอบการทำงานของระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL ทำการทดสอบบนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง พิกัดกำลัง 160 กิโลวัตต์แอมแปร์ พิกัดแรงดันด้านแรงสูง 22 กิโลโวลต์ พิกัดแรงดันด้านแรงต่ำ 400/230 โวลต์ หมายเลขเครื่อง 386007 ทดสอบ BIL ด้วยมาตรฐาน IEC ในรูปที่ 6.10 แสดงตัวอย่างรูปคลื่นที่ได้จากระบบการทดสอบแบบดิจิทัล เทียบกับแบบแอนะล็อก โดยเป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนในแต่ละขั้นตอนของการทดสอบบนเฟส A โดยขั้นตอนตามมาตรฐาน IEC ประกอบด้วย

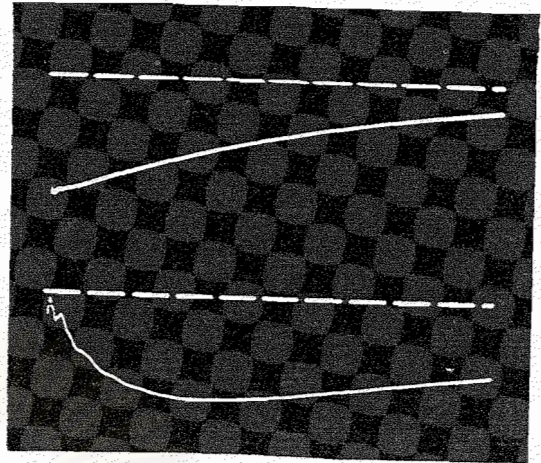
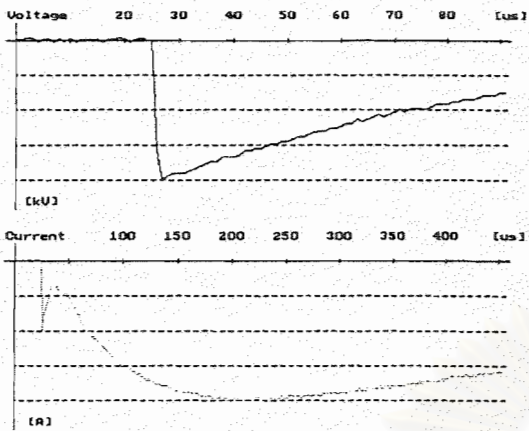
- 1) การเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันก่อนการทดสอบ
- 2) ทดสอบด้วยแรงดันลดระดับขนาด 60 % ของแรงดันทดสอบ BIL
- 3) ทดสอบด้วยแรงดันเต็มคลื่นขนาดแรงดันทดสอบ BIL 3 ครั้ง



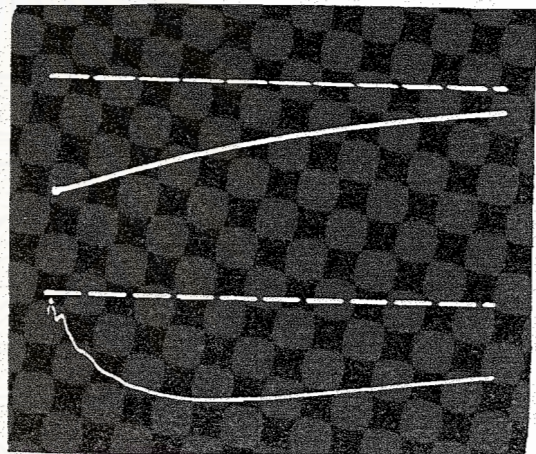
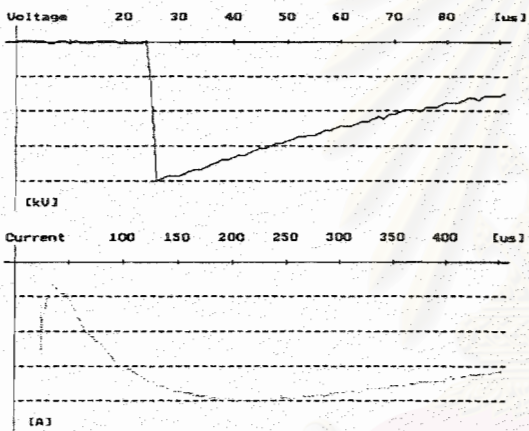
ก) ภาพออสซิลโลแกรมการปรับเทียบรูปคลื่นมาตรฐานแรงดัน 75 kV



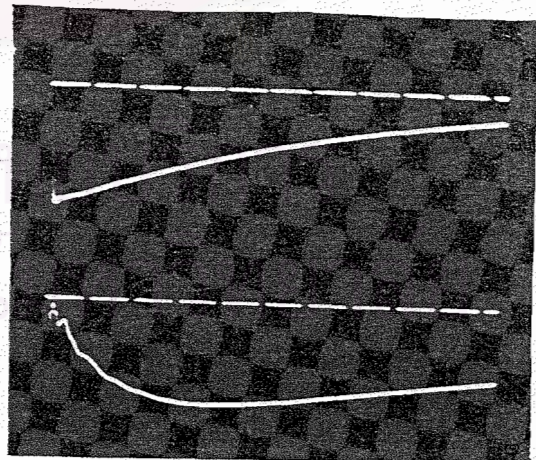
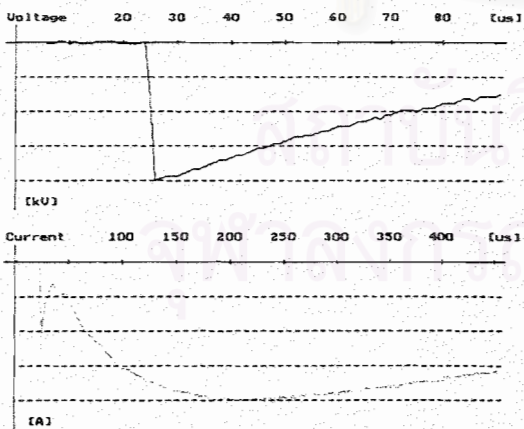
ข) ภาพออสซิลโลแกรมทดสอบที่แรงดันทดสอบลดระดับ 75 kV



ค) ภาพออสซิลโลกราฟทดสอบที่แรงดันทดสอบ 125 kV ครั้งที่ 1



ง) ภาพออสซิลโลกราฟทดสอบที่แรงดันทดสอบ 125 kV ครั้งที่ 2



จ) ภาพออสซิลโลกราฟทดสอบที่แรงดันทดสอบ 125 kV ครั้งที่ 3

รูปที่ 6.10 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากระบบวิเคราะห์แบบดิจิทัล  
เทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับการทดสอบ BIL บนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 6.10 แสดงให้เห็นว่าระบบการวิเคราะห์ผลแบบดิจิทัล สามารถทำงานได้ เช่นเดียวกับแบบแอนะล็อกที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน แต่มีข้อเสียตรงที่ภาพที่ได้จากระบบวิเคราะห์ แบบดิจิทัลไม่สามารถสังเกตเห็นการเกิดดีสซาร์จบางส่วนที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ชัดเจนเหมือนกับการวิเคราะห์แบบแอนะล็อก แต่ในลักษณะการเกิดผิพรองที่รุนแรง ระบบวิเคราะห์ผลแบบดิจิทัลก็ยังสามารถทำงานได้ดีเทียบเท่ากับแบบแอนะล็อก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 7

### สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการใช้โปรแกรม

ระบบการวิเคราะห์ผลการทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ได้รับการพัฒนาออกแบบขึ้น สำหรับใช้ในงานทดสอบ BIL กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อทดแทนหรือทำงานร่วมกับระบบเก่าที่เป็นแอนะล็อก ซึ่งใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระบบแบบดิจิตอลดังกล่าวสามารถใช้งานวิเคราะห์และคำนวณค่าเวลาหน่วงคลื่น ค่าเวลาทางคลื่น ค่าแรงดันยอด และค่าร้อยละของแรงดันพุ่งเกิน นอกจากนี้ยังใช้ในการตรวจลักษณะที่ผิดปกติของหม้อแปลงชนิดที่รุนแรงได้ และยังสามารถพิมพ์รายงานออกทางเครื่องพิมพ์ หรือเก็บข้อมูลไว้ในแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อใช้ในการอ้างอิงต่อไป

ระบบการวิเคราะห์ผลการทดสอบแบบดิจิตอลที่ได้รับการออกแบบขึ้น เป็นระบบที่ใช้อุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วย

- 1) เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ DX4-66 พร้อมเครื่องพิมพ์เลเซอร์ 1 ชุด
- 2) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป ที่มีอัตราการสุ่มสัญญาณ 200 Ms/sec 1 เครื่อง

พร้อมระบบเชื่อมโยงแบบขนาน GPIB

- 3) กล้องลตทอนสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยโวลเตจดีไวเดอร์
  - สำหรับการลตทอนสัญญาณแรงดัน มีอัตราส่วนแรงดัน 43.05  
มีผลตอบสนองทางเวลา 22.5 nsec
  - สำหรับการลตทอนสัญญาณกระแส มีอัตราส่วนแรงดัน 40.77  
มีผลตอบสนองทางเวลา 9.56  $\mu$ sec

ผลการทดสอบการใช้ระบบการวิเคราะห์ผลแบบดิจิตอล ในการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันนั้นผลการวิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์ที่มีความแม่นยำสูง แต่ในช่วงแรงดันที่มีหน้าคลื่นสั้นและมีการแกว่งตัวสูง ทำให้มีความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าเวลาทางหน้าคลื่นสูงมาก

ผลการทดสอบการตรวจวิเคราะห์ผลทดสอบ ความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ BIL บนหม้อแปลงกำลังไฟฟ้า สามารถใช้งานได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ โดยระบบแบบดิจิตอลนั้นไม่

สามารถตรวจจับกรณีการเกิดคิสซาร์จบางส่วนขนาดเล็ก แต่สามารถใช้ในการตรวจจับกรณีที่เกิดความผิดปกติอย่างรุนแรงเช่น เกิดลัดวงจรระหว่างขดลวด เกิดการผิดปกติลงดิน เป็นต้น

งานวิจัยการออกแบบสร้างระบบวิเคราะห์ ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์แบบดิจิตอล คาดว่าประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยคือ

- สามารถใช้ระบบดังกล่าววิเคราะห์ผลลักษณะของรูปคลื่นแรงดันได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ผู้ทดสอบไม่ต้องเสียเวลาในการประมาณวัดและคำนวณ ซึ่งจะทำให้เวลาการทดสอบโดยรวมลดลง และเป็นการประหยัดไม่สิ้นเปลืองฟิล์มโพลาลอยด์เหมือนแบบแอนะล็อก

- สามารถใช้ระบบดังกล่าวทำการศึกษาผลกระทบของค่าองค์ประกอบในวงจรสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50  $\mu\text{sec}$  เช่นผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจาก การจัดระบบสายดินที่ไม่ดีพอ ซึ่งปกติจะไม่สามารถตรวจวัดได้โดยใช้ระบบแบบแอนะล็อก

- ในระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแบบดิจิตอล ทำให้ผู้วิจัยและพัฒนาสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในพัฒนา การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้

- ระบบการเชื่อมโยงแบบขนาน โดยใช้ GPIB เป็นระบบที่นำไปสู่การทำงานบนระบบที่ต้องการแบบอัตโนมัติ ทำให้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป เกี่ยวกับการพัฒนาระบบการตรวจวัดรูปคลื่น หรือการควบคุมอุปกรณ์ในการสร้างสัญญาณรบกวน พร้อมทั้งการตรวจจับและประเมินผลได้

## 7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยและออกแบบระบบวิเคราะห์ ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยใช้เครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป ซึ่งมีอัตราการสุ่มสัญญาณประมาณ 200 ล้านตัวอย่างในหนึ่งวินาที และมีแบนด์วิท 100 Mhz และมีจำนวนจุดสัญญาณต่อช่องเพียง 500 จุดนั้น เป็นจำนวนที่น้อยไปในการประมาณกราฟของรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบ เนื่องจากการตั้งค่าฐานเวลา 1 ค่า และต้องการให้ได้รายละเอียดทั้งเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น อาจทำให้รายละเอียดที่จะนำเสนอบนหน้าจอคอมพิวเตอร์มีจำนวนจุดน้อยเกินไป อีกประการหนึ่งก็คือจำนวนจุดที่ใช้แสดงภาพกราฟฟิกบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ก็นับเป็นปัจจัยเรื่องความละเอียดอีกประการหนึ่ง ถ้าจำนวนจุดข้อมูลที่ได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคปมีจำนวนจุดที่มากแล้ว จอภาพในการนำเสนอข้อมูลทางกราฟฟิกมีความละเอียดต่ำ ก็อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการอ่านหรือแสดงข้อมูลได้

ดังนั้นเพื่อให้ได้ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์แล้ว

ควรจะต้องมีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ ที่มีหน่วยความจำบอร์คอย่างน้อย 4 Mbyte และมีจอภาพที่มีความละเอียดสูง
- 2) เครื่องพิมพ์ที่สามารถพิมพ์ภาพได้ละเอียดอย่างน้อย 300 dpi
- 3) ดิจิตอลออสซิลโลสโคปที่มีจำนวนจุดข้อมูลต่อสัญญาณมากกว่า 10000 จุด และถ้ามีอัตราการเข้ารหัสสัญญาณดิจิทัลมากกว่า 8 บิต เช่น 12 บิตขึ้นไป จะทำให้ภาพกราฟฟิคที่ได้มีความละเอียดถูกต้องแม่นยำมากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### รายการอ้างอิง

1. IEC Publication No.76-3, 1980, Power Transformers, Part 3: Insulation levels and dielectric tests
2. วุฒิกิจ บุญสงวน, การทดสอบหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม, ปรินิพพานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
3. Dr. Strauss Catalogue, Elektronishche Mess- und Prueftechnik
4. Siemens Catalogue, Microcomputer System for Measuring and control for Impulse Test Systems, Siemen IMS 12-2.
5. HAEFELY Catalogue, High-Resolution Impulse Analysing System Type HIAS 740.
6. Greenwood, A., Electrical transients in power system. New York: John Wiley & son ,Inc., 1971.
7. IEC Publication No.60-2, 1973, High-Voltage Test Techniques,Part 2: Test Procedures
8. IEEE-std 4-1978, IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing
9. ANSI/IEEE C57.12.90-1993, Part 1: IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers
10. IEC Publication No.60-3, 1976. High-Voltage Test Techniques, Part 3 : Measuring Devices
11. สำรวัย สังข์สะอาด, เทคนิคการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า. ใน การประชุมทาง วิชาการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า. หน้า 14-1 - 14-24. กรุงเทพมหานคร: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2528
12. IEC Publication No.60-4, 1977, High-Voltage Test Techniques, Part 3 : Application guide for measuring devices.
13. ปรีชา คุ่มครอง, การออกแบบและสร้างมัลติเบิ้ลช็อบปีงแกปขนาด 400 kV, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
14. IEC Publication No.52, 1960, Recommendations for voltage measurement by means of sphere-gaps (one sphere earthed)
15. IEC Publication No.722, 1982, Guide to the Lightning Impulse and Switching Impulse Testing of Power Transformers and Reactors

16. มอก.384-2525, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง กระทรวง  
อุตสาหกรรม
17. Nakamura, S., Applied numerical methods in C. New Jersey: Prentice-Hall,Inc.,1993.
18. สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2527.
19. Becker, J., and Gates, S., C., Laboratory automation using the IBM PC. New Jersey:  
Prentice-Hall,Inc.,1989.
20. National Instruments, NI-488.2<sup>TM</sup> Software Reference Manual for MS-DOS. Texas ,  
1993
21. Instruments Division, Gould 400 Series : Remote control using IEEE 488.2 & RS 423  
operation manual. USA. Gould Electroics Ltd, 1991
22. Operating Instructions, Unit step generator USG 40, HAEFELY.
23. British Electricity Boards, Guide on Impulse Voltage Testing Power Transformers  
and Reactors
24. ANSI/IEEE C57.12.00-1993, General requirements for Liquid-Immersed Distribution,  
Power, and Regulating Transformers
25. ANSI/IEEE C57.98-1986, IEEE Guide for Transformer Impulse Tests

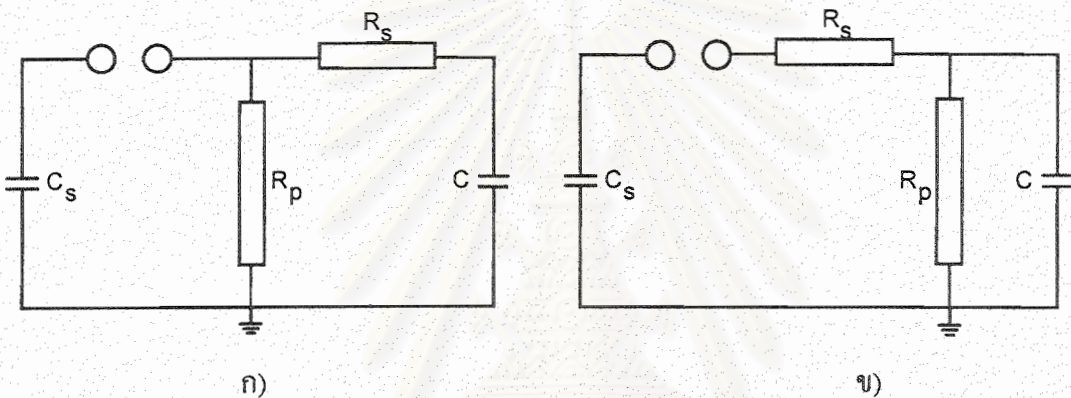


## ภาคผนวก ก.

## การปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบ

ความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ก.1 สำหรับหม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์สูง ( $L > 100 \text{ mH}$ ) [15]

รูปที่ ก.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน

เมื่อ  $C_s$  คือค่าความจุไฟฟ้าอัดประจุของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์

$C$  คือค่าความจุของโหลดรวม ซึ่งประกอบด้วยความจุไฟฟ้าของหม้อแปลง รวมค่าความจุไฟฟ้าของตัววัดแรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้ปรับรูปคลื่น

$R_s$  คือค่าความต้านทานอนุกรมรวม จากความต้านทานอนุกรมของ วงจรบวกกับความต้านทานอนุกรมภายนอกที่ใช้ปรับรูปคลื่น

$R_p$  คือค่าความต้านทานขนาน

ค่าคงตัวทางเวลาหน้าคลื่น สามารถคำนวณได้จากสมการ [12]

$$T_1 \approx 3 \cdot \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} \cdot \frac{C_g C}{C_g + C} \quad \text{ก.1}$$

และค่าคงที่ทางเวลาหางคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$T_2 \approx 0.7(R_s + R_p)(C_g + C) \quad \text{ก.2}$$

โดยปกติในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะมีค่า  $R_p$  มากกว่า  $R_s$  มาก ๆ และค่าความจุ  $C_g$  มากกว่า  $C$  มาก ๆ ทำให้สามารถลดรูปจากสมการที่ ก.1, ก.2 เป็น

$$T_1 \approx 3 \cdot R_s \cdot C \quad \text{ก.3}$$

$$T_2 \approx 0.7 \cdot R_p \cdot C_g \quad \text{ก.4}$$

สำหรับค่าคงที่ทางเวลาน้ำคลื่น  $C_t$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_t \approx C_B + \sqrt{C_s \cdot C_e} \quad \text{ก.5}$$

และค่าคงที่ทางเวลาหางคลื่น  $C_t$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_t \approx C_B + C_e \quad \text{ก.6}$$

เมื่อ  $C_B$  คือค่าความจุไฟฟ้าของปลอกถนวนนำสาย (bushing)

$C_s$  คือค่าความจุไฟฟ้าอนุกรมระหว่างขดลวด

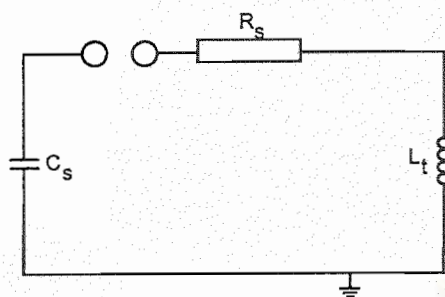
$C_e$  คือค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดเทียบกับดิน

สำหรับขดลวดที่มีค่าความเหนี่ยวนำยังผล  $L_t$  อยู่ในช่วง 20 mH ถึง 100 mH ค่าคงที่ทางเวลาในการคายประจุจะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ ก.7 โดยค่า  $R_p$  ที่ได้จะมีค่าประมาณ 2 ถึง 10 เท่าของค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ ก.4

$$\tau = R_p C_g \quad \text{ก.7}$$

ก.2 สำหรับหม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ( $L < 20$  mH)

สำหรับการปรับหน้าคลื่น อาศัยวิธีการเช่นเดียวกับหม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์สูง ส่วนการปรับค่าคงที่ทางเวลาช่วงหางคลื่น อุปกรณ์ทดสอบสามารถแสดงได้ด้วยค่าความเหนี่ยวนำยังผลดังแสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 วงจรการทดสอบหม้อแปลงที่มี  
อิมพีแดนซ์ต่ำ

ค่าความเหนี่ยวนำยังผลของหม้อแปลง และค่าความจุไฟฟ้าอัดประจุของเครื่องกำเนิดแรงดัน  
อิมพัลส์ตามสมการ

$$T_2 = \sqrt{0.5 \cdot L_t \cdot C_g} \quad \text{ก.8}$$

ค่าความเหนี่ยวนำยังผลของหม้อแปลง  $L_t$  จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการต่อขดลวดที่ไม่ได้รับการป้องกันแรงดันทดสอบ ถ้าลัดวงจรขดลวดที่ไม่ได้รับการป้องกันแรงดันทดสอบและต่อลงดิน ค่า  $L_t$  จะเป็นค่าความเหนี่ยวนำรั่ว (leakage inductance) ของหม้อแปลง และค่าความเหนี่ยวนำยังผลจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการต่อค่าความต้านทานให้กับขดลวดที่ไม่ได้รับการทดสอบ โดยมีข้อจำกัดอยู่ที่ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดที่ไม่ได้รับการทดสอบต้องมีค่าไม่เกิน 75 % ของค่าพิทกระดับแรงดันทดสอบ BIL ของขดลวดนั้น ๆ

ค่าความจุไฟฟ้า  $C_g$  ในวงจรเครื่องกำเนิดที่สามารถนำมาต่ออนุกรมหรือขนานกันของแต่ละชั้น จะต้องมามีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดตามสมการที่ ก.2

$$C_g \approx 2 \cdot \frac{T_2^2}{L_t} \quad \text{nF} \quad \text{ก.9}$$

เมื่อ  $T_2$  คือเวลาช่วงห่างคลื่นเป็น  $\mu\text{sec}$

$L_t$  คือความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงทดสอบเป็น mH

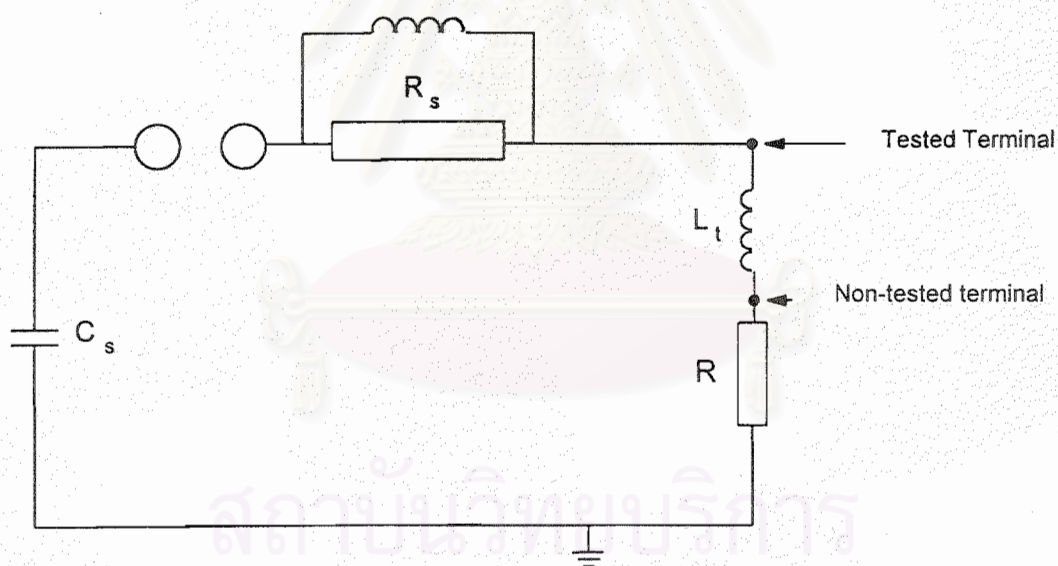
อย่างไรก็ตาม การทำการปรับแต่งค่า  $C_g$  อาจไม่สามารถทำได้ตามที่กำหนดในสมการที่ ก.2 ในกรณีที่หม้อแปลงมีค่า  $L_t$  ต่ำมาก ๆ อาจทำการเพิ่ม  $L_t$  ของหม้อแปลงได้โดยการเพิ่มค่าความต้านทานให้กับขดลวดที่ไม่ได้รับการป้องกันแรงดันทดสอบ (ค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดจะต้องมีค่าไม่เกิน 75 % ของค่า BIL ที่ขดลวดนั้น ๆ) ในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่ทดสอบมีค่าต่ำมาก ๆ จะทำให้ค่าคงตัวทางเวลาในการคายประจุของวงจรเป็น

$$\tau = \frac{L_t}{R_s}$$

ก.10

จากสมการที่ ก.10 จะเห็นได้ว่าการลดค่าความต้านทานอนุกรมในวงจร จะสามารถทำให้ค่าคงตัวทางเวลาทางคลื่นมีค่าเพิ่มมากขึ้น และในทำนองเดียวกันก็ทำให้ค่าคงตัวทางเวลาหน้าคลื่นมีค่าลดลง และเกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันตรงบริเวณท้ายของแรงดันด้วย ในกรณีนี้อาจต้องใช้  $C_L$  (load capacitor) เพื่อช่วยในการควบคุมค่าคงตัวทางเวลาหน้าคลื่น

ถ้ายังไม่สามารถปรับค่ารูปคลื่นแรงดันทางด้านทางคลื่นได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ก็ให้ทำการเพิ่มค่าความต้านทานในตำแหน่งของขั้วแรงดันที่ไม่ได้รับการทดสอบก่อนที่จะต่อลงดิน หรือการใส่ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมเพื่อเป็นการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำในวงจรตามรูปที่ ก.3 โดยมีเงื่อนไขแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดที่ไม่ได้รับการทดสอบต้องมีค่าไม่เกิน 75% ของค่า BIL



รูปที่ ก.3 รูปการต่อวงจรการทดสอบในกรณีที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ( $L_t < 20$  mH)

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายงานผลการทดสอบที่ได้จาก  
ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแบบดิจิทัล



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
 Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer  
 Page 1

Transformer information

Manufacturer : Tira-thai Date of Test : 16/4/1995  
 Customer : Tira-thai File name : 041607  
 Rated power = 160 kVA Serial No = 386007  
 System 22 kV BIL = 125 kV Standard applied : IEC

Result of testing  
 =====

Page	Phase	Name	Voltage	Current	File
1	-	Result of testing	-	-	-
2	-	Test circuit	-	-	CIRCUIT.DAT
2	A	WF	78.1	0.0	WAVEFORM.BIL
4	A	RFW_60%	77.5	18.2	041607A1.BIL
5	A	FW_100%	124.7	29.8	041607A2.BIL
6	A	FW_100%	124.4	29.7	041607A3.BIL
7	A	FW_100%	128.5	29.7	041607A4.BIL
8	B	RFW_60%	75.8	18.2	041607B1.BIL
9	B	FW_100%	124.7	29.8	041607B2.BIL
10	B	FW_100%	124.7	29.8	041607B3.BIL
11	B	FW_100%	128.6	29.7	041607B4.BIL
12	C	RFW_60%	75.4	18.3	041607C1.BIL
13	C	FW_100%	124.4	29.7	041607C2.BIL
14	C	FW_100%	128.5	29.7	041607C3.BIL
15	C	FW_100%	128.4	29.7	041607C4.BIL

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
 Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer  
 Page 2

Transformer information

Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

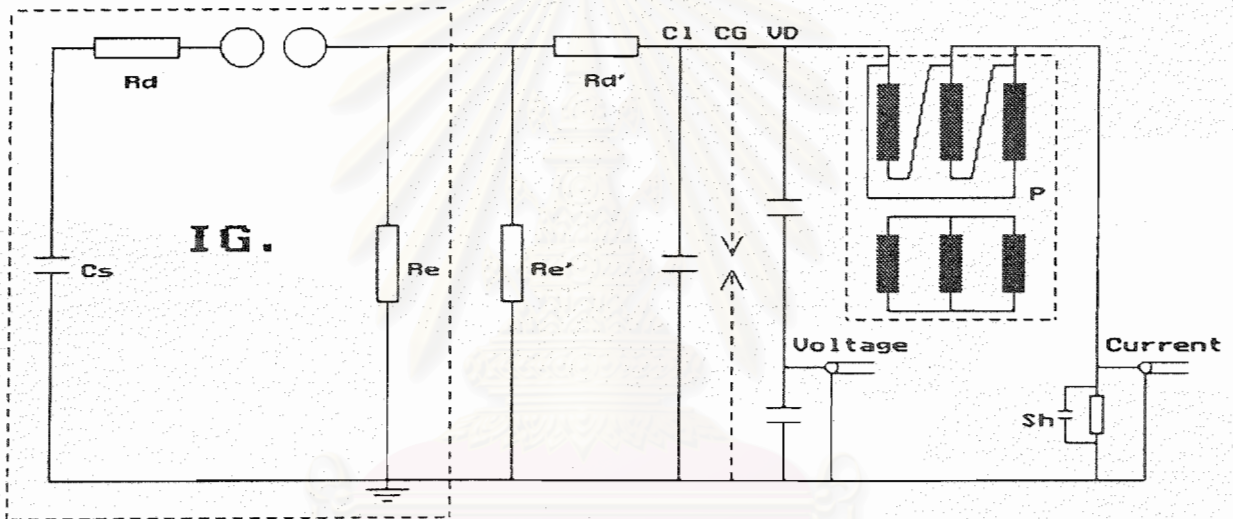


Fig 1 Test circuit of BIL test on power transformer

Impulse Generator = 400 kV 20 kWs 250 nF

Internal damping resistor = 48 ohms

External damping resistor = 150 ohms

Internal discharging resistor = 367 ohms

External discharging resistor = none ohms

Calibrated load capacitor = 1000 pF

Shunt Impedance , Resistor = 15.00 ohms

, Capacitor = none uF

P = Transformer under tested

VD = Impulse Capacitor Voltage Divider

CG = Chopping Gap for requirement of customer

Voltage = Voltage signal to chanal 1 of oscilloscope

Current = Current signal to chanal 2 of oscilloscope

TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

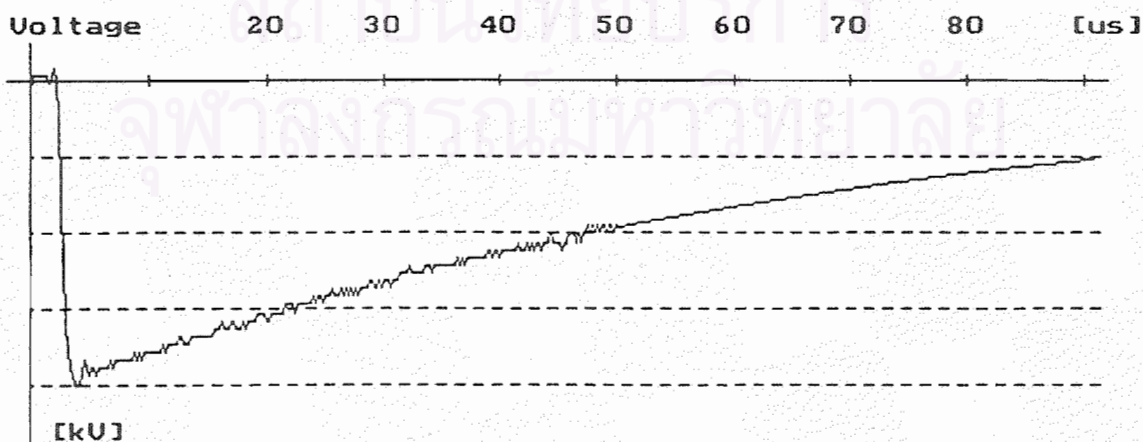
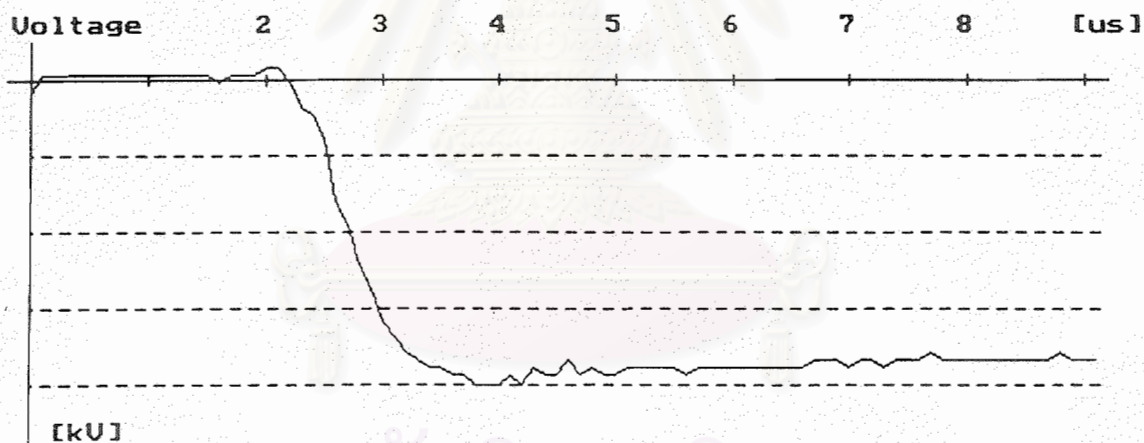
Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer  
Page 3

Transformer information

Manufacturer : Tira-thai Date of Test : 16/4/1995  
Customer : Tira-thai File name : 041607  
Rated power = 160 kVA Serial No = 386007  
System 22 kV BIL = 125 kV Standard applied : IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. : 1 on phase A < WF >  
Save in file : WAVEFORM.BIL  
Voltage ==> Maximum voltage : 78.1 kV Overshoot : 3.1 %  
Front time : 1.19 us Tail time : 48.2 us  
Chopped time : - us  
Current ==> Maximum current : 0.0 A Time : 0.0 us





TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer  
Page 4

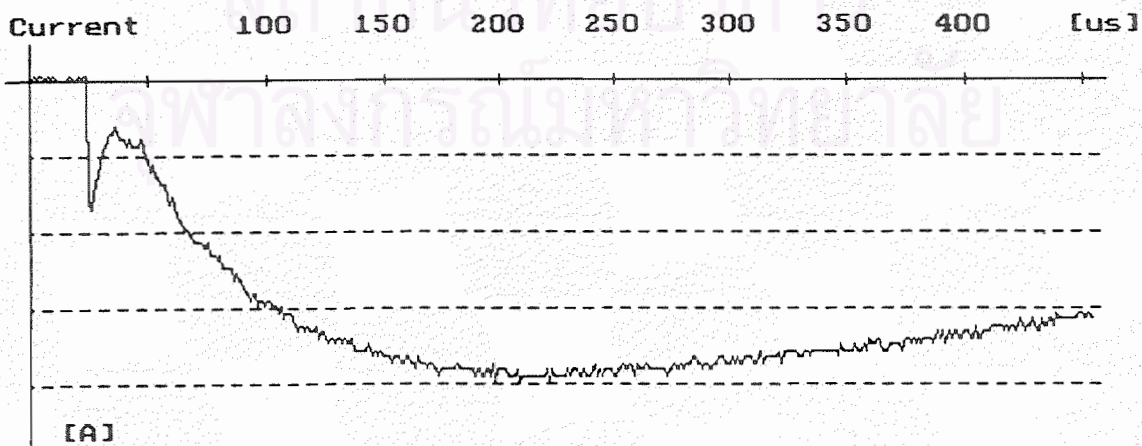
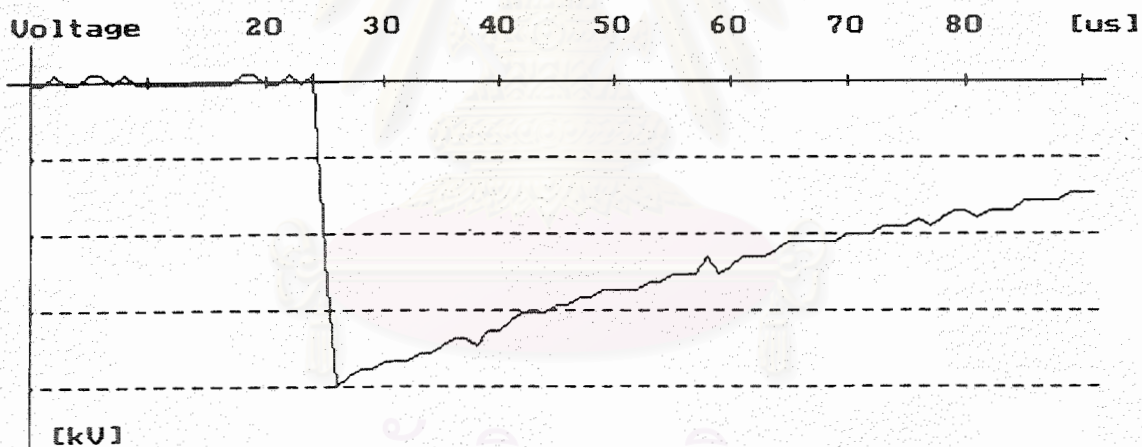
Transformer information

Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. : 2 on phase A < RFW\_60% >  
Save in file : 041607A1.BIL

Voltage ==>	Maximum voltage :	77.5 kV	Overshoot :	3.1 %
	Front time :	1.19 us	Tail time :	48.2 us
	Chopped time :	- us		
Current ==>	Maximum current :	18.2 A	Time :	173.0 us



TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

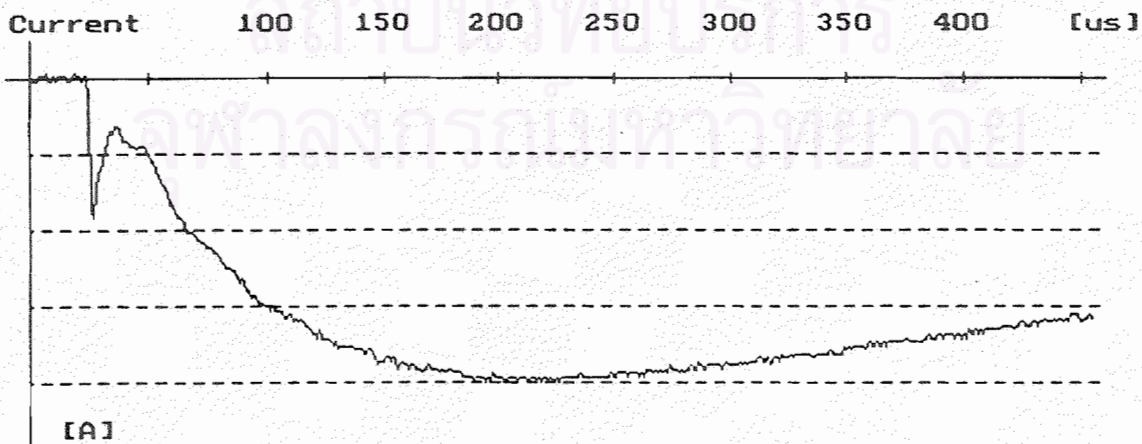
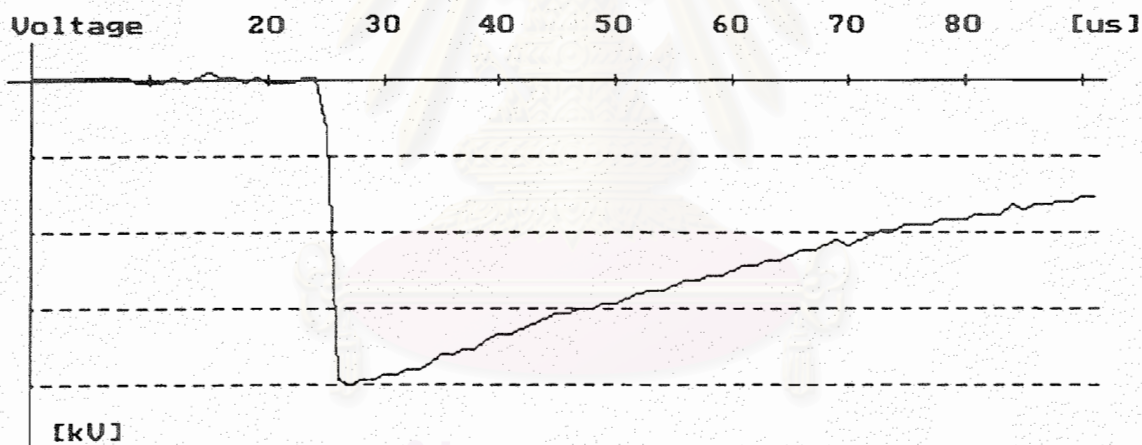
Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer

Transformer information

Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No	= 386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. :	3 on phase	A < FW_100% >		
Save in file :	041607A2.BIL			
Voltage ==>	Maximum voltage :	124.7 kV	Overshoot :	3.1 %
	Front time :	1.19 us	Tail time :	48.2 us
	Chopped time :	- us		
Current ==>	Maximum current :	29.8 A	Time :	164.0 us



TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer

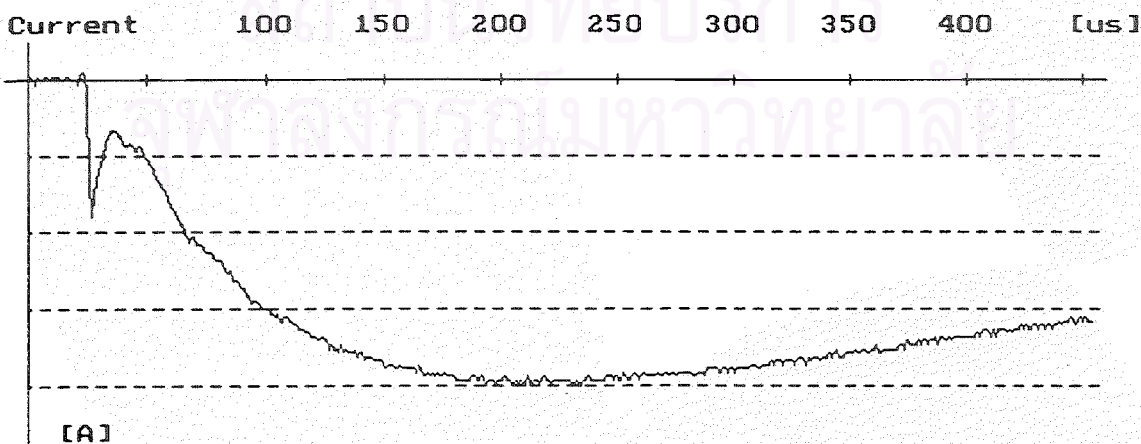
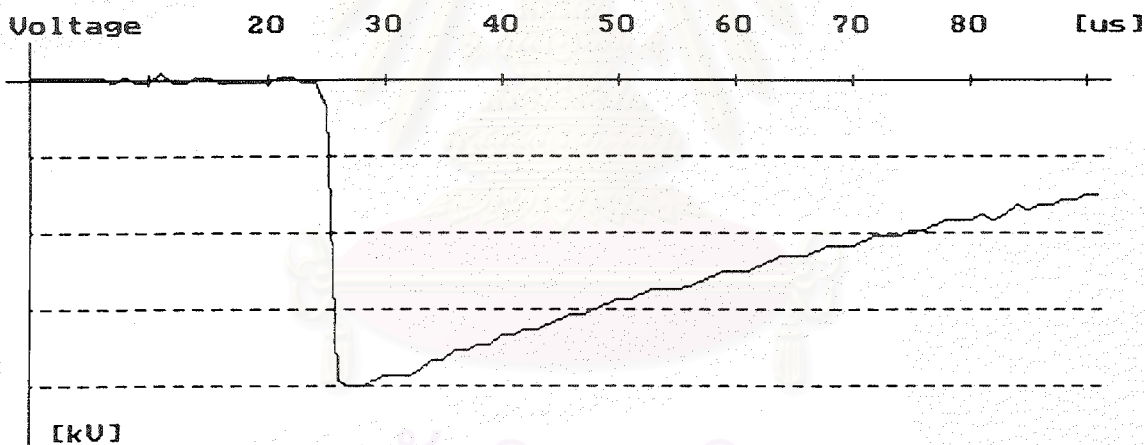
Page 6

Transformer information

Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. :	4 on phase	A < FW_100% >	
Save in file :	041607A3.BIL		
Voltage ==> Maximum voltage :	124.4 kV	Overshoot :	3.1 %
Front time :	1.19 us	Tail time :	48.2 us
Chopped time :	- us		
Current ==> Maximum current :	29.7 A	Time :	168.0 us



TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

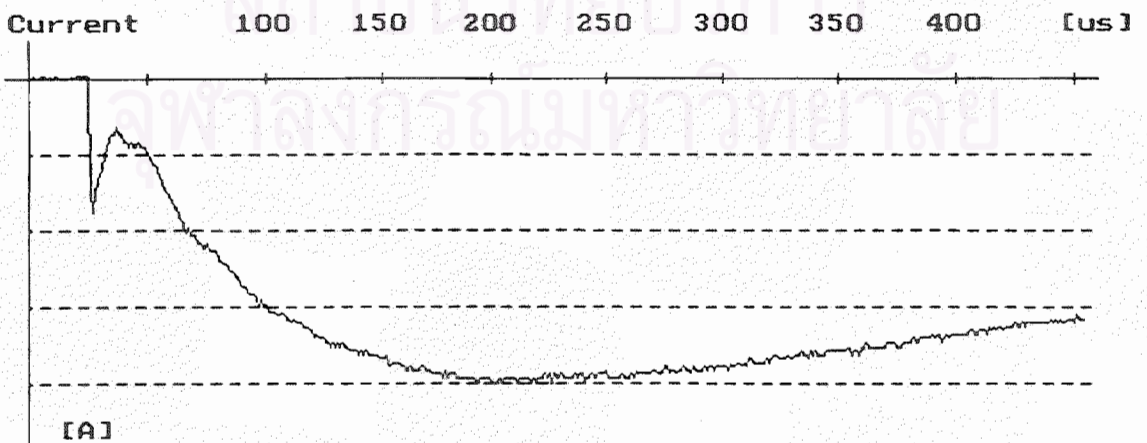
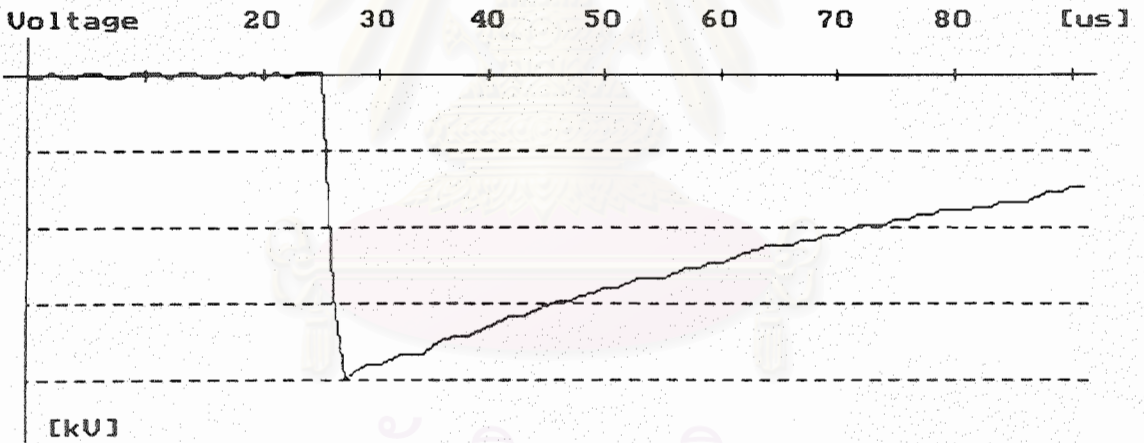
Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer  
Page 7

Transformer information

Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. :	5 on phase	A < FW_100% >
Save in file :	041607A4.BIL	
Voltage ==> Maximum voltage :	128.5 kV	Overshoot : 3.1 %
Front time :	1.19 us	Tail time : 48.2 us
Chopped time :	- us	
Current ==> Maximum current :	29.7 A	Time : 167.0 us



TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

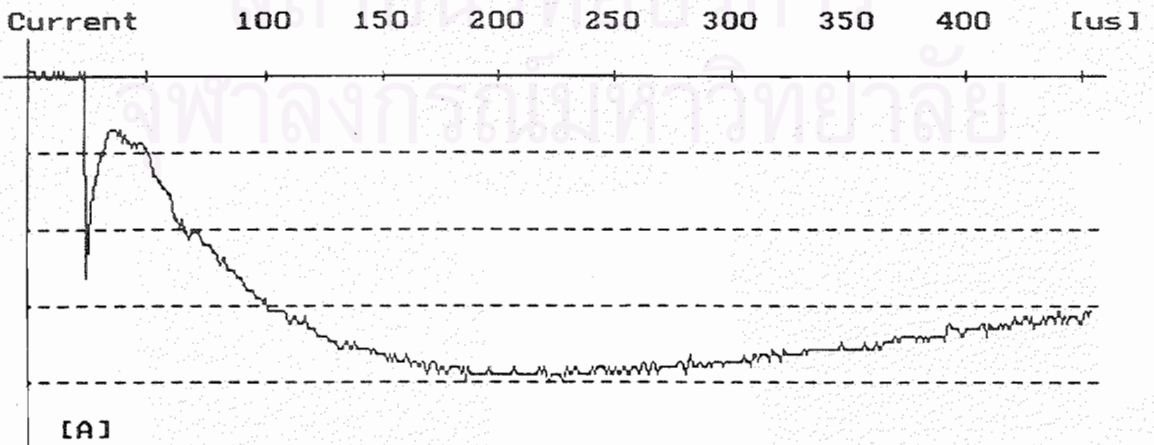
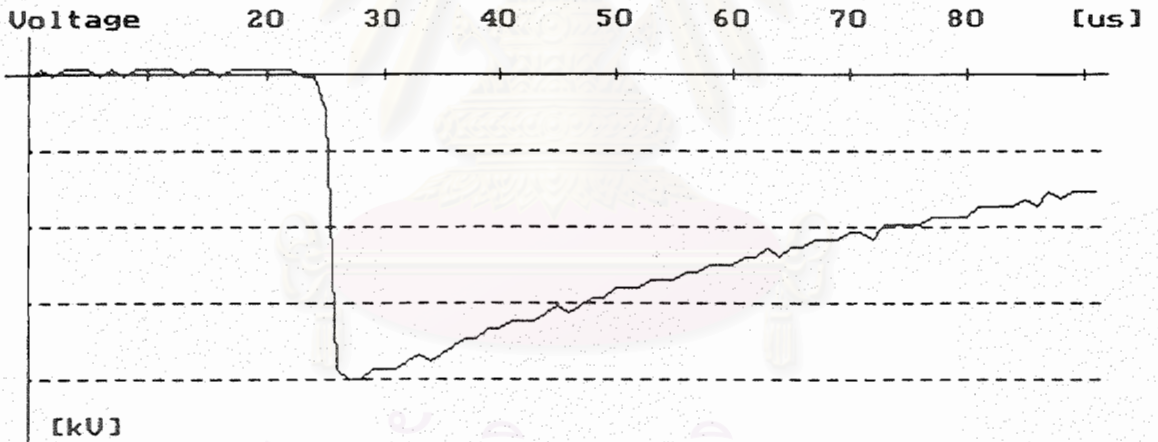
Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer  
Page 8

Transformer information

Manufacturer : Tira-thai Date of Test : 16/4/1995  
Customer : Tira-thai File name : 041607  
Rated power = 160 kVA Serial No = 386007  
System 22 kV BIL = 125 kV Standard applied : IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. : 6 on phase B < RFW\_60% >  
Save in file : 041607B1.BIL  
Voltage ==> Maximum voltage : 75.8 kV Overshoot : 3.1 %  
Front time : 1.19 us Tail time : 48.2 us  
Chopped time : - us  
Current ==> Maximum current : 18.2 A Time : 161.0 us



TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

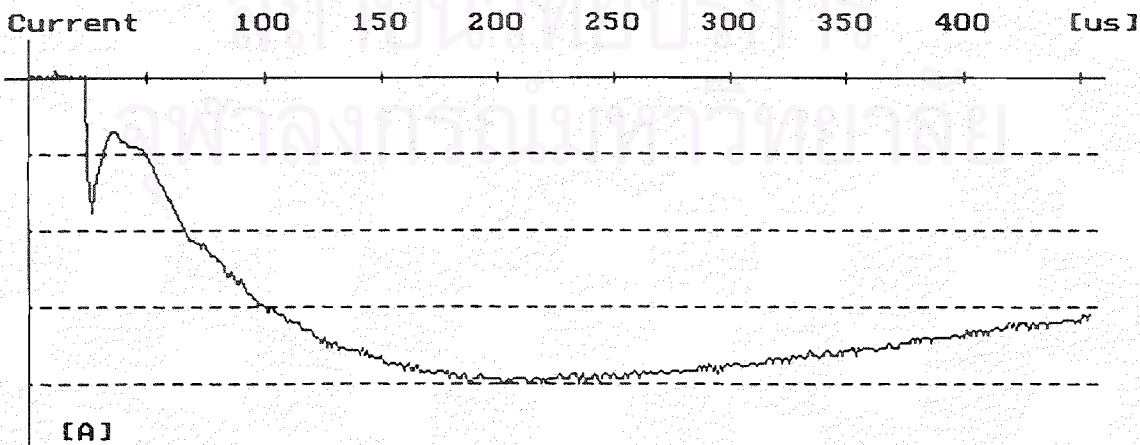
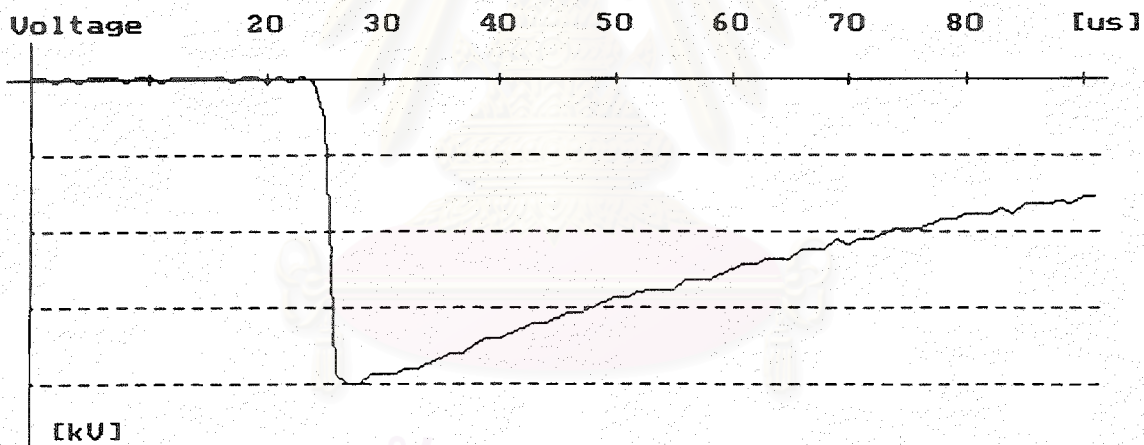
Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer  
Page 9

Transformer information

Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. :	7 on phase	B < FW_100% >		
Save in file :	041607B2.BIL			
Voltage ==>	Maximum voltage :	124.7 kV	Overshoot :	3.1 %
	Front time :	1.19 us	Tail time :	48.2 us
	Chopped time :	- us		
Current ==>	Maximum current :	29.8 A	Time :	163.0 us



TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

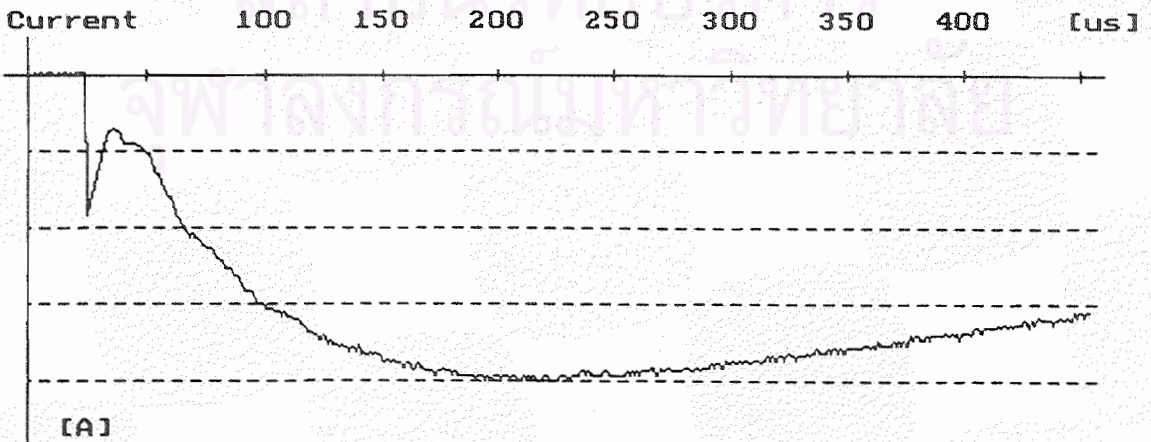
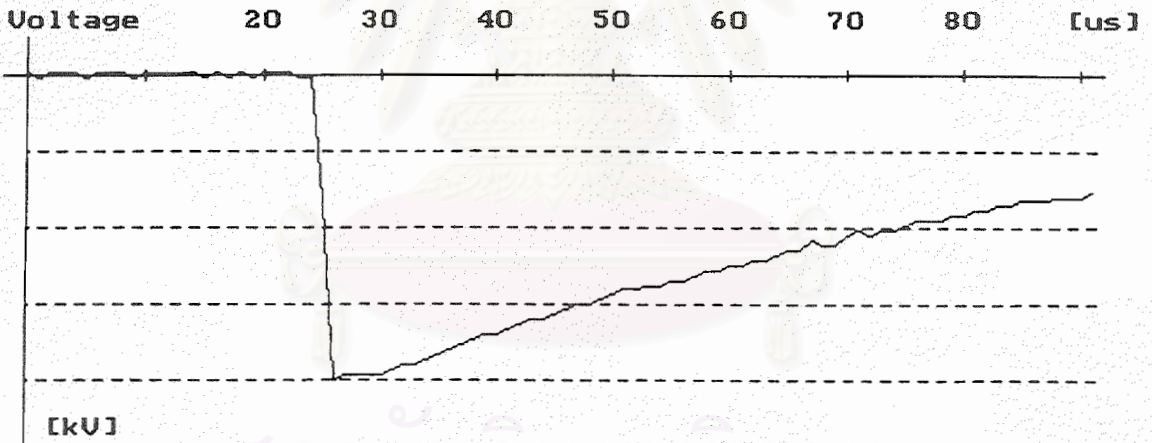
Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer  
Page 10

Transformer information

Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No	= 386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. :	8 on phase	B < FW_100% >		
Save in file :	041607B3.BIL			
Voltage ==>	Maximum voltage :	124.7 kV	Overshoot :	3.1 %
	Front time :	1.19 us	Tail time :	48.2 us
	Chopped time :	- us		
Current ==>	Maximum current :	29.8 A	Time :	166.0 us



TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

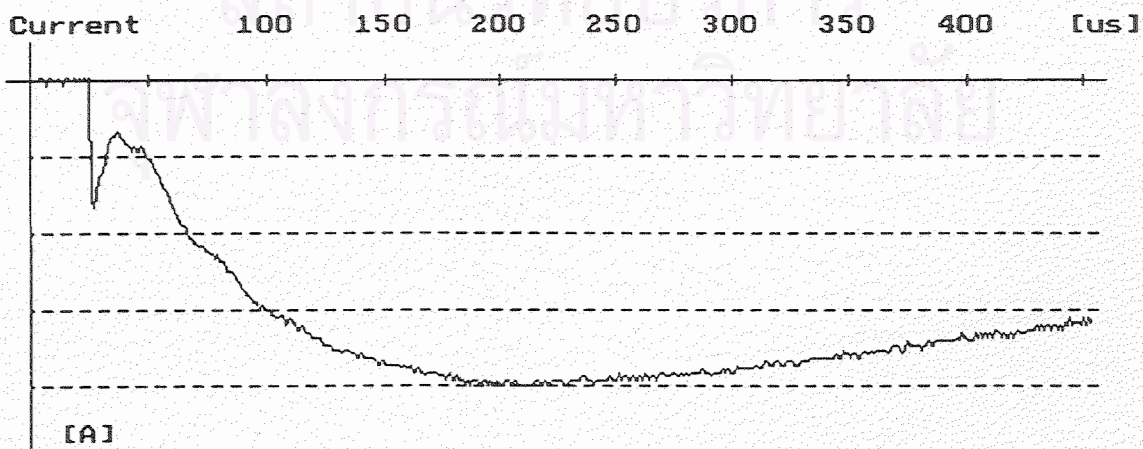
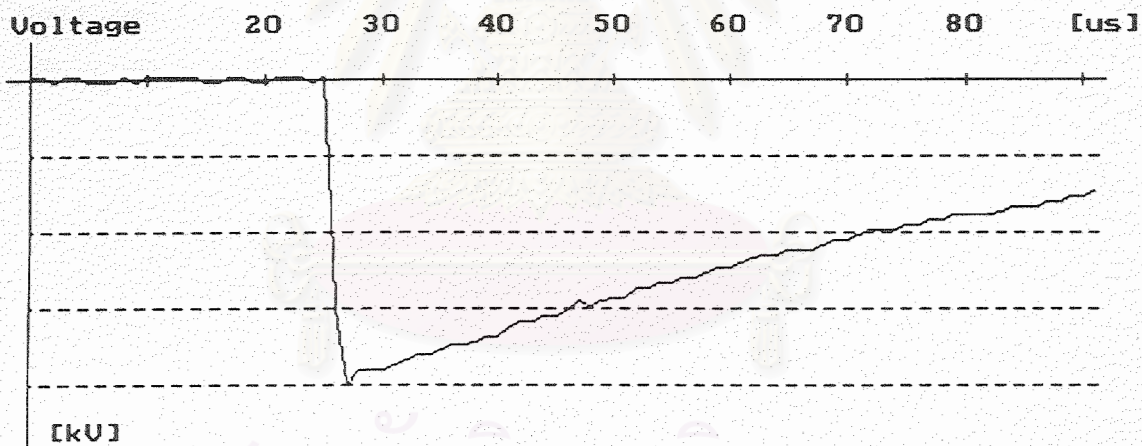
Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer  
Page 11

Transformer information

Manufacturer : Tira-thai Date of Test : 16/4/1995  
Customer : Tira-thai File name : 041607  
Rated power = 160 kVA Serial No = 386007  
System 22 kV BIL = 125 kV Standard applied : IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. : 9 on phase B < FW\_100% >  
Save in file : 041607B4.BIL  
Voltage ==> Maximum voltage : 128.6 kV Overshoot : 3.1 %  
Front time : 1.19 us Tail time : 48.2 us  
Chopped time : - us  
Current ==> Maximum current : 29.7 A Time : 159.0 us





TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer  
Page 12

Transformer information

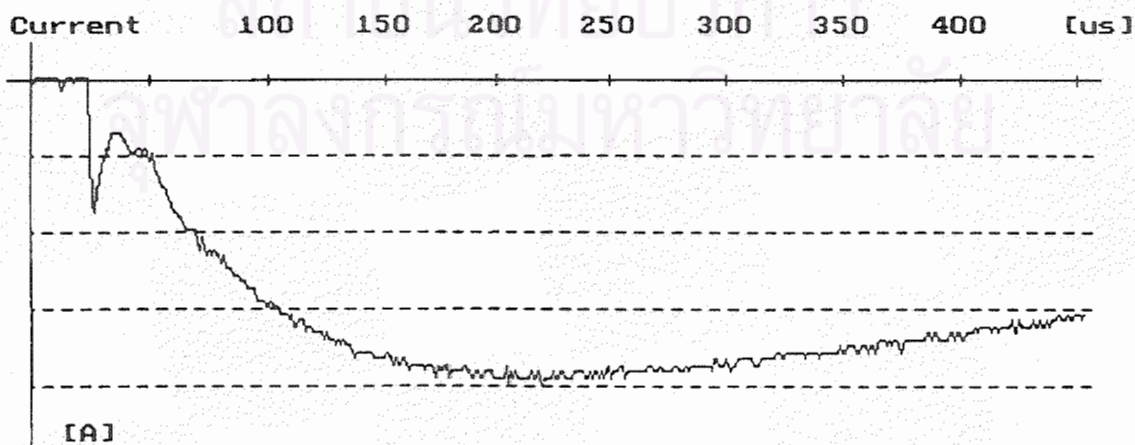
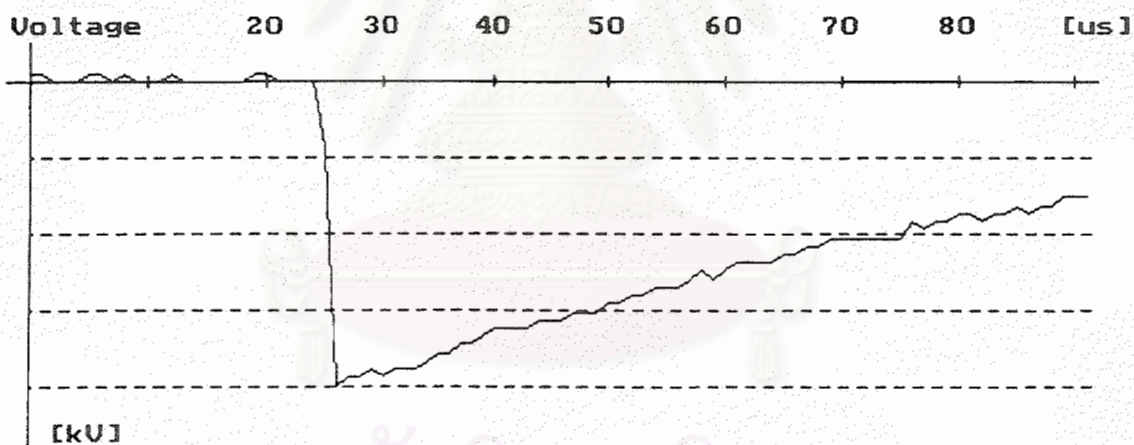
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. : 10 on phase C < RFW\_60% >

Save in file : 041607C1.BIL

Voltage ==>	Maximum voltage :	75.4 kV	Overshoot :	3.1 %
	Front time :	1.19 us	Tail time :	48.2 us
	Chopped time :	- us		
Current ==>	Maximum current :	18.3 A	Time :	181.0 us



TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer

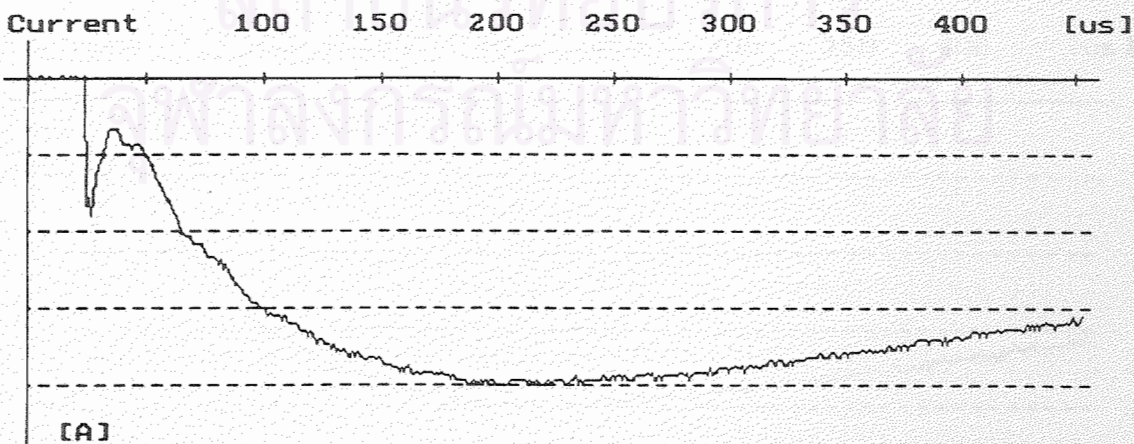
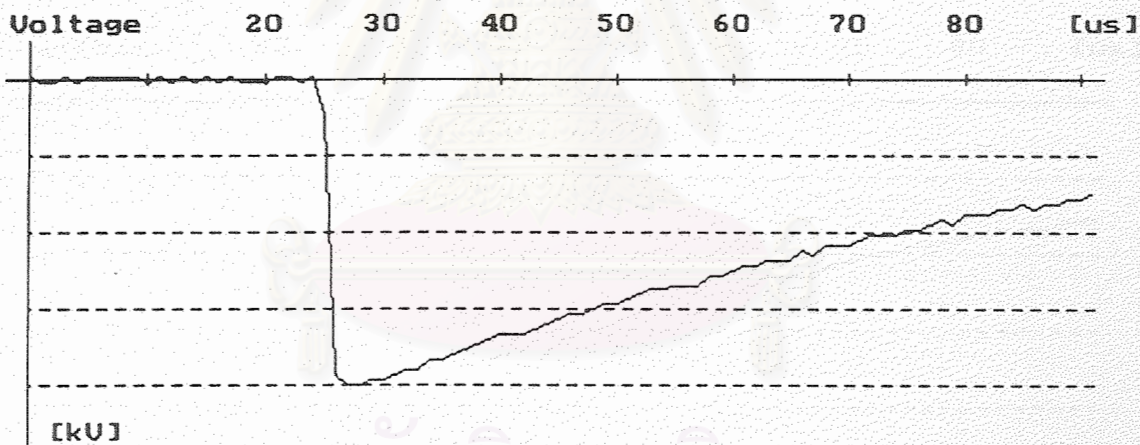
Page 13

Transformer information

Manufacturer : Tira-thai Date of Test : 16/4/1995  
Customer : Tira-thai File name : 041607  
Rated power = 160 kVA Serial No = 386007  
System 22 kV BIL = 125 kV Standard applied : IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. : 11 on phase C < FW\_100% >  
Save in file : 041607C2.BIL  
Voltage ==> Maximum voltage : 124.4 kV Overshoot : 3.1 %  
Front time : 1.19 us Tail time : 48.2 us  
Chopped time : - us  
Current ==> Maximum current : 29.7 A Time : 162.0 us



TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

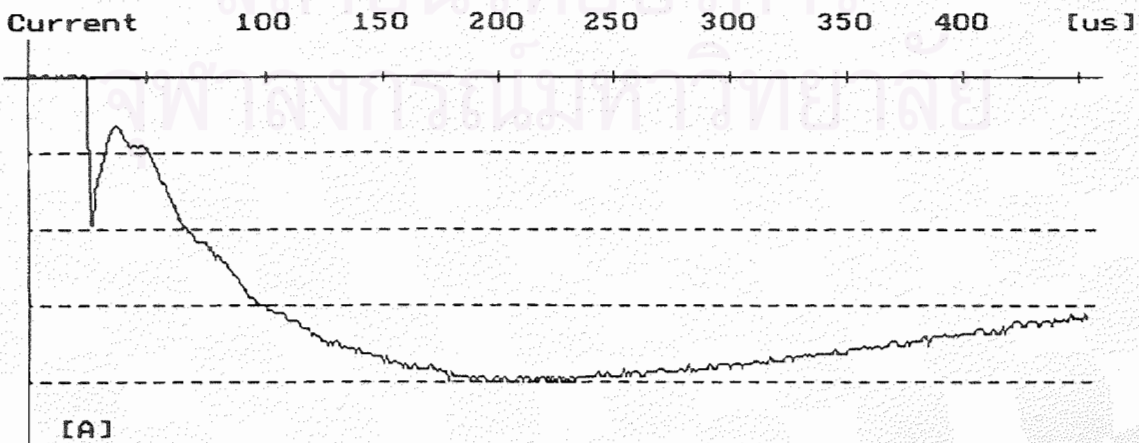
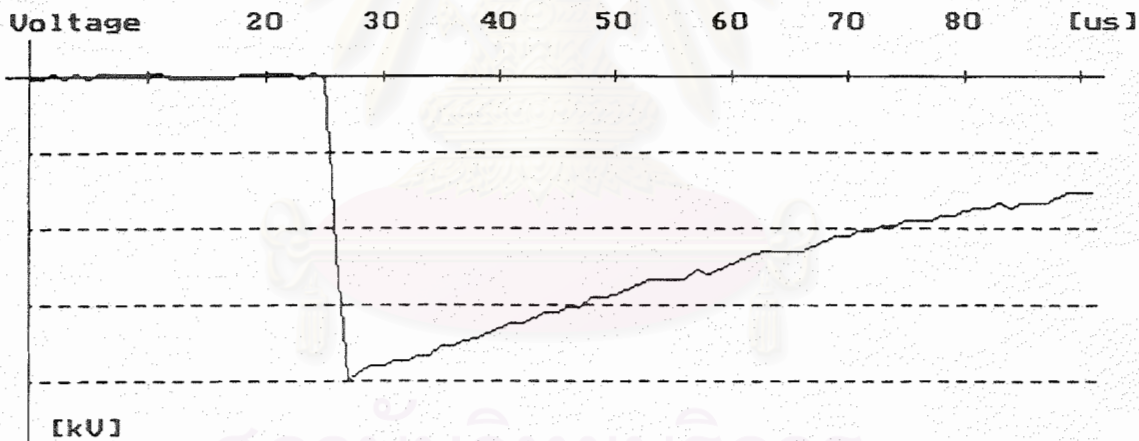
Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer  
Page 14

Transformer information

Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No	= 386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. :	12	on phase	C < FW_100% >
Save in file :	041607C3.BIL		
Voltage ==>	Maximum voltage :	128.5 kV	Overshoot : 3.1 %
	Front time :	1.19 us	Tail time : 48.2 us
	Chopped time :	- us	
Current ==>	Maximum current :	29.7 A	Time : 153.0 us



TEST REPORT

High-Voltage Research Laboratory of Chulalongkorn University  
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering

Digital Impulse Test Analysing System for Power Transformer

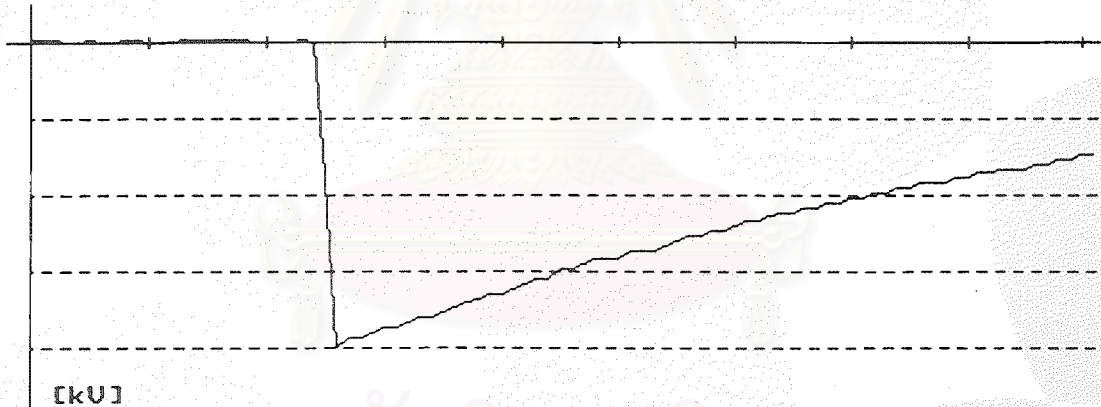
Transformer information

Manufacturer : Tira-thai Date of Test : 16/4/1995  
Customer : Tira-thai File name : 041607  
Rated power = 160 kVA Serial No = 386007  
System 22 kV BIL = 125 kV Standard applied : IEC

Characteristics of waveform

Oscillogram No. : 13 on phase C < FW\_100% >  
Save in file : 041607C4.BIL  
Voltage ==> Maximum voltage : 128.4 kV Overshoot : 3.1 %  
Front time : 1.19 us Tail time : 48.2 us  
Chopped time : - us  
Current ==> Maximum current : 29.7 A Time : 162.0 us

Voltage 20 30 40 50 60 70 80 [us]



Current 100 150 200 250 300 350 400 [us]

