ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบดิจิตอล
สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

นาย วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-929-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16X49380

DIGITAL IMPULSE TEST ANALYSING SYSTEM FOR POWER TRANSFORMERS

Mr. Weerapun Rungseevijitprapa

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-631-929-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบดิจิตอล สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
โดย	นาย วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ กฤษดา วิศวธีรานนท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา : ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบดิจิตอล สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (DIGITAL IMPULSE TEST ANALYSING SYSTEM FOR POWER TRANSFORMER) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร. สำรวย สังข์สะอาด, 130 หน้า. ISBN 974-631-929-9

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานถึง การพัฒนาระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ BIL แบบดิจิตอลสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ระบบวิเคราะห์นี้จะใช้ในการตรวจสอบส่วนต่าง ๆ ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นได้แก่ เวลาหน้าคลื่น เวลาหางคลื่น เวลาคลื่นตัด ขนาดของแรงดัน และร้อยละของแรงดันพุ่งเกิน ค่าแรงดันทดสอบจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์วัดด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ และกระแสที่ไหลผ่านขดลวดวัดได้จากชันต์ความต้านทาน สัญญาณแอนะล็อกที่ได้เหล่านี้จะผ่านวงจรลดขนาดและเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิตอล โดยใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปความถี่สูง แล้วนำสัญญาณที่ได้มาทำการประมวลผลโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ผลของการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของแรงดันอิมพัลส์ที่ตรวจวัดได้ จะแสดงผลบนจอภาพของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ และเก็บข้อมูลในแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อใช้ในการอ้างอิงในภายหลัง การทดสอบระบบที่ได้พัฒนาขึ้น ทำโดยการทดสอบ BIL บนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐานต่าง ๆ เช่น มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) และมาตรฐานสากลอื่น ๆ ได้ผลการวิเคราะห์สำหรับการทดสอบมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่น่าพอใจ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

##C415627 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: BIL/TESTING/IMPULSE VOLTAGE/LIGHTNING/POWER TRANSFORMER/
WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA : DIGITAL IMPULSE TEST ANALYSING SYSTEM FOR POWER TRANSFORMERS. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. SAMRUAY SANGKASAAD, Dr.Sc.Techn.
130 pp. ISBN 974-631-929-9

This thesis presents the development of a digital impulse analysing system for the BIL test on power transformers. The analysing system is used to check the generating impulse voltage waveform, i.e., the front time, tail time, chopped time, magnitude of voltage, and percent of overshoot. The applied test voltage, obtained from the impulse generator, is measured by impulse voltage divider and the current flowing through the winding under tested is measured by means of a resistive shunt. These analog signals are attenuated and changed to digital signals by a high frequency digital oscilloscope. Then digital signals have to be evaluated by the developed program. The analysed results 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 used at any time. The developed system was approved by performing BIL test on power transformers according to the TIS standard and other international standards. The analysed results of the tests have a satisfactory accuracy.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขพิจารณาวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ คุณ สัมพันธ์ วงศ์ปาน กรรมการผู้จัดการบริษัท ถิรไทย ในการเอื้อเฟื้อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้ในการทดสอบวิเคราะห์ผลความถูกต้องของระบบวิเคราะห์ผลที่ออกแบบขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทางด้านการเงินจาก เงินทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช ฝ่ายวิจัย ฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ และขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ซึ่งให้การสนับสนุนทั้งทางด้านการเงินและกำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่

1. บทนำ 1
    1.1 บทนำทั่วไป 1
    1.2 ที่มาของปัญหา 2
    1.3 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของงานวิจัย 2
    1.4 ผลงานการศึกษาที่เกี่ยวข้อง 3

2. การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 5
    2.1 แรงดันกระจายเริ่มต้นเมื่อมีเสิร์จแรงดันรูปขั้น
    กระทบต่อขดลวดหม้อแปลง 5
    2.2 แรงดันทดสอบ 11
    2.3 อุปกรณ์การทดสอบ 14
        2.3.1 วงจรทดสอบ 14
        2.3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 15
        2.3.3 ระบบวัดแรงดัน 17
        2.3.4 แก็ปตัดคลื่น 18
        2.3.5 ชันต์บันทึกรูปคลื่นกระแส 18
    2.4 วิธีทำการทดสอบ 20
        2.4.1 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ 20
        2.4.2 การปรับเทียบระบบวัดแรงดัน 22
        2.4.3 ลำดับขั้นการทดสอบ 23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.4 ตัวอย่างผลการทดสอบบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ด้วยวิธีแอนะล็อก 24

2.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ 27

2.5.1 การเปรียบเทียบภาพถ่ายแรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็ม 28

2.5.2 การเปรียบเทียบภาพถ่ายกระแส 29

3. การวัดและบันทึกผลการทดสอบ BIL ด้วยระบบดิจิตอล 30

3.1 ระบบการรับและส่งสัญญาณโดยใช้ IEEE-488 (GPIB) 31

3.2 หลักการทำงานของระบบมาตรฐาน GPIB 33

3.3 ระบบบัสมาตรฐาน GPIB 35

3.4 การส่งสัญญาณแบบหลายสาย (multiwire transmission) 37

3.5 การใช้งานซอฟท์แวร์บนระบบมาตรฐาน GPIB 38

3.6 การเขียนโปรแกรมควบคุมระบบการทำงาน GPIB ในงานวิจัย 40

4. เทคนิคการประมาณเชิงเส้น และการหาค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดัน 46

4.1 การประมาณเชิงเส้นสมการของข้อมูลที่วัดได้ 46

4.1.1 การถดถอยเชิงเส้น (line regression) 46

4.1.2 การประมาณเส้นสมการของข้อมูลที่เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น 48

4.2 ฟังก์ชันของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 49

4.2.1 การประมาณเส้นสมการสำหรับช่วงเวลาหางคลื่นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 51

4.2.2 การประมาณเส้นสมการสำหรับช่วงเวลาหน้าคลื่นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 52

4.2.3 การประมาณเส้นสมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 53

4.2.4 การคำนวณค่าคงตัวทางเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น 55

5. การออกแบบระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL แบบดิจิตอล 57

5.1 ส่วนประกอบของระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL แบบดิจิตอล 57

หน้า

5.2 การออกองค์ประกอบของตัวลดทอนสัญญาณ 59
5.2.1 การออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณแรงดัน 59
5.2.2 การออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณกระแส 62
5.3 การออกแบบโปรแกรมวิเคราะห์ผลการทดสอบ 64
5.3.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม 64
5.3.2 องค์ประกอบของไฟล์ในโปรแกรมระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL 65
5.3.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมปรับเทียบอัตราส่วนแรงดันก่อนการทดสอบ 66
5.3.4 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสำหรับการปรับเทียบรูปคลื่น 68
5.3.5 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสำหรับการทดสอบ BIL 72
5.3.6 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกร์มสำหรับการเรียกดูข้อมูลเก่า 74

6. การทดสอบใช้งานระบบการวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL 77
6.1 การทดสอบลักษณะสมบัติของตัวลดทอนสัญญาณภายในกล่องลดทอนสัญญาณ 77
6.1.1 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดันของตัวลดทอนสัญญาณ 77
6.1.2 การทดสอบผลตอบสนองทางเวลาของตัวลดทอนสัญญาณ 79
6.2 การทดสอบการทำงานของระบบในการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน 81
6.3 การทดสอบการทำงานของระบบในการทดสอบ BIL ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 88

7. สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ 91
7.1 สรุปผลการใช้โปรแกรม 91
7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 93

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง 94
ภาคผนวก ก. 96
ภาคผนวก ข. 103
ภาคผนวก ค. 107
ภาคผนวก ง. 111
ภาคผนวก จ. 115
ประวัติผู้เขียน 131

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 ระบบแรงดันสูงสุดและค่าแรงดันทดสอบ BIL สำหรับค่าแรงดัน
ระบบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 300 กิโลโวลต์ 13
2.2 ลำดับขั้นการป้อนแรงดัน ขนาดและลักษณะของแรงดันทดสอบ 24
3.1 รูปแบบคำสั่งควบคุม GPIB 38
3.2 คำสั่งควบคุมบนระบบมาตรฐาน GPIB 41
3.3 ชุดคำสั่งควบคุม DSO บนระบบการวัดแรงดันอิมพัลส์เพื่อวิเคราะห์
ลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ได้ 42
3.4 ชุดคำสั่งควบคุม DSO บนระบบการวัดแรงดันและกระแสที่ได้จาก
วงจรทดสอบเพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้ 44
4.1 ชุดข้อมูลตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์การประมาณเชิงเส้น 47
6.1 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าอัตราส่วนแบ่งแรงดันของ
ตัวลดทอนสัญญาณภายในกล่องลดทอนสัญญาณ 78
6.2 ตารางแสดงผลการวัดค่าตอบสนองทางเวลาสำหรับตัวลดทอนสัญญาณ 79
6.3 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่น
แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μsec 83
6.4 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่น
แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 0.84/50 μsec 84
6.5 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่น
แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.56/50 μsec 85
6.6 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่น
แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/40 μsec 86
6.7 ตารางแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าองค์ประกอบรูปคลื่น
แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/60 μsec 87

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

2.1 วงจรสมมูลของขดลวดหม้อแปลงที่มีการกระจายขดลวดอย่างสม่ำเสมอ 6
2.2 แสดงแรงดันกระจายเริ่มต้นที่เป็นผลตอบต่อแรงดันรูปขั้นของหม้อแปลงซึ่งมีขดลวดสม่ำเสมอ 10
2.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50 μsec 11
2.4 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีการแกว่ง 12
2.5 วงจรทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 14
2.6 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 16
2.7 การต่อวงจรระบบวัดแรงดัน 18
2.8 ชันต์วัดกระแส 19
2-9 รูปคลื่นกระแสผ่านขดลวดหม้อแปลง 19
2.10 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ 21
2.11 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ 22
2.12 ออสซิลโลแกรมแรงดันและกระแสจากการทดสอบ BIL ตามมาตรฐาน ANSI ของหม้อแปลง 3 เฟส 750 kVA 12/24 kV - 416/240 V 25
2.13 ออสซิลโลแกรมแรงดันและกระแสจากการทดสอบ BIL ตามมาตรฐาน IEC ของหม้อแปลง 3 เฟส 160 kVA 22 kV - 400/230 V 26
2.14 ภาพตัวอย่างรูปคลื่นที่ไม่สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าได้ 28
3.1 ตำแหน่งของสายไฟแต่ละเส้นที่ตำแหน่งเต้ารับตัวเมียของระบบมาตราน GPIB 32
3.2 การจัดวางอุปกรณ์ในระบบ GPIB 33
3.3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบ GPIB ระหว่างตัวควบคุมและอุปกรณ์ 36
4.1 กราฟของข้อมูลตามตัวอย่าง 47
4.2 เส้นกราฟแรงดันอิมพัลส์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา 50
4.3 วิธีหาค่าเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 55
5.1 แผนภาพโดยรวมของระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 58

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

5.2 ภาพถ่ายแสดงส่วนประกอบของระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 58
5.3 รูปแสดงลักษณะและการต่อตัวลดทอนสัญญาณแบบความต้านทานและแบบตัวเก็บประจุพร้อมด้วยความต้านทานแมทชิ่ง 59
5.4 วงจรแสดงการต่อตัวลดทอนสัญญาณแบบตัวเก็บประจุแสดงตำแหน่งของความต้านทานหน่วงและความต้านทานแมทชิ่ง 60
5.5 แสดงการติดตั้งองค์ประกอบของตัวลดทอนสัญญาณแบบตัวเก็บประจุ 61
5.6 วงจรแสดงการต่อของตัวลดทอนสัญญาณแบบความต้านทานแสดงตำแหน่งของความต้านทานหน่วงและความต้านทานแมทชิ่ง 62
5.7 แสดงการติดตั้งองค์ประกอบของตัวลดทอนสัญญาณแบบความต้านทาน 63
5.8 รูปแสดงกล่องอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณ ซึ่งแสดงให้เห็นส่วนของตัวลดทอนสัญญาณแบบตัวเก็บประจุ และตัวลดทอนสัญญาณแบบความต้านทาน 64
5.9 ภาพกราฟฟิกในภาคการนำเสนอชื่อโครงการวิจัย 65
5.10 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนในไฟล์ DEFAULT.BIL 67
5.11 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อรับข้อมูลและการคำนวณกับส่วนโปรแกรม waveform.bil ในไฟล์ BIL.EXE 69
5.12 แสดงวงจรทดสอบที่นำเสนอในส่วนของโปรแกรมสำหรับการปรับเทียบรูปคลื่นมาตรฐานและค่าองค์ประกอบที่ใช้ในวงจร 71
5.13 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อรับข้อมูลกับส่วนโปรแกรมการทดสอบ BIL ในไฟล์ BIL.EXE 73
5.14 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อการเรียกดูข้อมูลเก่า 74
6.1 เครื่องอ่านค่าอัตราส่วนของตัวลดทอนสัญญาณ 78
6.2 แสดงวงจรที่ใช้ในการหาผลตอบทางเวลาของตัวลดทอนสัญญาณ 79
6.3 ภาพออสซิลโลแกรมผลตอบสนองทางเวลา 80
6.4 วงจรและค่าองค์ประกอบที่ใช้สำหรับการทดสอบการทำงานของระบบในการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน 82
6.5 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบดิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μsec 83

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

6.6 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบดิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับ
รูปคลื่นอิมพัลส์ 0.84/50 μsec 84
6.7 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบดิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับ
รูปคลื่นอิมพัลส์ 1.56/50 μsec 85
6.8 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบดิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับ
รูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/40 μsec 86
6.9 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากแบบดิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อกสำหรับ
รูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/60 μsec 87
6.10 ภาพออสซิลโลแกรมที่ได้จากระบบวิเคราะห์แบบดิจิตอลเทียบกับแบบแอนะล็อก
สำหรับการทดสอบ BIL บนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 89
ค.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน 107
ค.2 วงจรการทดสอบหม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ 109
ค.3 รูปการต่อวงจรการทดสอบในกรณีที่หม้อแปลงที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ (L_t < 20 mH) 110