การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำ 100 kHz

นายธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 100 kHz DAMPED OSCILLATORY WAVE GENERATOR

Mr.Thanarat Tanmaneeprasert

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

500015

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำ 100 kHz
โดย	นายธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

ธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ : การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 100 kHz (DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 100 kHz DAMPED OSCILLATORY WAVE GENERATOR) อ.ที่ปรึกษา: อ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์, 97 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 100 kHz ซึ่งรูปคลื่นมีพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องพิจารณา คือ เวลาหน้าคลื่น, อัตราการสร้างรูปคลื่นซ้ำ, ความถี่ของการแกว่ง และพิกัดค่ายอดแรงดัน โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 61000-4-12 และ IEC 61000-4-18 การทดสอบเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำจะต่อผ่านอุปกรณ์ Coupling/ Decoupling Network (CDN) แบบ 1 เฟส เพื่อใช้ทดสอบขณะอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่อใช้งานในระบบจ่ายไฟแรงดันต่ำ ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีโหมดร่วมและกรณีโหมดผลต่าง

ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้นนี้สามารถสร้างรูปคลื่นมีลักษณะสมบัติอยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด คือ เวลาหน้าคลื่น, อัตราการสร้างรูปคลื่นซ้ำ, ความถี่การแกว่งของรูปคลื่น และค่ายอดแรงดันสูงสุดที่สร้างได้คือ 2 kV สำหรับอุปกรณ์ Coupling/Decoupling Network ที่ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถใช้ทดสอบกับเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำทั้งการทดสอบกรณีโหมดร่วมและกรณีโหมดผลต่างได้ตามที่ออกแบบไว้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา คมสัน เพ็ชรรักษ์

ปีการศึกษา 2550

4770635821 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : DAMPED OSCILLATORY WAVE / DAMPED OSCILLATORY WAVE GENERATOR

THANARAT TANMANEEPRASERT : DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 100 kHz DAMPED OSCILLATORY WAVE GENERATOR. THESIS ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS, Dr. Sc.Techn, 97 pp.

This thesis presents a design and construction of a 100 kHz damped oscillatory wave generator. According to IEC 61000-4-12 and IEC 61000-4-18 standards, the significant waveform parameters consist of rise time, repetition rate, frequency and the peak voltage. The single phase coupling/decoupling network (CDN) are used together the damped oscillatory wave generator in order to test the electrical and electronic devices in low voltage system. The test consists of common mode and differential mode.

Test results show that the damped oscillatory wave generator is able to generate waveform according to standards characteristics such as rise time, repetition rate, frequency and a peak voltage of up to 2 kV, in both common mode and differential mode.

Department Electrical Engineering Student's signature Thanarat Tanmaneeprasert

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature K. Petcharaks.

Academic year 2007

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร และอาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.วีรพันธ์ รังสีวิจิตรประภา คุณถาวร เอื้อดี คุณเกรียงไกร โอฐธนู คุณอรรณพ ลิ้มสีมารัตน์ คุณพีรวุฒิ ยุทธโกวิท คุณวิทวัส งามประดิษฐ์ และคุณปิยะบุตร พฤกษานุบาล ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์วัดและอุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกท่านที่อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดจนคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนอุดหนุนการวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งมองเห็นความสำคัญและสนับสนุนการศึกษาของลูกๆ ทุกคนมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฏ

บทที่

1. บทนำ 1
    1.1 บทนำทั่วไป 1
    1.2 ที่มาของปัญหา 2
    1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 3
    1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์ 3
    1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
2. มาตรฐานการทดสอบ 4
    2.1 การสร้างรูปคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 4
        2.1.1 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 6
        2.1.2 ลักษณะรูปคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำตามมาตรฐาน 6
    2.2 การทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 7
        2.2.1 การทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 7
            2.2.1.1 การทดสอบกรณีโหมดร่วม 7
            2.2.1.2 การทดสอบกรณีโหมดผลต่าง 8
        2.2.2 ข้อกำหนดสภาวะการทดสอบ 9
        2.2.3 ระดับสัญญาณในการทดสอบ 9
3. การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 10
    3.1 การออกแบบและประกอบสร้าง 11
        3.1.1 การออกแบบวงจรอัดประจุ 11
        3.1.2 การออกแบบความถี่การแกว่งของคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 13

บทที่ หน้า

3.1.3 การออกแบบวงจรกรอง 20
3.1.4 การออกแบบอุปกรณ์ Coupling/Decoupling Network แบบ 1 เฟส 23
3.2 การออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ 29
3.2.1 แหล่งกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง 29
3.2.1.1 หม้อแปลงทดสอบ 30
3.2.1.2 ไดโอดแรงสูง 31
3.2.1.3 ตัวเก็บประจุกรองกระแส 32
3.2.2 องค์ประกอบในวงจรกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำ 32
3.2.2.1 การออกแบบตัวเก็บประจุ 32
3.2.2.2 การออกแบบตัวต้านทาน 33
3.2.2.3 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ 34
3.2.2.4 การออกแบบโครงสร้างและการฉนวน 37
3.2.2.5 สวิตช์สารกึ่งตัวนำประเภทไอจีบีที 38
3.2.2.6 การออกแบบชุดวงจรควบคุมการขับสวิตช์ IGBT 41
4. การทดสอบและวิเคราะห์ผล 46
4.1 การทดสอบสร้างคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำตามมาตรฐาน 46
4.2 การทดสอบคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำผ่านตัวอุปกรณ์
Coupling/Decoupling Network แบบ 1 เฟส กรณีโหมดร่วม 49
4.2.1 การทดสอบคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำผ่านเข้าแหล่งจ่ายไฟ 49
4.2.2 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟผ่านเข้าเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำ 51
4.2.3 การทดสอบคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำผ่านตัวอุปกรณ์
Coupling/Decoupling Network แบบ 1 เฟส ขณะต่อแหล่งจ่ายไฟ 54
4.3 การทดสอบคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำผ่านตัวอุปกรณ์
Coupling/Decoupling Network แบบ 1 เฟส กรณีโหมดผลต่าง 57
4.3.1 การทดสอบคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำผ่านเข้าแหล่งจ่ายไฟ 57
4.3.2 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟผ่านเข้าเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำ 58
4.3.3 การทดสอบคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำผ่านตัวอุปกรณ์
Coupling/Decoupling Network แบบ 1 เฟส ขณะต่อแหล่งจ่ายไฟ 61
4.4 การทดสอบคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำผ่านตัวอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ
ขณะต่อแหล่งจ่ายไฟ 64

บทที่ หน้า

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 67
5.1 สรุปผลการทดลองเครื่องกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำ 67
5.2 สรุปการใช้งานสวิตช์สารกึ่งตัวนำประเภทไอจีบีที 68
5.3 ข้อเสนอแนะ 71
รายการอ้างอิง 75
ภาคผนวก 73
ภาคผนวก ก ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอนาล็อกในโปรแกรม MATLAB 74
ภาคผนวก ข ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistors: IGBT) 77
ภาคผนวก ค ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IXEL40N400 83
ภาคผนวก ง ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD 87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 97

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ระดับแรงดันในการทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำ 9

3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสวิตช์ IGBT เบอร์ IXEL40N400 39

3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสวิตช์ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD 40

5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นแกว่งแบบหน่วงช้ำ 67

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่ หน้า

2.1 วงจรกำเนิดแรงดันคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 4

2.2 คลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำตามมาตรฐาน 6

2.3 การทดสอบกรณีโหมดร่วม 8

2.4 การทดสอบกรณีโหมดผลต่าง 8

3.1 แบบจำลองวงจรกำเนิดคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 10

3.2 คลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ได้จากแบบจำลอง 10

3.3 วงจรโดยรวมของเครื่องกำเนิดแรงดันคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 11

3.4 วงจรอัดประจุของตัวเก็บประจุ C_1 11

3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุ C_1 กับเวลา (Time) 13

3.6 การเปลี่ยนแปลงในวงจร L_1C_1 14

3.7 การแกว่งในวงจร L_1C_1 เมื่อมีความต้านทาน R_3 17

3.8 ผลตอบสนองการแกว่งแบบหน่วงทั้ง 3 กรณี 20

3.9 วงจรกรอง $R_2L_2C_2$ 20

3.10 ภาพบล็อกของวงจรกรอง $R_2L_2C_2$ 22

3.11 แผนภาพโบเดของวงจรกรอง 22

3.12 อุปกรณ์ Coupling/Decoupling Network 23

3.13 การไหลของกระแสกรณีทดสอบแบบโหมดร่วม 24

3.14 วงจรสมมูลของวงจรกรองกรณีทดสอบแบบโหมดร่วม 25

3.15 แผนภาพโบเดของวงจรสมมูลของวงจรกรองกรณีทดสอบแบบโหมดร่วม 26

3.16 การไหลของกระแสกรณีทดสอบแบบโหมดผลต่าง 27

3.17 วงจรสมมูลของวงจรกรองกรณีทดสอบแบบโหมดผลต่าง 28

3.18 แผนภาพโบเดของวงจรสมมูลของวงจรกรองกรณีทดสอบแบบโหมดผลต่าง 28

3.19 วงจรกำเนิดแรงดันกระแสตรงอัดประจุ 30

3.20 หม้อแปลงทดสอบ 31

3.21 ไดโอดแรงสูง 31

3.22 ตัวเก็บประจุกรองกระแส 32

3.23 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรเครื่องกำเนิด 33

3.24 ตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรเครื่องกำเนิด 34

ภาพประกอบที่ หน้า

3.25 ขดลวดเหนี่ยวนำ L_1 35
3.26 ขดลวดเหนี่ยวนำ L_2 35
3.27 พารามิเตอร์ต่างๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำ 36
3.28 ขดลวดเหนี่ยวนำในวงจร Decoupling....37
3.29 บล็อกไดอะแกรมของชุดวงจรควบคุมการขับสวิตช์ IGBT 42
3.30 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรควบคุม....42
3.31 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ 43
3.32 วงจรภายในไอซีเบอร์ TLP250 43
3.33 ชุดวงจรขับสวิตช์ IGBT....44
3.34 สัญญาณพัลส์ขับสวิตช์ IGBT....45
3.35 ชุดวงจรควบคุมการขับสวิตช์ IGBT....45
4.1 เวลาหน้าคลื่นรูปคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ: 75 ns ± 20%....46
4.2 อัตราการสร้างรูปคลื่นซ้ำ ≥ 40/s....47
4.3 ความถี่การแกว่งของคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 100 kHz ± 10% 47
4.4 คลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่พิกัดค่ายอดแรงดันต่างๆ 48
4.5 คลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ป้อนเข้าวงจร Decoupling และที่เข้าแหล่งจ่ายไฟ (V_{LG}) 49
4.6 คลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ป้อนเข้าวงจร Decoupling และที่เข้าแหล่งจ่ายไฟ (V_{NG}) 50
4.7 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ (V_{LG}, V_{NG}) 51
4.8 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ (V_{LG}, V_{NG}) ที่ผ่านวงจร Decoupling 52
4.9 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟที่ขั้วขาออกของเครื่องกำเนิด....52
4.10 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟที่ตกคร่อมองค์ประกอบ R_2C_2 53
4.11 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟที่ตกคร่อมองค์ประกอบ L_1 53
4.12 คลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ป้อนเข้าวงจร Decoupling และที่เข้าแหล่งจ่ายไฟ (V_{LG}) 54
4.13 คลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ป้อนเข้าวงจร Decoupling และที่เข้าแหล่งจ่ายไฟ (V_{NG}) 56
4.14 คลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ป้อนเข้าวงจร Decoupling (V_{LN})
และที่เข้าแหล่งจ่ายไฟ (V_{LG}, V_{NG}, V_{LN}) 57
4.15 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ (V_{LG}, V_{NG}) 58
4.16 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ (V_{LG}, V_{NG}) ที่ผ่านวงจร Decoupling....59

ภาพประกอบที่ หน้า

4.17 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟที่ขั้วขาออกของเครื่องกำเนิด 59
4.18 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟที่ตกคร่อมองค์ประกอบ R_2C_2 60
4.19 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟที่ตกคร่อมองค์ประกอบ L_1 60
4.20 คลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ขั้วขาออกของเครื่องกำเนิด (V_{LN})
และที่ป้อนเข้าวงจร Decoupling (V_{LG}, V_{NG}, V_{LN}) 61
4.21 คลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ขั้วขาออกของเครื่องกำเนิด (V_{LN})
และที่เข้าแหล่งจ่ายไฟ (V_{LG}, V_{NG}, V_{LN}) 63
4.22 การติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ (MOV) ทางด้านอุปกรณ์ทดสอบ 64
4.23 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ (V_{LG}, V_{NG}) ที่ผ่านอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ
ขณะไม่ป้อนคลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำ 65
4.24 คลื่นแกว่งแบบหน่วงซ้ำที่ขั้วขาออกของเครื่องกำเนิด
และหลังผ่านอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จขณะป้อนแหล่งจ่ายไฟ (V_{LG}, V_{NG}) 65
5.1 คลื่นแกว่งแบบหน่วงไม่ซ้ำ (Ring Wave) 68
5.2 การติดตั้งวงจรสนับเบอร์และความต้านทานแบ่งแรงดันให้กับสวิตช์ IGBT 68
5.3 วงจรสนับเบอร์และความต้านทานแบ่งแรงดันจำนวน 4 ชุด 70
ก.1 ภาพบล็อกของฟังก์ชั่นถ่ายโอน 75
ก.2 แผนภาพโบเดจากโปรแกรม MATLAB 76
ข.1 สัญลักษณ์ของไอจีบีที 77
ข.2 ภาพตัดขวางแนวตั้งของมอสเฟตกำลังและไอจีบีที 78
ข.3 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของไอจีบีที 78
ข.4 โครงสร้างที่มีบีเจทีและมอสเฟตกำลังแฝงอยู่และวงจรสมมูลของไอจีบีที 79
ข.5 คลื่นกระแสและแรงดันในสภาวะเริ่มนำกระแสของไอจีบีที 80
ข.6 คลื่นกระแสและแรงดันในสภาวะเริ่มหยุดนำกระแสของไอจีบีที 81
ข.7 พื้นที่ทำงานปลอดภัยของไอจีบีที 82