รายการอ้างอิง

1. IEC Publication No.76-3, 1980, Power Transformers, Part 3: Insulation levels and dielectric tests
2. วุฒิกร บุณยสงวน, การทดสอบหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม, ปริญญานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
3. Dr. Strauss Cataloque, Elektronishche Mess- und Prueftechnik
4. Siemens Cataloque, Microcomputer System for Measuring and control for Impulse Test Systems, Siemen IMS 12-2.
5. HAEFELY Cataloque, 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. สำรวย สังข์สะอาด, เทคนิคการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า. ใน การประชุมทางวิชาการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า. 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 คุ้มครอง, การออกแบบและสร้างมัลติเปิลช็อปปิงแกปขนาด 400 kV, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, 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 กระทรวงอุตสาหกรรม

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™ 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

คำสั่งในการควบคุมด้วยระบบมาตรฐาน GPIB สำหรับการเขียนโปรแกรมภาษา C

คำสั่งที่ใช้ในการควบคุมการทำงานบนระบบมาตรฐาน GPIB ที่ทางบริษัท National Instrument ผู้ผลิต GPIB Board ได้พัฒนาขึ้น สามารถนำมาเขียนโปรแกรมภาษาสูงได้โดยใช้ภาษา Basic, QuickBasic หรือแม้แต่ภาษา C ซึ่งบรรจุคำสั่งเหล่านี้ในชุดคำสั่งของซอฟท์แวร์ที่ทางบริษัทแนบมาให้กับ GPIB Board เพื่อให้ผู้ที่ต้องการพัฒนาโปรแกรม สามารถนำมาใช้ได้ทันทีโดยไม่ต้องไปทำการเขียนคำสั่ง ภาษาเครื่อง (แอสแซมบลี) แต่อย่างใด

ในงานวิจัยการพัฒนาและออกแบบระบบการวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL นี้ได้ทำการพัฒนาขึ้นโดยใช้ภาษา C ซึ่งเป็นภาษาที่นิยมใช้กันค่อนข้างมาก และมีความเร็วในการประมวลผลสูงมีรูปแบบคำสั่งใกล้เคียงกับภาษาที่มนุษย์ใช้ ทำให้สามารถเข้าใจคำสั่งต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว

คำสั่งในการควบคุมการทำงานโดยย่อบนระบบ GPIB มาตรฐานสามารถดูได้จากชุดคำสั่งข้างล่างนี้ ส่วนรายละเอียดพร้อมคำอธิบายเต็มรูปแบบสามารถดูได้จากรายการอ้างอิง [5]

คำสั่งภาษา C ในการควบคุมการทำงานบนระบบมาตรฐาน GPIB

ก.1) AllSpoll — หมายถึง การขอรายงานสถานภาพของอุปกรณ์แบบอนุกรมจากทุกอุปกรณ์ที่กำหนด

รูปแบบของคำสั่ง
```
AllSpoll (board, addresslist[], resultlist[]);
```

ตัวอย่างการใช้
```
unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};
unsigned short resultlist[2];
AllSpoll (0, addresslist, resultlist);
```

ก.2) DevClear หมายถึง ทำการล้าง (clear) อุปกรณ์ที่ได้เลือกไว้

รูปแบบของคำสั่ง DevClear (board, address);

ตัวอย่างการใช้ DevClear (0,7);

ก.3) DevClearList หมายถึง ทำการล้าง (clear) ทุกอุปกรณ์ที่กำหนด

รูปแบบของคำสั่ง DevClearList (board, addresslist[]);

ตัวอย่างการใช้ unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};

DevClearList (0, addresslist);

ก.4) EnableLocal หมายถึง ให้อุปกรณ์สามารถควบคุมได้จากแผงควบคุมของอุปกรณ์

รูปแบบของคำสั่ง EnableLocal (board, addresslist[]);

ตัวอย่างการใช้ unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};

EnableLocal (0, addresslist);

ก.5) EnableRemote หมายถึง ให้อุปกรณ์นั้นสามารถควบคุมได้จากโปรแกรมในระบบมาตรฐาน GPIB

รูปแบบของคำสั่ง EnableRemote (board, addresslist[]);

ตัวอย่างการใช้ unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};

EnableRemote (0, addresslist);

ก.6) FindLstn หมายถึง ใช้หาผู้ฟังทั้งหมด โดยกำหนดจำนวนอุปกรณ์สูงสุดไว้ที่ limit

รูปแบบของคำสั่ง FindLstn (board, addresslist[], resultlist[], limit);

ตัวอย่างการใช้ unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};

unsigned short resultlist[2];

FindLstn (0, addresslist, resultlist, 5);

ก.7) FindRQS หมายถึง เพื่อหาว่าอุปกรณ์ใดที่ร้องขอบริการ

รูปแบบของคำสั่ง FindRQS (board, addresslist[], &result);

ตัวอย่างการใช้ unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};
unsigned short resultlist[2];
FindRQS (0, addresslist, &result);

ก.8) PassControll หมายถึง ย้ายการควบคุมไปที่อุปกรณ์อื่นที่มีความสามารถในการควบคุม

รูปแบบของคำสั่ ง PassControll (board, address);

ตัวอย่างการใช้ PassControll (0, 9);

ก.9) Ppoll หมายถึง เป็นการส่งรายงานสภาวะของอุปกรณ์แบบขนาน

รูปแบบของคำสั่ง Ppoll (board, &result);

ตัวอย่างการใช้ Ppoll (0, &result);

ก.10) PpollConfig หมายถึง กำหนดค่าให้อุปกรณ์เพื่อการควบคุมแบบขนาน เช่น ทำการกำหนดค่าอุปกรณ์หมายเลข 8 ให้ตอบสนองการควบคุมแบบขนานบนสายสัญญาณข้อมูลที่ 5 ด้วยการตรวจจับสัญญาณ 0 (กระตุ้นสัญญาณ และถ้า 1 ไม่มีสัญญาณกระตุ้น)

รูปแบบของคำสั่ง PpollConfig (board, address, dataline, sense);

ตัวอย่างการใช้ PpollConfig (0, 8, 5, 0);

ก.11) PpollUnconfig หมายถึง เลือกการกำหนดค่าให้อุปกรณ์เพื่อการควบคุมแบบขนาน

รูปแบบของคำสั่ง PpollUnconfig (board, addresslist[]);

ตัวอย่างการใช้ unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};
PpollUnconfig (0, addresslist);

ก.12) RcvRespMsg หมายถึง อ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ที่กำหนดที่อยู่เรียบร้อยแล้ว

รูปแบบของคำสั่ง RcvRespMsg (board, data[], count, termination);

ตัวอย่างการใช้ unsigned char data[100];

RcvRespMsg (0, data, 100, ' \n ');

ก.13) ReadStatusByte หมายถึง เพื่อรับรายงานสภาวะจากอุปกรณ์เดียว

รูปแบบของคำสั่ง ReadStatusByte (board, address, &result);

ตัวอย่างการใช้ unsigned short result;

ReadStatusByte (0, 8, &result);

ก.14) Receive หมายถึง อ่านข้อมูลจากอุปกรณ์บนระบบ GPIB

รูปแบบของคำสั่ง Receive(board,address,char[],count,termination);

ตัวอย่างการใช้ unsigned char data[100];

Receive (0, 8, data, 100, STOPend);

ก.15) ReceiveSetup หมายถึง เป็นคำสั่งเตรียมอุปกรณ์ที่กำหนดให้ส่งข้อมูล และเตรียมให้ GPIB board อ่านข้อมูลนั้น

รูปแบบของคำสั่ง ReceiveSetup (board, address);

ตัวอย่างการใช้ unsigned char message[100];

ReceiveSetup (0,7);

RcvRespMsg (0, message, 100, STOPend);

ก.16) ResetSys หมายถึง เป็นคำสั่งเริ่มต้นการทำงานของระบบ GPIB โดยทำการล้างระบบบัสข้อมูล ล้างข้อมูลทุกอุปกรณ์ และกำหนดให้อุปกรณ์ตั้งค่าใหม่

รูปแบบของคำสั่ง ResetSys (board, addresslist[]);

ตัวอย่างการใช้ unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};
ResetSys (0, addresslist);

ก.17) Send หมายถึง ส่งข้อมูลให้กับอุปกรณ์ GPIB ที่กำหนด
เพียงอุปกรณ์เดียว
รูปแบบของคำสั่ง Send (board, address, data[], count, eotmode);
ตัวอย่างการใช้ Send (0, 7, ":*IDN?;", 7L, NLend);
หมายเหตุ คำสั่งใน(" ") ขึ้นอยู่กับแต่ละอุปกรณ์

ก.18) SendCmds หมายถึง ส่งคำสั่งของ GPIB
รูปแบบของคำสั่ง SendCmds (board, commands[], count)
ตัวอย่างการใช้ SendCmds (0, "\x3F\x40\x28\x29\x40\x01", 6);

ก.19) SendDataBytes หมายถึง ส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ที่กำหนด
รูปแบบของคำสั่ง SendDataBytes (board, data[], eotmode);
ตัวอย่างการใช้ SendDataBytes (0, ":*IDN?;", 7L, NLend);

ก.20) SendIFC หมายถึง คำสั่งให้ล้างระบบ GPIB ด้วยคำสั่ง IFC
(Interface Clear)
รูปแบบของคำสั่ง SendIFC (board);
ตัวอย่างการใช้ SendIFC (0);

ก.21) SendList หมายถึง คำสั่งส่งข้อมูลให้กับหลายอุปกรณ์
รูปแบบของคำสั่ง SendList(board,addresslist[],data[],count,eotmode);
ตัวอย่างการใช้ unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};
SendList (0, addresslist, ":*IDN?;", 7L, NLend);

ก.22) SendLLO หมายถึง คำสั่งยกเลิกการทำงานที่อุปกรณ์ทั้งหมด
รูปแบบของคำสั่ง SendLLO (board);

ตัวอย่างการใช้ SendLLO (0);

ก.23) SendSetUp หมายถึง คำสั่งให้อุปกรณ์ที่ระบุพร้อมรับข้อมูลจากตัวควบคุม

รูปแบบของคำสั่ง SendSetUp (board, addresslist[]);

ตัวอย่างการใช้ SendSetUp(0,message[3],strlen(message[3]), NLend);

ก.24) SetRWLS หมายถึง กำหนดอุปกรณ์ที่ระบุในระบบการควบคุมระยะไกล

รูปแบบของคำสั่ง SetRWLS (board, addresslist[]);

ตัวอย่างการใช้ unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};
SetRWLS (0, addresslist);

ก.25) TestSRQ หมายถึง เพื่อตรวจสอบสภาวะปัจจุบันของสายสัญญาณ SRQ

รูปแบบของคำสั่ง TestSRQ (board, &result);

ตัวอย่างการใช้
```
short result;
TestSRQ (0, &result);
if (result == 1)
        { /* SRQ is asserted */ }
else
        { /* SRQ is not asserted */ }
```

ก.26) TestSys หมายถึง คำสั่งที่ให้อุปกรณ์ทำการตรวจสอบตัวเอง

รูปแบบของคำสั่ง TestSys (board, addresslist[], resultlist[]);

ตัวอย่างการใช้
```
unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};
unsigned short resultlist[2];
TestSys (0, addresslist, resultlist);
```

ก.27) Trigger หมายถึง คำสั่งเพื่อการกระตุ้น (trigger) อุปกรณ์เพียงอุปกรณ์เดียว

รูปแบบของคำสั่ง Trigger (board, address);

ตัวอย่างการใช้ Trigger (0,7);

ก.28) TriggerList หมายถึง เพื่อการกระตุ้นอุปกรณ์หลายอุปกรณ์

รูปแบบของคำสั่ง TriggerList (board, addresslist[]);

ตัวอย่างการใช้ unsigned short addresslist[3] = {7,8,NOADDR};

TriggerList (0, addresslist);

ก.29) WaitSRQ หมายถึง คำสั่งให้ตัวควบคุมรอจนกระทั่งอุปกรณ์ร้องขอบริการ

รูปแบบของคำสั่ง WaitSRQ (board, &result);

ตัวอย่างการใช้ short result;

WaitSRQ (0, &result);

ภาคผนวก ข

ข้อกำหนด และค่าเริ่มต้นของดิจิตอลออสซิลโลสโคป ที่ใช้ในงานวิจัย

ข.1 ข้อกำหนดของดิจิตอลออสซิลโลสโคป

ดิจิตอลออสซิลโลสโคปที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นของบริษัท Gould รุ่น 465 ซึ่งมีข้อกำหนดที่สำคัญดังนี้

ส่วนแสดงภาพ (display)

CRT	เป็นจอภาพขนาด 5 นิ้ว
Graticule	เส้นแบ่งช่องบนหน้าจอขนาด 8 x 10 ช่อง โดยมีความละเอียดย่อย 0.2 ช่อง
ความเข้ม	แยกการควบคุมความเข้มของเส้นแสดงสัญญาณ(trace) เส้นแบ่งช่อง และรายละเอียดของตัวเลข ออกจากกัน

ระบบการทำงานในแนวดิ่ง

มีช่องสัญญาณสมมาตรกัน 2 ช่องสัญญาณคือ ช่องสัญญาณที่ 1 (ch1) และช่องสัญญาณที่ 2 (ch2) รับสัญญาณได้โดยผ่านหัวต่อ BNC

ความไว	สามารถปรับได้ตั้งแต่ 2 mV ต่อช่อง ถึง 5 V ต่อช่อง
ความถูกต้อง	± 2.5 % ของค่าที่อ่าน ± 1 ระดับการแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอล (1/30 ของ 1 ช่อง)
การปรับความไว	สามารถปรับความไวได้ มากกว่า 2.5 ต่อ 1
ค่าอิมพีแดนซ์ป้อนเข้า	1 MΩ / 20pF
สัญญาณควบป้อนเข้า	DC-GND-AC

แบนด์วิดท์	DC 0 - 100 MHz
	AC 4 Hz -100 MHz
แรงดันป้อนเข้าสูงสุด	400 V DC หรือค่ายอดของแรงดัน AC

ระบบการทำงานแนวระดับ (สเกลเวลา)

อัตราการกวาดสัญญาณ	29 ระดับ

ความสามารถในการจับทรานเซียนต์

มีความสามารถจับทรานเซียนต์	250 ns/div to 50 s/div

อัตราการสุ่มสัญญาณซ้ำ

อัตราการสุ่มสัญญาณซ้ำ	100, 50, และ 25 ns/div
ความถูกต้องในการสุ่มสัญญาณ	± 0.01% ของเวลาสุ่ม

ระบบการเข้าสัญญาณทางดิจิตอล (Acquisition System)

อัตราการสุ่มสัญญาณสูงสุด	200 megasample/sec บนแต่ละช่องสัญญาณ
ความละเอียดของสัญญาณแนวดิ่ง	8 บิต
ความยาวข้อมูลที่บันทึก	501 จุดต่อช่องสัญญาณ

ข.2 ค่าเริ่มต้นหลังจากคำสั่งตั้งค่าใหม่ (reset)

ฟังก์ชัน	คำสั่ง	ค่าที่ตั้งไว้
Integrate scaling	CALCulate:INTegrate:SCALing	1(on)
Filter frequency	CALCulate:FILTer[GATE]:FREQuency:STOP	1
Limit testing mode	CALCulate:LIMit:MODE	CONTinous
limits testing	CALCulate:LIMit:STATe	OFF
Math destination	CALCulate:MATH:TRACe	REFerence
Post storage X shift	CALCulate:X[:POSition]	0
Post storage Y mag	CALCulate:Y:MAGNify	1
Post storage Y pos.	CALCulate:Y[:POSition]	0

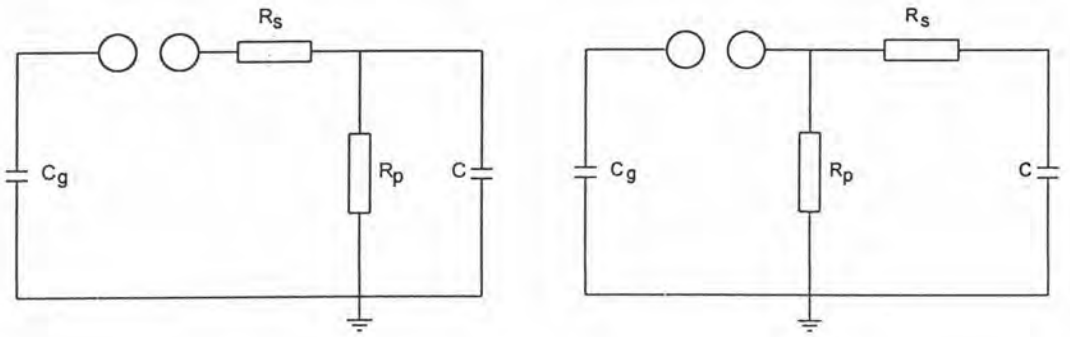
Auto calibrations	CALibration:AUTO	ON
Cursor position	DISPlay:CURSor[:POSition]	9
Cursor trace	DISPlay:CURSor:TRACe	TRACe1
Vertical datum pos.	DISPlay:DATum:X[:POSition]	0
Hor. datum pos.	DISPlay:DATum:Y[:POSition]	1
Holds	DISPlay:HOLD[12]	OFF
Limit trace display	DISPlay:LIMit	OFF
Measurement 1	DISPlay:MEASurement1	VTIMe
Measurement 2	DISPlay:MEASurement2	OFF
Measurement 3	DISPlay:MEASurement3	OFF
Trace/menu display	DISPlay:MENU[:NAME]	TRACes
Display mode	DISPlay:MODE	REFResh
Pulsewidth high ref.	DISPlay:PWIDTH[:REFerence]:HIGH	50
Pulsewidth low ref.	DISPlay:PWIDTH[:REFerence]:LOW	50
Reference trace	DISPlay:REFerence[:STATe]	OFF
Risetime high ref.	DISPlay:RTIMe[:REFerence]:HIGH	90
Risetime low ref.	DISPlay:RTIMe[:REFerence]:LOW	10
Graticule brightness	DISPlay[WINDow]:GRATicule:BRIGhtness	2
Text brightness	DISPlay[WINDow]:TEXT:BRIGhtness	8
Trace brightness	DISPlay[WINDow]:TRACe:BRIGhtness	8
Persistence cycles	DISPlay[WINDow]:TRACe:PERSistence:CYCLes	10
Persistence time	DISPlay[WINDow]:TRACe:PERSistence[:TIME]	0.5
Persistence mode	DISPlay[WINDow]:TRACe:PERSistence:MODE	OFF
X-Mag	DISPlay[WINDow]:TRACe:X:MAGNify	1
X Shift	DISPlay[WINDow]:TRACe:X[:SCALe]:CENTer	0
Data format	FORMat[:DATA]	ASCii
Initiate	INITiate:CONTinuous	OFF
Input coupling	INPut[12]:COUPling	AC
Input gain	INPut[12]:GAIN	1

Channel state	INPut[12][:STATe]	ON
Plot cursor	PLOT:CURSor	OFF
Plot graticule	PLOT:GRATicule[:STATe]	OFF
Plot graticule type	PLOT:GRATicule:TYPE	SOLid
Plot mode	PLOT:MODE	SINGle
Averaging count	SENSe:AVERage:COUNt	2
Averaging	SENSe:AVERage[:STATe]	OFF
Probe Gain	SENSe:CORRection[12]:GAIN[:INPut][:MAGNitude]	1
Sweep rate	SENSe:SWEep[:TIME]	100E-6
Add	SENSe[:VOLTage[12]][:DC]:ADD	OFF
Bandwidth limit	SENSe[:VOLTage[12]][:DC]:BLIMit	OFF
Maxmin	SENSe[:VOLTage[12]][:DC]:MMIN	OFF
Vertical shift	SENSe[:VOLTage[12]][:DC][:RANGe]:OFFset	0
PT peak	SENSe[:VOLTage[12]][:DC][:RANGe]:PTPeak	4E1
Uncal	SENSe[:VOLTage[12]][:DC][:RANGe]:UNCalibrate	OFF
Variable Gain	SENSe[:VOLTage[12]][:DC][:RANGe]:VARiable	1
Data transfer start pt.	TRACe:STARt	0
Data transfer stop pt.	TRACe:STOP	500
Trigger coupling	TRIGger:COUPling	AC
Trigger delay	TRIGger:DELay	0
Hf rej	TRIGger:FILTer[:LPASs][:STATe]	OFF
Trigger level	TRIGger:LEVEl	0
Trigger mode	TRIGger:MODE	AUTO
Pre trigger	TRIGger:PTRigger	0
Trigger slope	TRIGger:SLOPe	POSitive
Trigger source	TRIGger:SOURce	INTernal

ภาคผนวก ค.

การปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ค.1 สำหรับหม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์สูง (L > 100 mH) [15]



ก) ข)

รูปที่ ค.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน

เมื่อ C_s คือค่าความจุไฟฟ้าอัดประจุของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์

C คือค่าความจุของโหลดรวม ซึ่งประกอบด้วยความจุไฟฟ้าของหม้อแปลง รวมค่าความจุไฟฟ้าของตัววัดแรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้ปรับรูปคลื่น

R_s คือค่าความต้านทานอนุกรมรวม จากความต้านทานอนุกรมของวงจรบวกกับความต้านทานอนุกรมภายนอกที่ใช้ปรับรูปคลื่น

R_p คือค่าความต้านทานขนาน

ค่าคงตัวทางเวลาหน้าคลื่น สามารถคำนวณได้จากสมการ [12]

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

และค่าคงที่ทางเวลาหางคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

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

$$T_1 \approx 3 \cdot R_s \cdot C \qquad \text{ค.3}$$

$$T_2 \approx 0.7 \cdot R_p \cdot C_g \qquad \text{ค.4}$$

สำหรับค่าคงที่ทางเวลาหน้าคลื่น C_t สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_t \approx C_B + C_s \cdot C_e \qquad \text{ค.5}$$

และค่าคงที่ทางเวลาหางคลื่น C_t สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_t \approx C_B + C_e \qquad \text{ค.6}$$

เมื่อ C_B คือค่าความจุไฟฟ้าของปลอกฉนวนนำสาย (bushing)

C_s คือค่าความจุไฟฟ้าอนุกรมระหว่างขดลวด

C_e คือค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดเทียบกับดิน

สำหรับขดลวดที่มีค่าความเหนี่ยวนำยังผล L_t อยู่ในช่วง 20 mH ถึง 100 mH ค่าคงตัวทางเวลาในการคายประจุจะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ ค.7 โดยค่าค่า R_p ที่ได้จะมีค่าประมาณ 2 ถึง 10 เท่าของค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ ค.4

$$\tau = R_p C_g \qquad \text{ค.7}$$

ค.2 **สำหรับหม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ($L < 20$ mH)**

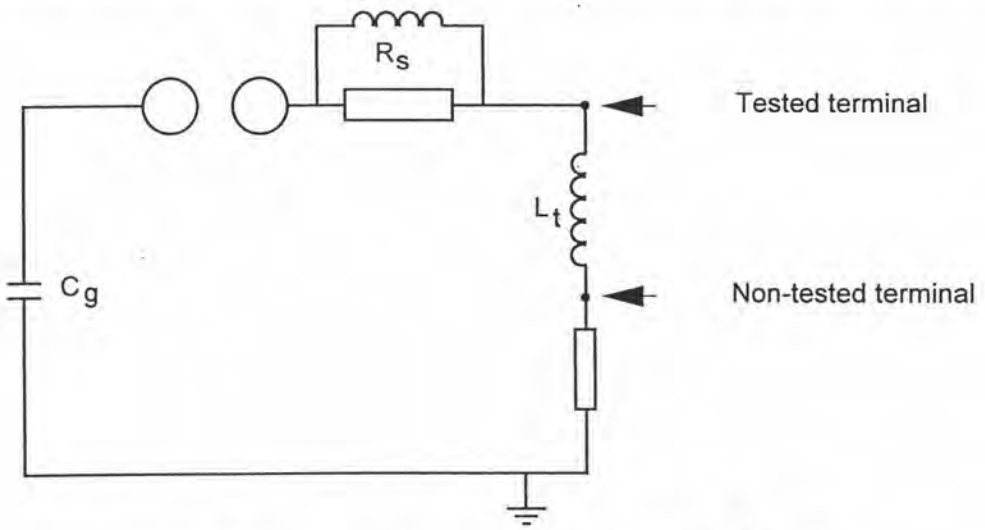
สำหรับการปรับหน้าคลื่น อาศัยวิธีการเช่นเดียวกับหม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์สูง ส่วนการปรับค่าคงที่ทางเวลาช่วงหางคลื่น อุปกรณ์ทดสอบสามารถแสดงได้ด้วยค่าความเหนี่ยวนำยังผลดังแสดงในรูปที่ ค.2

สมการที่ ค.2 ในกรณีที่หม้อแปลงมีค่า L_t ต่ำมาก ๆ อาจทำการเพิ่ม L_t ของหม้อแปลงได้โดยการเพิ่มค่าความต้านทานให้กับขดลวดที่ไม่ได้รับการป้อนแรงดันทดสอบ(ค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดจะต้องมีค่าไม่เกิน 75 % ของค่า BIL ที่ขดลวดนั้น ๆ) ในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่ทดสอบมีค่าต่ำมาก ๆ จะทำให้ค่าคงตัวทางเวลาในการคายประจุของวงจรเป็น

$$\tau = \frac{L_t}{R_s} \qquad \text{ค.10}$$

จากสมการที่ ค.10 จะเห็นได้ว่าการลดค่าความต้านทานอนุกรมในวงจร จะสามารถทำให้ค่าคงตัวทางเวลาหางคลื่นมีค่าเพิ่มมากขึ้น และในทำนองเดียวกันก็ทำให้ค่าคงตัวทางเวลาหน้าคลื่นมีค่าลดลง และเกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันตรงบริเวณค่ายอดของแรงดันด้วย ในกรณีนี้อาจต้องใช้ C_L (load capacitor) เพื่อช่วยในการควบคุมค่าคงตัวทางเวลาหน้าคลื่น

ถ้ายังไม่สามารถปรับค่ารูปคลื่นแรงดันทางด้านหางคลื่นได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ก็ให้ทำการเพิ่มค่าความต้านทานในตำแหน่งของขั้วแรงดันที่ไม่ได้รับการทดสอบก่อนที่จะต่อลงดิน หรือการใส่ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมเพื่อเป็นการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำในวงจรตามรูปที่ ค.3 โดยมีเงื่อนไขแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดที่ไม่ได้รับการทดสอบต้องมีค่าไม่เกิน 75% ของค่า BIL



รูปที่ ค.3 รูปการต่อวงจรการทดสอบในกรณีที่หม้อแปลง
มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ (L_t < 20 mH)

ภาคผนวก ง.

ส่วนของโปรแกรมในการแปลงรหัสข้อมูล
จากแอสกี้เป็นเลขฐานสิบ

เนื่องจากข้อมูลที่ได้จาก ดิจิตอลออสซิลโลสโคป เป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของข้อมูลรหัสแอสกี้ ไม่สามารถที่จะทำการคำนวณได้โดยตรง จึงต้องทำการแปลงรหัสข้อมูลดังกล่าวให้เป็นข้อมูลเลขฐานสิบ

ส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการแปลงข้อมูลนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

```
1   void data_change2(unsigned char buff[2521],long ibcntl) {
2   int i,j,k,l;
3   int raw[3];
4   float dat[501];
5
6   j = 0;k = 0;
7   for (i=0;i<501;i++)
8           dat[i] = 0;
9   for (j = 0; j < 3; j++)
10          raw[j] = 0;
11
12  for (i = 0; i <= ibcntl ; i++) {
13          switch (buff[i]) {
14                  case '0' : raw[j] = 0; j+=1; break;
15                  case '1' : raw[j] = 1; j+=1; break;
16                  case '2' : raw[j] = 2; j+=1; break;
```

```
17                  case '3' : raw[j] = 3; j+=1; break;
18                  case '4' : raw[j] = 4; j+=1; break;
19                  case '5' : raw[j] = 5; j+=1; break;
20                  case '6' : raw[j] = 6; j+=1; break;
21                  case '7' : raw[j] = 7; j+=1; break;
22                  case '8' : raw[j] = 8; j+=1; break;
23                  case '9' : raw[j] = 9; j+=1; break;
24                  default  : dat[k] = 0;
25                          for (l = 0; l < j; l++)
26                                  dat[k] += raw[l]*pow(10,j-1-l);
27                          k = k+1;
28                          j = 0;
29                          for (j = 0; j < 3; j++)
30                                  raw[j] = 0;
31                          break;
32                  }
33          }
34  };
```

ส่วนของโปรแกรมนี้สามารถอธิบายการทำงานได้โดยใช้ตัวอย่างต่อไปนี้

สมมติว่าข้อมูลที่ได้จาก ดิจิตอลออสซิลโลสโคป ซึ่งเป็นรูปแบบของรหัสแอสกี้เป็น 49 50 51 44 51 52 44 เทียบเท่ากับ 123,34, ในเลขฐานสิบ มีค่าตัวแปร ibcntl = 7 และมีตัวแปร buffer = {49,50,51,44,51,52,44}

เมื่อข้อมูลดังกล่าวผ่านส่วนของโปรแกรมตั้งแต่บรรทัดที่ 13 ถึง 23 จนถึงข้อมูลตัวที่ 3จะสามารถทำให้ได้ตัวแปร raw = {1,2,3)} , j = 3 และ k = 0 โปรแกรมจะทำงานที่บรรทัดที่ 24 เนื่องจากค่าที่อ่านได้ไม่ใช่ตัวเลข โดยในที่นี้มีค่าเท่ากับ "," ทำให้สามารถได้ค่าตัวแปร

$$dat[0] = 1*10^2 + 2*10 + 3 = 123$$

เมื่อได้ข้อมูล dat[0] แล้วจะทำการตั้งค่าตัวแปร raw และ j ให้เท่ากับ 0 เพื่อเตรียมรับค่าใหม่

หลังจากนั้นเมื่ออ่านข้อมูลต่อมาจนถึงข้อมูลตัวที่ 6 ซึ่งไม่ใช่ตัวเลขอีก ส่วนของโปรแกรมบรรทัดที่ 24 จะทำงานอีกครั้ง โดยมีตัวแปร raw = {3,4} , j = 2 และ k = 1 ทำให้ได้ค่า

$$dat[1] = 3*10 + 4 = 34$$

ตามข้อมูลที่ได้รับจริงจาก ดิจิตอลออสซิลโลสโคป จะมีจำนวนทั้งหมด 501 ข้อมูลต่อ 1 สัญญาณ์ที่ตรวจรับ และจะทำให้ได้ข้อมูลในตัวแปร dat มีขนาดเท่ากับ 501 ข้อมูลด้วย โดยส่วนของโปรแกรมจะทำงานไปจนกระทั่งมีการตรวจสอบเงื่อนไขตามบรรทัดที่ 12

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างรายงานผลการทดสอบที่ได้จาก ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแบบดิจิตอล

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

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

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

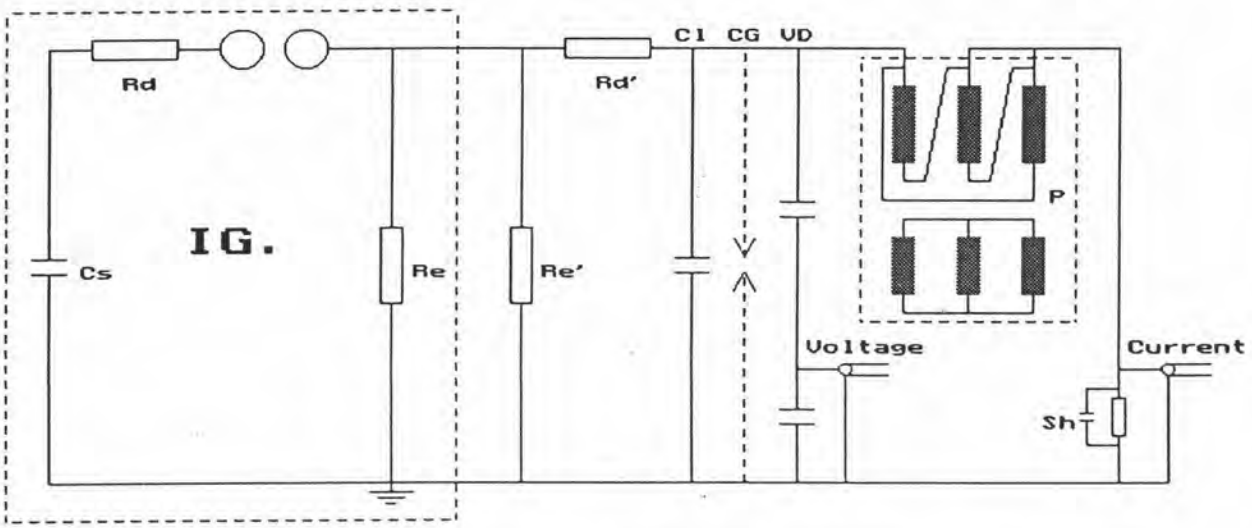


Fig 1 Test circuit of BIL test on power transformer

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 capacior	=	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

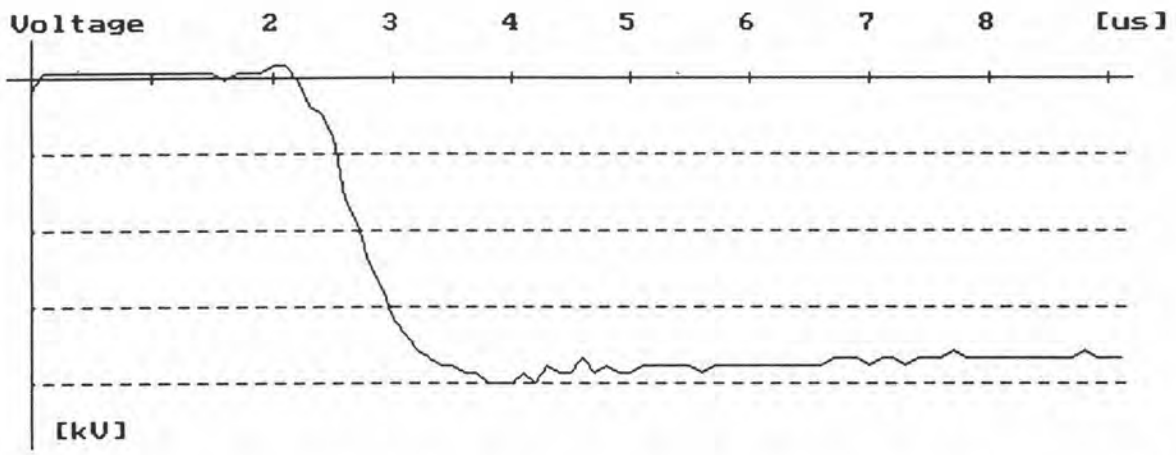
Transformer information

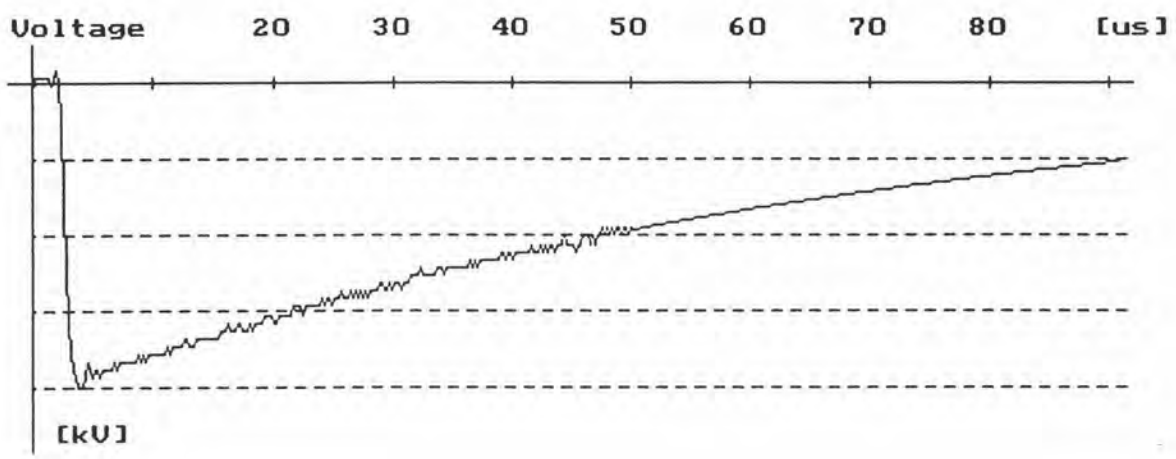
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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

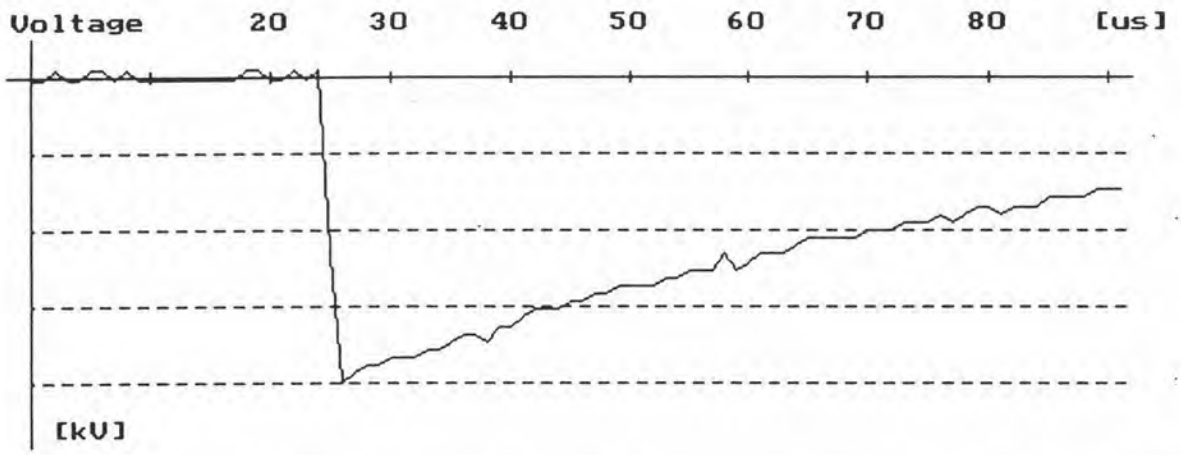
Transformer information

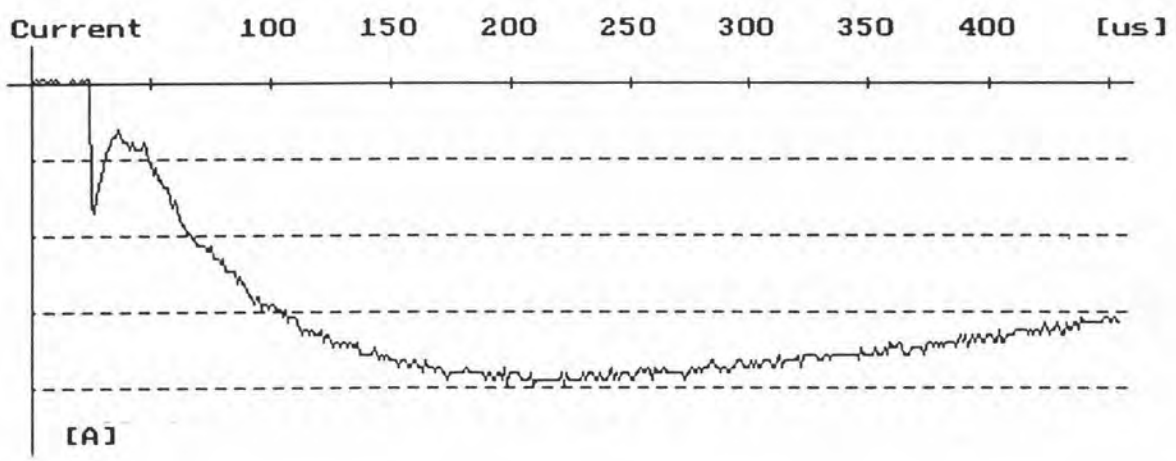
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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
Page 5

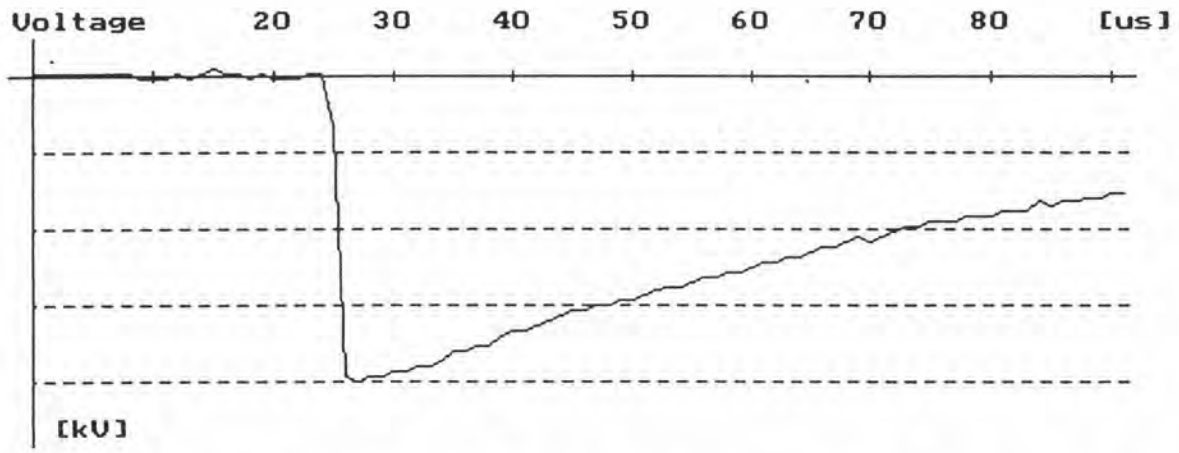
Transformer information

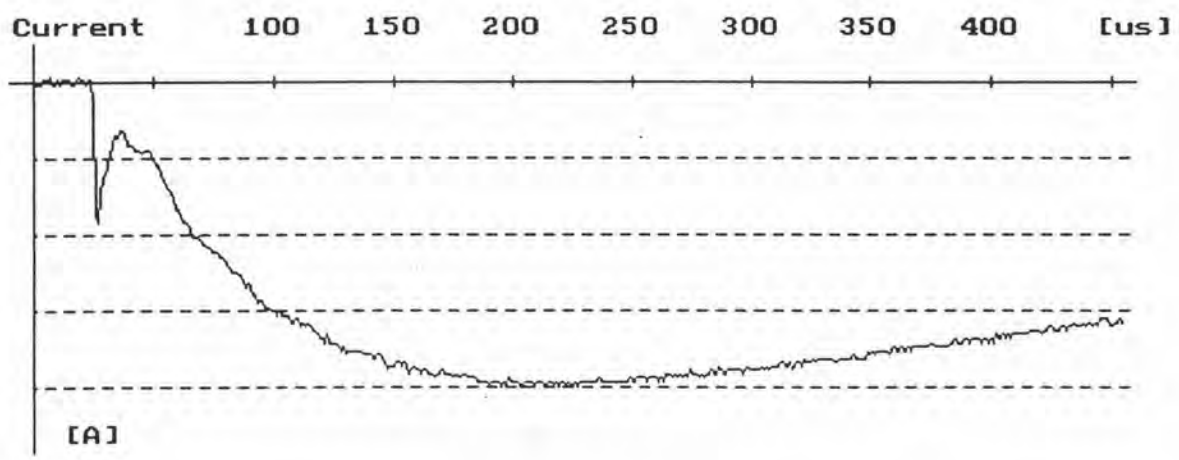
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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

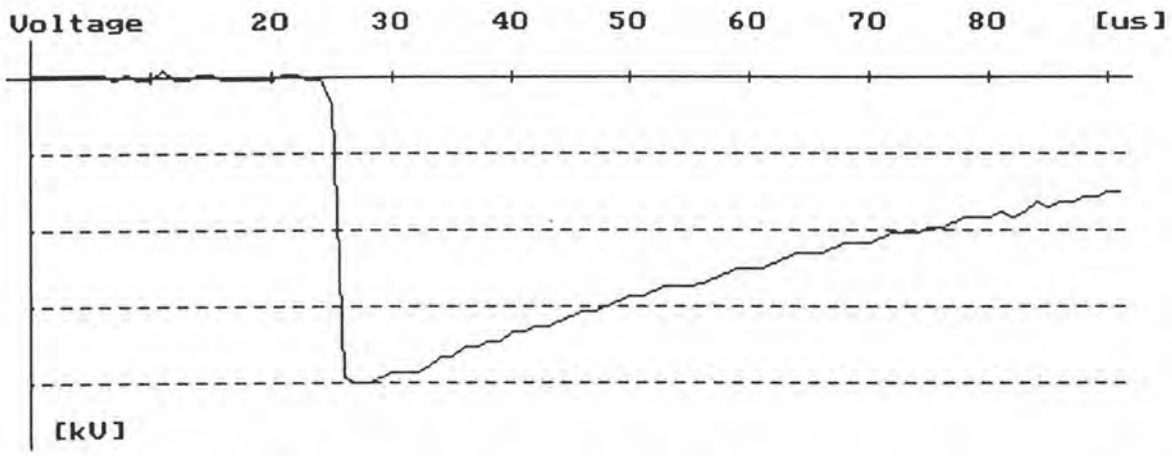
Transformer information

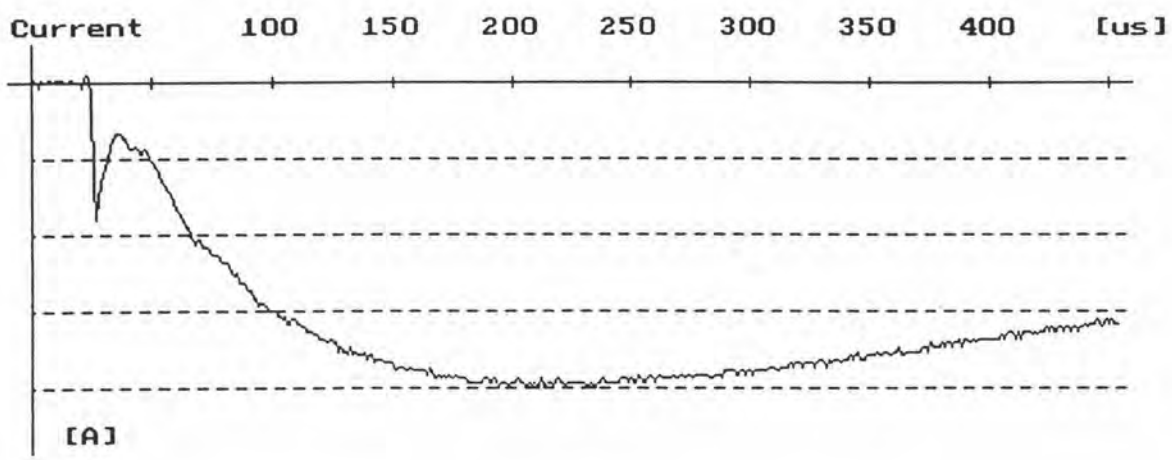
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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

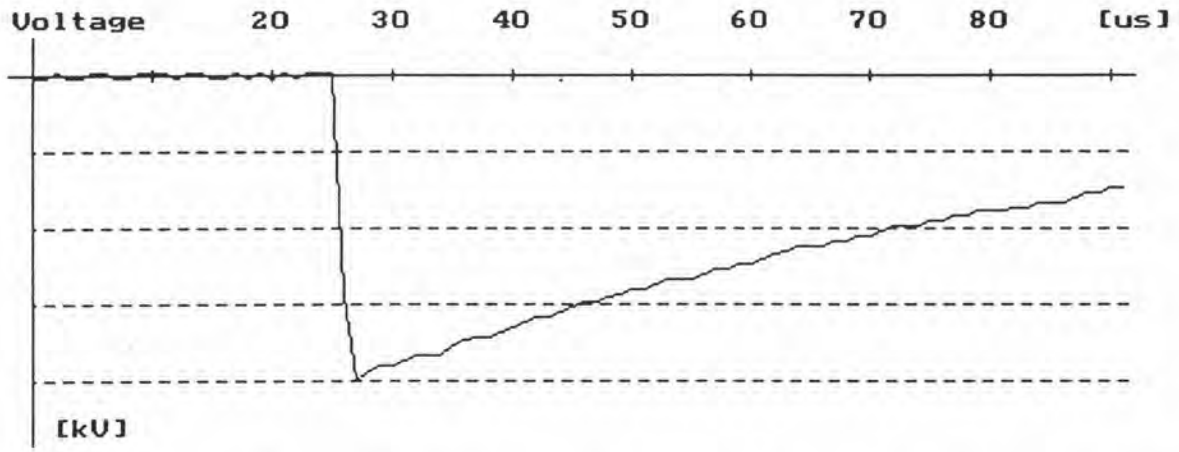
Transformer information

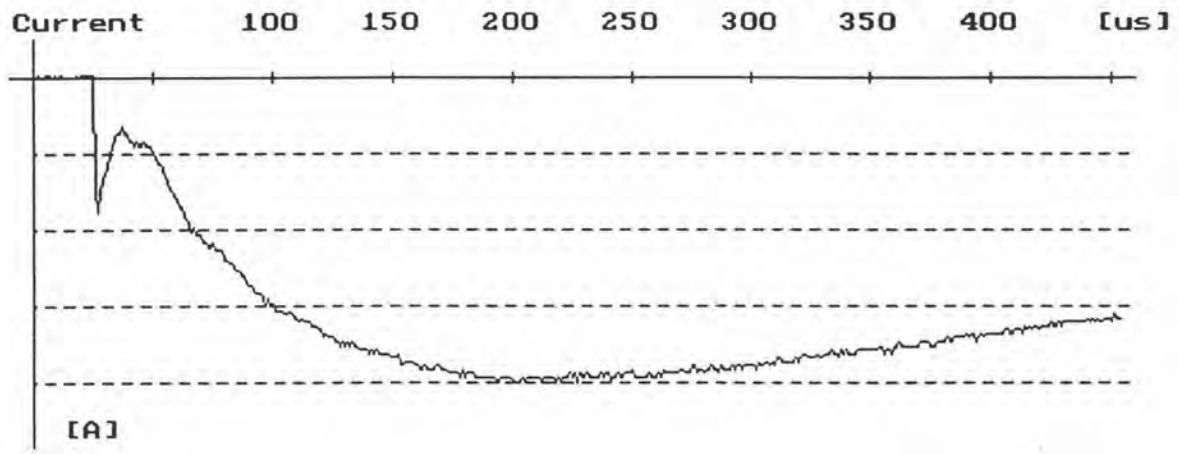
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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

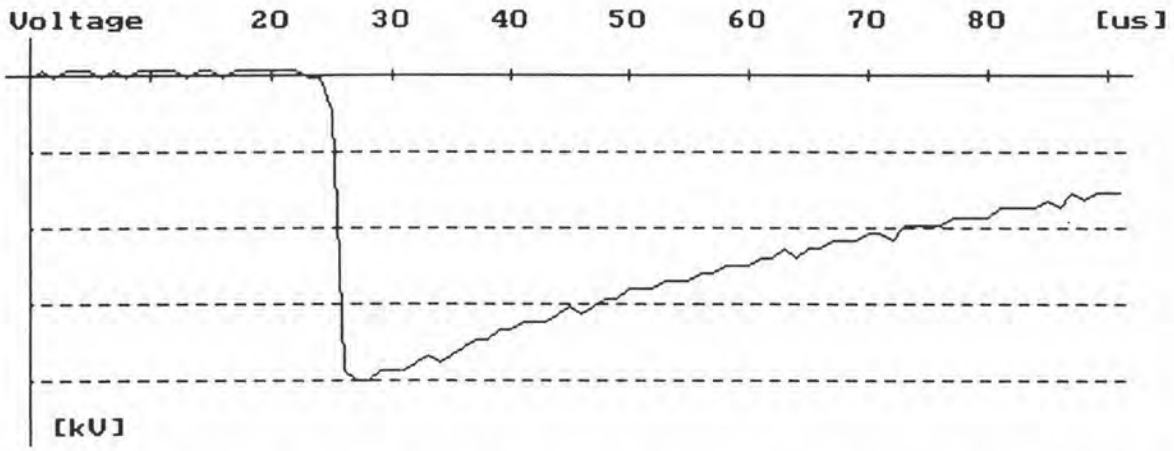
Transformer information

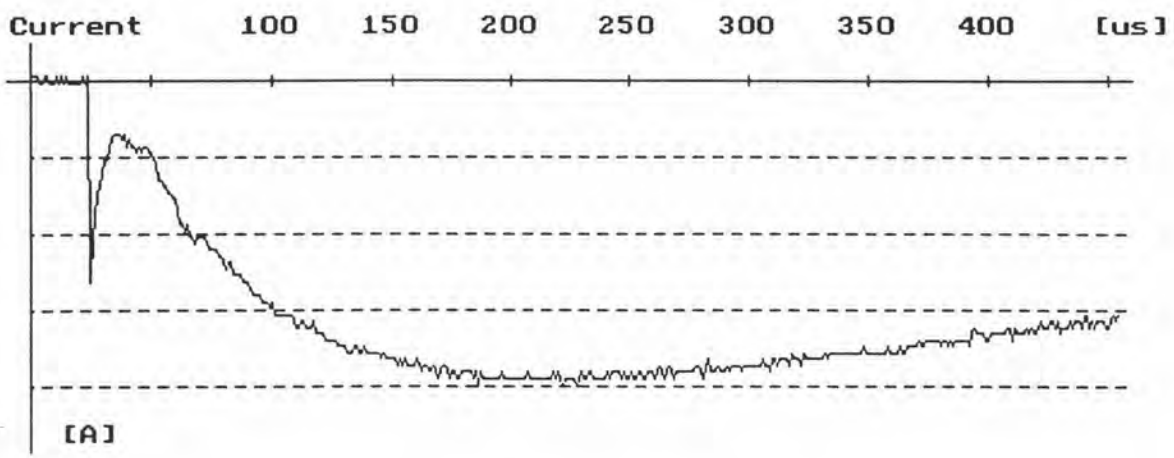
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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

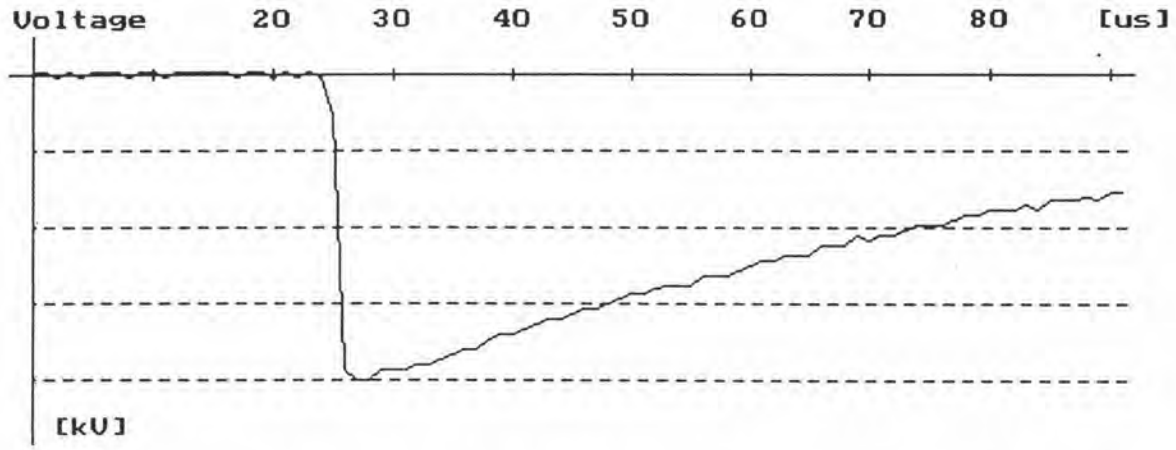
Transformer information

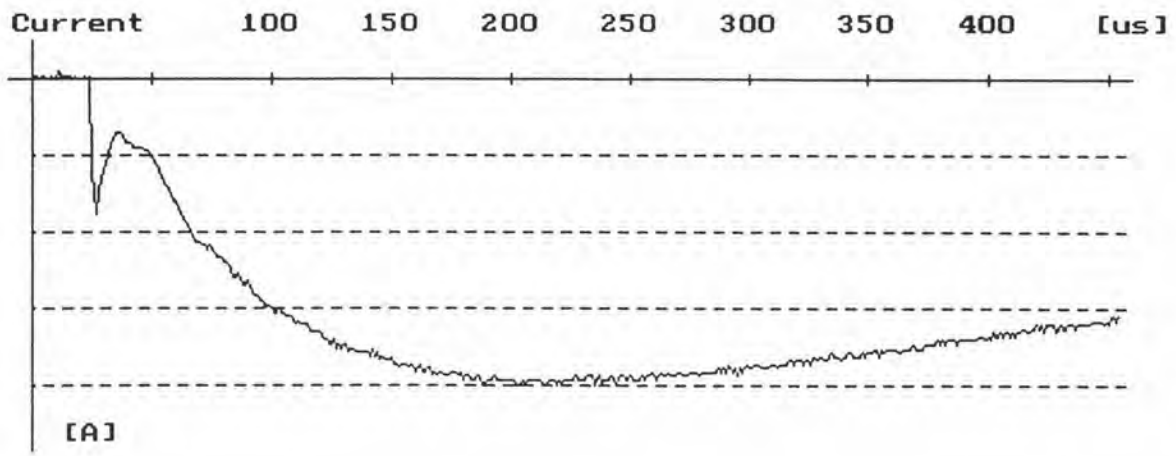
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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

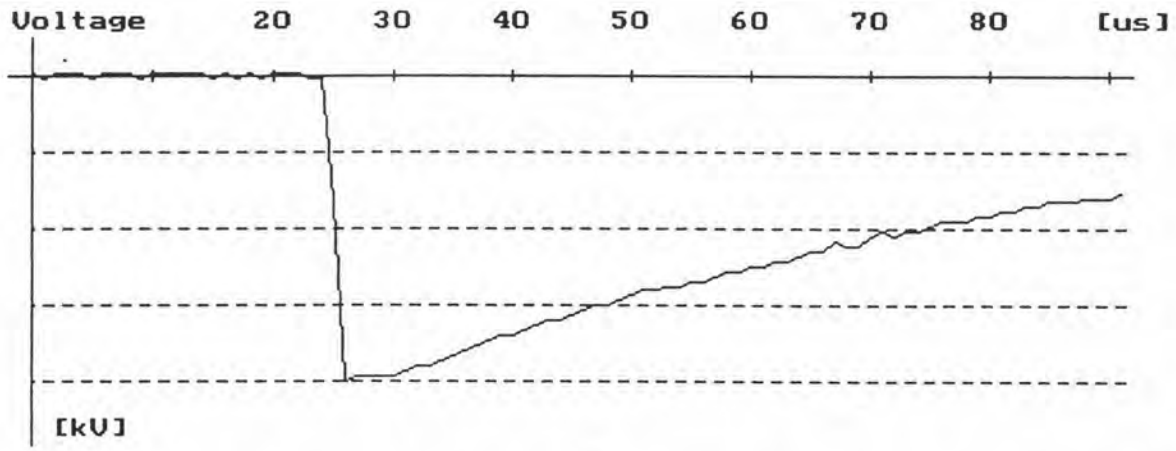
Transformer information

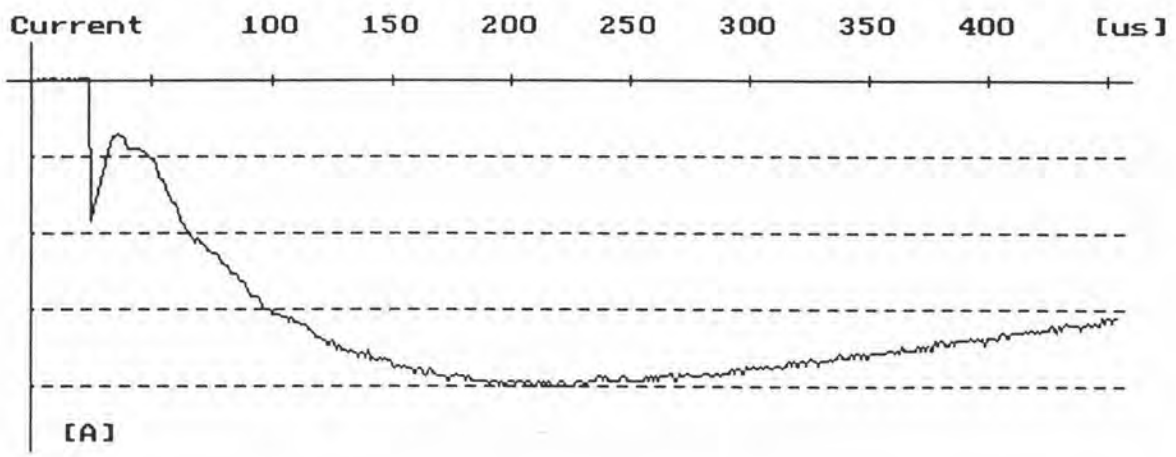
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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

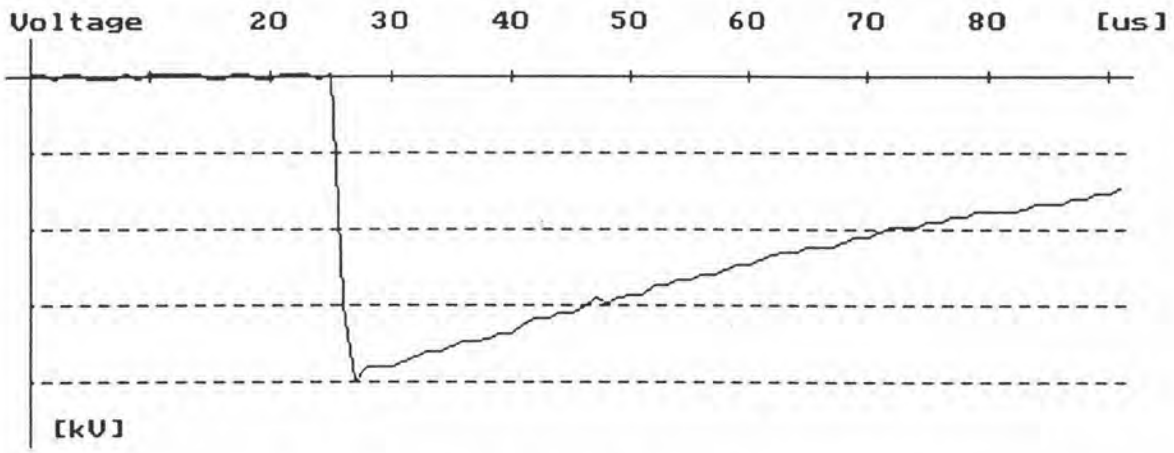
Transformer information

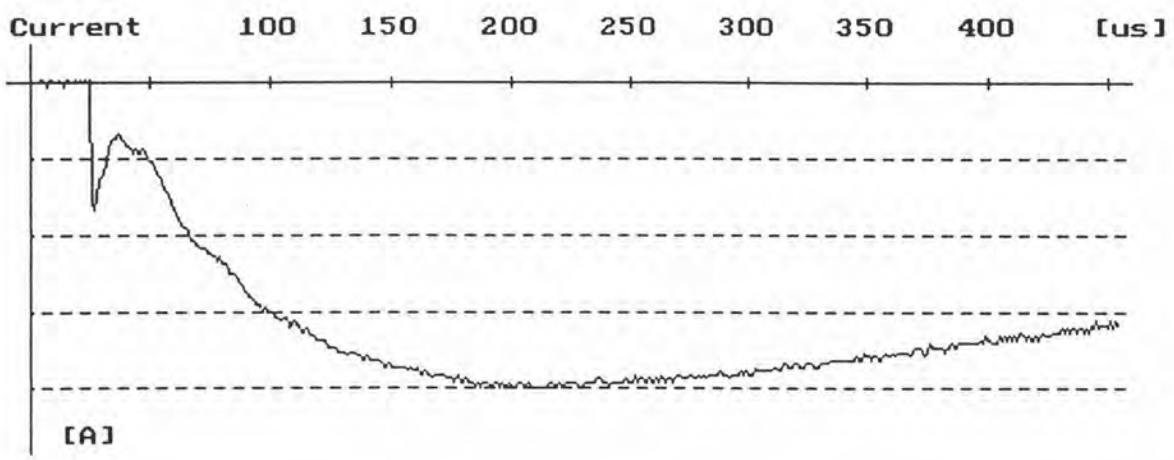
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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

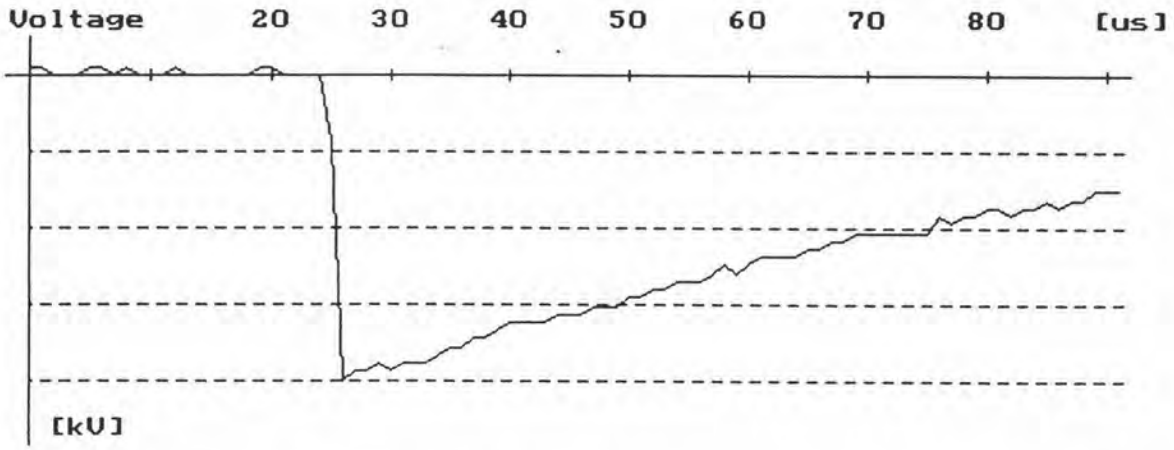
Transformer information

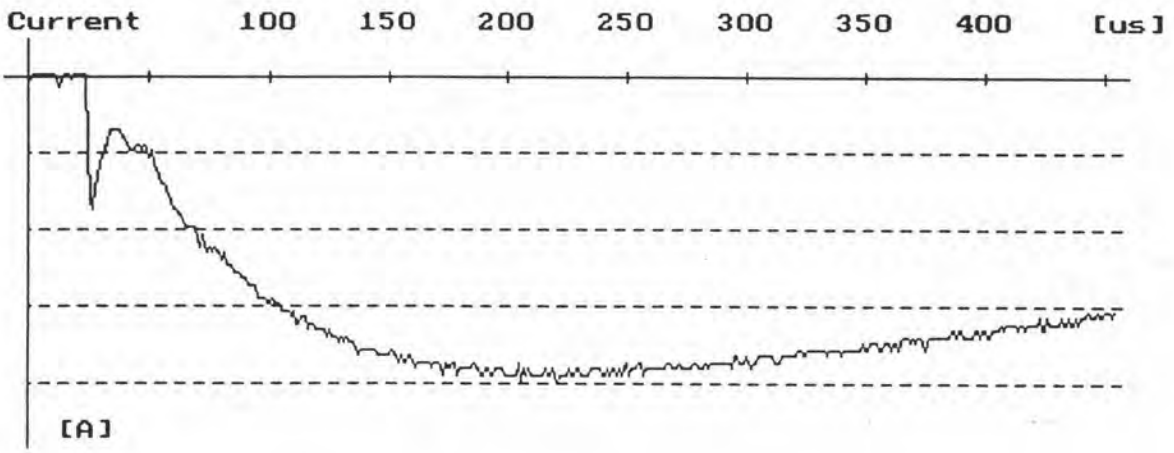
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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

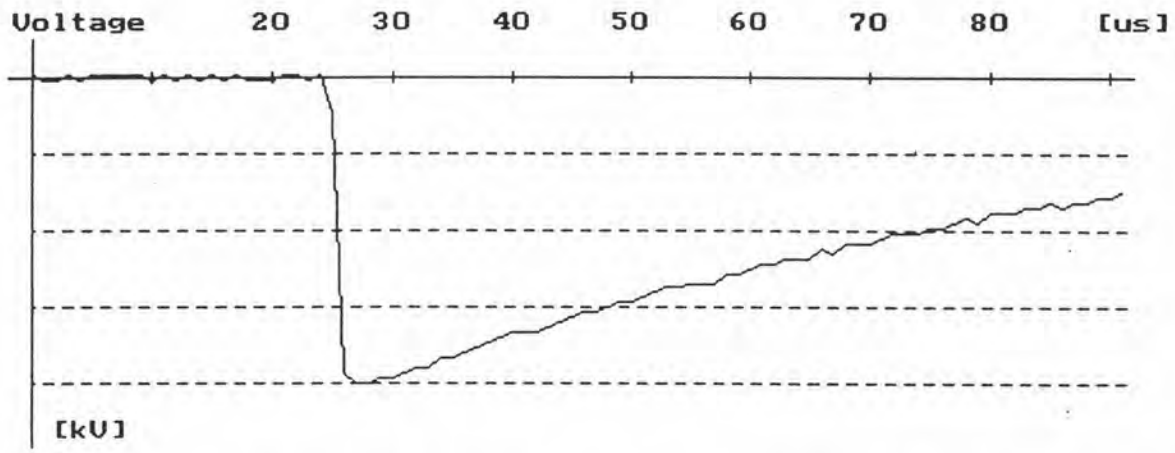
Transformer information

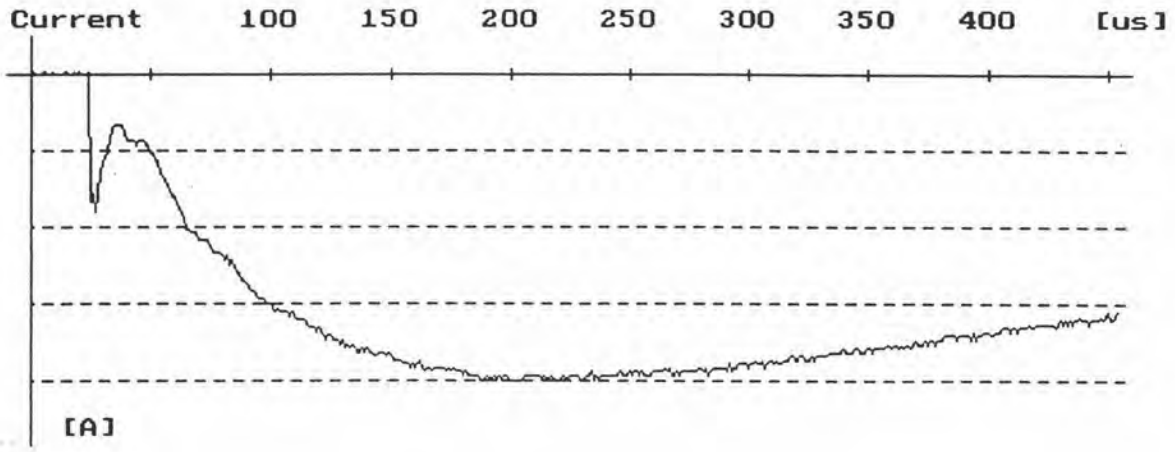
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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

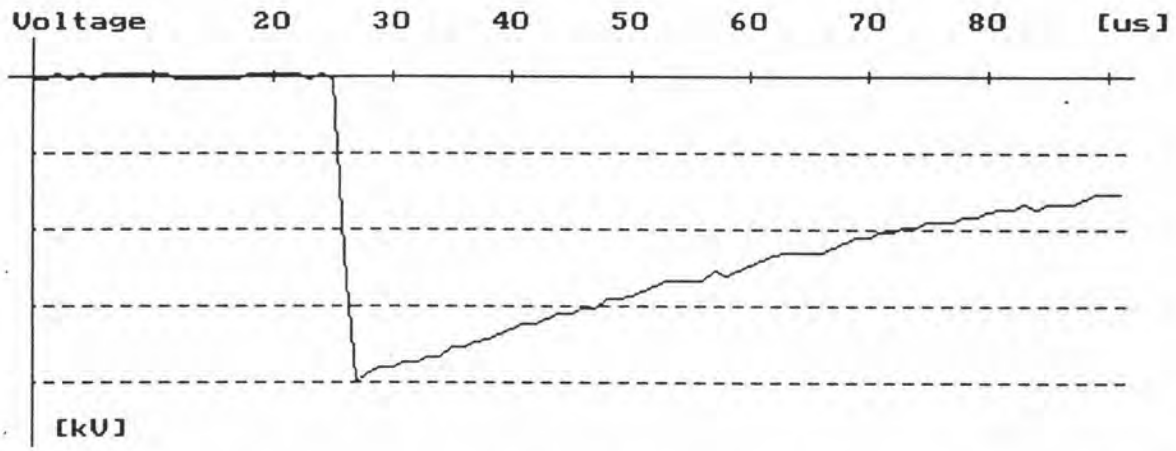
Transformer information

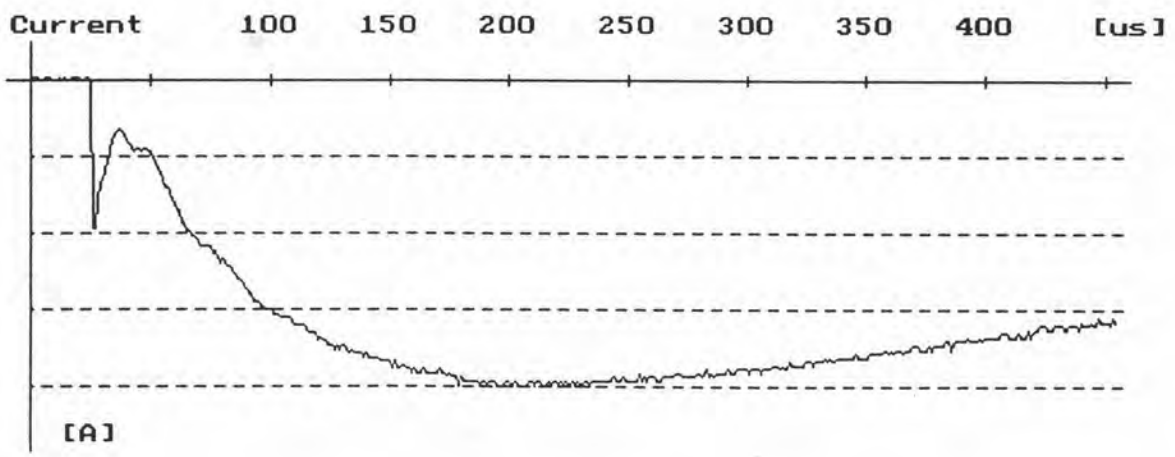
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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
Page 15

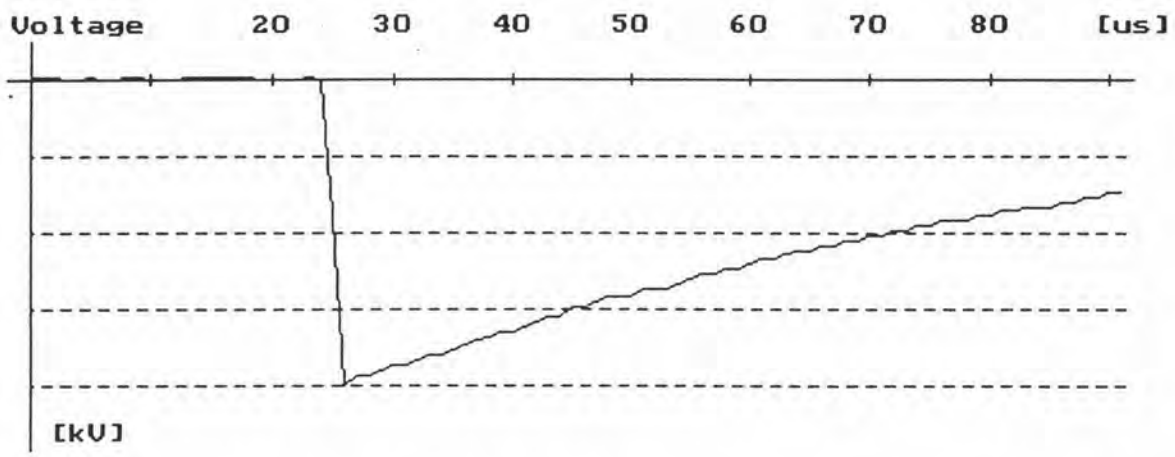
Transformer information

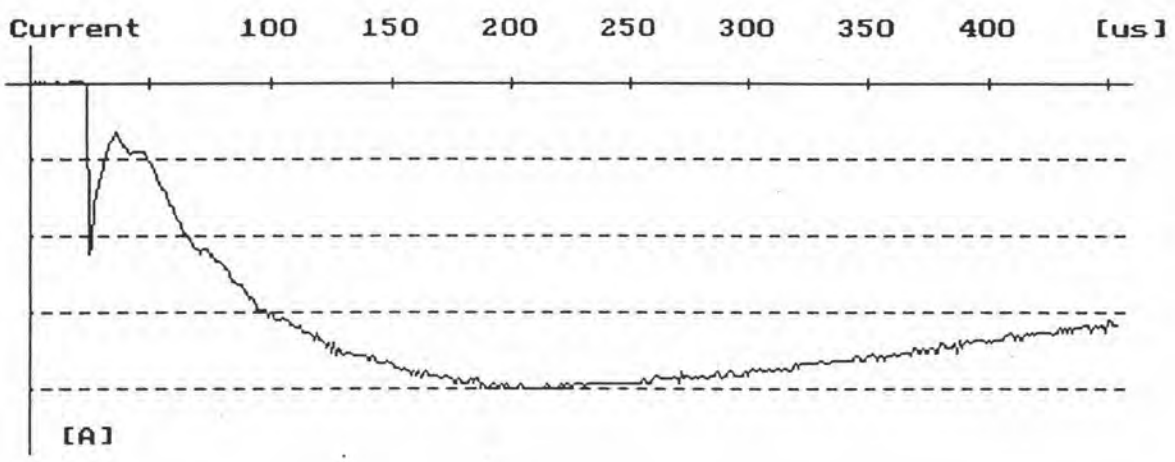
Manufacturer :	Tira-thai	Date of Test :	16/4/1995
Customer :	Tira-thai	File name :	041607
Rated power =	160 kVA	Serial No =	386007
System 22 kV BIL =	125 kV	Standard applied :	IEC

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





ประวัติผู้เขียน

นาย วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา เกิดที่กรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 29 มิถุนายน พ.ศ .2512 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2533 ปัจจุบันรับราชการเป็น อาจารย์ระดับ 4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นกรรมการวิชาการร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (กว.57) ของสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม