หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ที่แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์โดยใช้เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
นักศึกษา	นายประสิทธิ์ พลหาญ
รหัสประจำตัว	46067008
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการการออกแบบวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ DC/DC คอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ทดแทนแมกนีติกทรานฟอร์เมอร์ ออกแบบให้สวิตซ์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าตกคล่อมสวิตซ์เป็นศูนย์ และทำงานภายใต้เงื่อนไขโหลดที่เหมาะสม ในการออกแบบวงจรควบคุม จะใช้การหาฟังชันก์ถ่ายโอนของระบบโดยรวมด้วยวิธีการจำลองแบบการทำงานอย่างง่ายด้วยโปรแกรม Pspice และออกแบบวงจรควบคุมแบบสามโพลสองซีโร่ ผลการทดลองพบว่าวงจรต้นแบบมีสมรรถนะการทำงานที่ดี โดยวงจรมีประสิทธิภาพสูง (≈93%), มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ด้านทางออกทั้งในสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วขณะที่ดี

Thesis Title	Design of aZero-Voltage-Switch Converter using a Piezoelectric Tranformer.
Student	Mr. Prasit Ponhan
Student ID.	46067008
Degree	Master of Engineering
Program	Control Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assist. Dr. Nontawat Chuladaycha

ABSTRACT

This thesis presents the designing piezoelectric transformer DC/DC converter for switched-mode power supplies, where the magnetic transformer is replaced by piezoelectric transformer. The switched circuit is working in zero voltage-switch and under with the optimal load in order to obtain the high efficiency. The transfer function of power stage is defined by Pspice and the controller circuit has 3 Poles, 2 Zeros. Test on designed prototype circuit shows that the converter nas good output voltage reguration and high efficiency (≈93%).

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำและความกรุณาที่ผู้วิจัยได้รับตลอดมา

ขอขอบคุณ ดร.ชนินทร์ บุญลักษณานุสรณ์ สำหรับคำแนะนำและคำวิจารณ์ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล และห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าและวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนสำหรับความช่วยเหลือต่าง ๆ และให้กำลังใจต่อผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัยสำหรับการสนับสนุนและการส่งเสริมในทุกด้านจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ประสิทธิ์ พลหาญ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย……I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ……...II

กิตติกรรมประกาศ……...III

สารบัญ……IV

สารบัญรูป……VIII

รายการคำย่อและสัญลักษณ์……...XII

บทที่ 1 บทนำ……1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา……1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา……...2

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย……..……..2

1.4 ขอบเขตการวิจัย…… ..…... ...3

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา……3

บทที่ 2 เปียโซอิเล็กทริก และเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์……..4

2.1 บทนำ…… . ……...4

2.2 กระบวนการทำให้มีขั้ว (โพลลิ่ง, Poling)…… ……......5

2.3 เปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก……..……....6

2.4 หลักการทำงานของสารเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก……6

2.5 รูปแบบการทำงานของเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก……..…7

2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก……8

2.7 ชนิดของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์……...9

2.7.1 Reson-type เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์..……9

2.7.2 Thickness Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....……10

2.7.3 Radial Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์……..10

2.8 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก……...……11

2.9 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....12

2.10 สรุป……..…….. 14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็ก
ทริกทรานฟอร์เมอร์……...……..……...16

3.1 บทนำ……..……..……....16

3.2 หลักการวัด……..……..……17

3.2.1 ขั้นตอนที่1 ……..……..……17

3.2.2 ขั้นตอนที่ 2 ……..……...……18

3.2.3 ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณค่า *N*……..……...….20

3.3 สมการที่เกี่ยวข้อง……..……..……..20

3.4 Input Impedance …..……...……...…...23

3.5 อัตราการขยายความแรงดันไฟฟ้า (Voltage Gain) ……...……26

3.6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและโหลดที่เหมาะสมของ
เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์……....……...…..……28

3.7 สรุป……..……..……..32

บทที่ 4 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ …...……..…33

4.1 บทนำ……..……..……33

4.2 ภาคการส่งถ่ายกำลังงาน……..……34

4.2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์……..34

4.2.2 เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์……...34

4.2.3 วงจร Bridge Rectifier……...35

4.3 สวิทซ์ในคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบ Zero Voltage Switching (ZVS) ……..……35

4.3.1 เงื่อนไขช่วงเวลา Dead-time (t_d)
ที่น้อยที่สุด (t_{min}) (พิจารณาเฉพาะที่ S_2)……. ……..36

4.3.2 เงื่อนไขช่วงเวลา Dead-time (t_d)
ที่มากที่สุด (t_{max}) (พิจารณาเฉพาะที่ S_2)……. …….39

4.4 การทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
คอนเวอร์เตอร์ภายใต้เงื่อนไข ZVS……40

4.4.1ช่วงเวลาแรก ที่เวลา t_0 ถึง t_1……...41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2 ช่วงเวลาที่สอง ที่เวลา t_1 ถึง t_2.....42

4.4.3 ช่วงเวลาที่สาม ที่เวลา t_2 ถึง t_3.....42

4.4.4 ช่วงเวลาที่สี่ ที่เวลา t_3 ถึง t_4.....43

4.4.5 ช่วงเวลาที่ห้า ที่เวลา t_4 ถึง t_5.....43

4.4.6 ช่วงเวลาที่หก ที่เวลา t_5 ถึง t_6.....44

4.7 สรุป.....44

บทที่ 5 การออกแบบระบบควบคุมและวงจรควบคุม.....45

5.1 บทนำ.....45

5.2 คุณสมบัติของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิทช์ที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ.....45

5.2.1 เสถียรภาพ.....47

5.2.2 คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี.....48

5.3 วงจรแบ่งแรงดันทางไฟฟ้าที่มี Optocoupler.....49

5.4 วงจรควบคุม.....50

5.5 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ (VCO) 52

5.6 การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณขนาดเล็กของ
เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม.....53

5.7 การออกแบบวงจรควบคุม.....56

5.8 สรุป.....58

บทที่ 6 การออกแบบวงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ 59

6.1 บทนำ.....59

6.2 การวัดพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....59

6.2.1 ขั้นตอนที่ 1.....59

6.2.2 ขั้นตอนที่ 2.....62

6.2.3 ขั้นตอนที่ 3.....64

6.3 การออกแบบวงจรภาคกำลัง.....65

6.3.1ขั้นตอนที่หนึ่งคำนวณหาค่าโหลดที่เหมาะสม.....65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3.2 ขั้นตอนที่ 2 หาช่วงเวลา Dead-time……..…...66

6.3.3 ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาช่วงแรงดันไฟฟ้า V_{DC} ที่เปลี่ยนแปลงได้.....66

6.4 การออกแบบวงจรควบคุม……..……..68

6.4.1 ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณขนาดเล็ก ของภาคกำลัง.....68

6.4.2 ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบวงจรควบคุม……..69

6.5 สรุป……..73

บทที่ 7 การทดลองและผลการทดลอง……....74

7.1 บทนำ…….……...74

7.2 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของ วงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอเตอร์ต้นแบบ……....74

7.3 การทดสอบวัดค่าประสิทธิภาพของ วงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์.....77

7.4 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ ทางออกของวงจรเปียโซอิเล็กทริกคอนเวอร์เตอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ……...79

7.5 การทดสอบการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ ทางออกของวงจรเปียโซอิเล็กทริก ทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ……80

บทที่ 8 วิจารณ์ผลการทดลอง……..83

บรรณานุกรม ……..……85

ภาคผนวก.....87

ภาคผนวก ก. โปรแกรม MathCAD สำหรับการวิเคราะห์และการออกแบบ วงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์ตอร์……...82

ภาคผนวก ข บทความวิชาการฉบับสมบูรณ์ที่ได้รับการตีพิมพ์……..……..……...99

ประวัติผู้เขียน……119

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 การทำโพลลิ่ง (ก)ขั้วของโมเลกุลยังมีทิศที่ไม่เป็นแนวเดียวกัน,
(ข)เมื่อมีการให้ สนามแม่เหล็ก (ค) ขั้วของโมเลกุลที่สภาวะคงตัว.....5

2. 2 คุณสมบัติของวัตถุที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก
(ก) เปียโซอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์ (ข) เปียโซอิเล็กทริก แอคชวลเตอร์.....7

2.3 รูปแบบการทำงานของ Longitudinal Mode.....7

2.4 รูปแบบการทำงานของ Transverse Mode.....8

2.5 คุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางกลของเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก.....8

2.6 ลักษณะการการยืด/หดของวัตถุที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริกเซรามิก.....9

2.7 Reson-type เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....10

2.8 Thickness Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....10

2.9 Radial Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....11

2.10 วงจรสมมูลเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกขณะไม่มีโหลด.....11

2.11 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์โดยทั่วไป.....14

3.1 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....16

3.2 การวัดพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....17

3.3 การวัด Admittance ที่ทางเข้าและลัดวงจรด้านทางออก.....17

3.4 วงจรสมมูลที่ได้จากการวัดพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของ
เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ตามรูปที่ 3.3 18

3.5 Admittance ด้านทางเข้าเมื่อลัดวงจรที่ด้านทางออก.....18

3.6 การวัด Admittance ทางออกลัดวงจรด้านทางเข้า.....19

3.7 วงจรสมมูลที่ได้จากการวัดพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของ
เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ตามรูปที่ 3.6 19

3.8 Admittance ด้านทางออกเมื่อลัดวงจรที่ด้านทางเข้า.....19

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.9 วงจรสมมูลทั่วไปของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ขณะลัดวงจร
ด้านทางเข้าหรือทางออก……...20
3.10 การแสดงการวัดพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ด้วย Admittance circle 21
3.11 วงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ก่อนการยุบวงจรเพื่อวิเคราะห์ Input Impedance.....23
3.12 วงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์หลังการยุบวงจรเพื่อวิเคราะห์ Input Impedance 23
3.13 กราฟของขนาด Input Impedance.....24
3.14 กราฟของมุม Input Impedance.....25
3.15 วงจรหาอัตราการขยายแรงดันทางไฟฟ้า.....27
3.16 ขนาดของอัตราการขยายแรงดันทางไฟฟ้า.....28
3.17 มุมของอัตราการขยายของแรงดันไฟฟ้า……....…27
3.18 เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ที่ความถี่ ω_r ……28
3.19 ย้าย V_{in}และ R ด้านประถมภูมิมาทางด้านทุติยภูมิ……29
3.20 ประสิทธิภาพสูงสุดและโหลดที่เหมาะสม.....32
4.1 โครงสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง……...……...33
4.2 วงจรส่วนของการส่งถ่ายพลังงาน.....34
4.3 วงจรสมมูล Full Bridge Rectifier.....35
4.4 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์และคอนเวอร์เตอร์.....……...36
4.5 ช่วงเวลาการทำงานของ ZVS 36
4.6 แสดงช่วงเวลา Dead-time ที่ทำให้เกิดเงื่อนไข ZVS...……..……40
4.7 คาบเวลาการทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์
เมื่อทำงานแบบ ZVS……..……40
4.8 การทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา t_0- t_1……...…41
4.9 การทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา t_1- t_2……..41
4.10 การทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา t_2- t_3.....42
4.11 การทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา t_3- t_4……...…..…42
4.12 การทำงานของปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา t_4- t_5……..…43
4.13 การทำงานของปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา t_5- t_6……..…43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.1 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิทซ์……...……45

5.2 บล็อกไดอะแกรมชนิดสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุม
ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิทซ์……...…….…..46

5.3 กราฟแสดง Phase margin และ Gain margin ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด…….…..48

5.4. กราฟของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ต้องการ.....53

5.5 วงจรแสดงการทำงานของ Optocoupler ……..…….…..50

5.6 วงจรควบคุมที่สร้างด้วยวงจรขยายสัญญาณความผิดพลาด.....51

5.7 วงจรควบคุมแบบ 3 – Pole 2 - Zero.....51

5.8 แผนภาพแสดงการทำงานของ VCO.....53

5.9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ V_{out} กับความถี่.....…….…….…53

5.10 วงจรจำลองสัญญาณขนาดเล็กเพื่อวิเคราะห์ของ
ฟังก์ชันถ่ายโอนเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม……54

5.11 แผนภาพแสดงสัญญาณขนาดเล็กของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม.....55

5.12 แผนภาพแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุมและการทำ Curve fitting……..55

5.13 รูปกราฟของการออกแบบวงจรวงจรควบคุมแบบ 3 – Pole 2 – Zero……..57

6.1 กราฟแสดงกราฟ G, B ……..59

6.2 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ R ด้านทางเข้า……60

6.3 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ L ด้านทางเข้า……61

6.4 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C ด้านทางเข้า……61

6.5 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C_{d1} ด้านทางเข้า.....61

6.6 กราฟแสดงกราฟ G, B……...62

6.7 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ R ด้านทางออก……..63

6.8 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ L ด้านทางออก……..63

6.9 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C ด้านทางออก……..63

6.10 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C_{d2} ด้านทางออก……64

6.11 กราฟแสดงโหลดที่เหมาะสม……..65

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.12 กราฟการแสดง Dead-time……66
6.13 กราฟแสดงอัตราการขยายระหว่าง V_{DC}และ V_{out}……67
6.14 วงจรจำลองสัญญาณขนาดเล็กของฟังก์ชันถ่ายโอนเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม……68
6.15 กราฟแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรภาคกำลังแบบ Small Signal และการทำ Curve Fitting ……69
6.16 กราฟแสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรควบคุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $G_c(s)$.. 71
6.17 กราฟแสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรควบคุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $G_c(s)$.....71
6.18 กราฟแสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรควบคุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม$T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $G_c(s)$ จากการคำนวณ.....72
6.19 กราฟแสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรควบคุม, $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $G_c(s)$ จากการคำนวณ……..……..73
7.1 ตำแหน่งของการวัดคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ.....75
7.2 คลื่นสัญญาณ v_{gs1} , v_{gs2} , v_{ds2} และ i_{in} ที่โหลด 500Ω , V_{DC} =50V และ V_{out} =20V ของวงจรวงจรคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ……..……..……...75
7.3 คลื่นสัญญาณ v_{ds2} และ v_{ds2} ที่โหลด 500Ω , V_{DC} =50V และ V_{out} =20V ของวงจรเปียโซอิเล็ก ทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ……76
7.4 คลื่นสัญญาณ v_{ds2} และ i_{in} ที่โหลด 500Ω , V_{DC} =50V และ V_{out} =20V ของวงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ……....76
7.5 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ทางเข้า.....77
7.6 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ทางออก.....78
7.7 ผลการวัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์ต้นแบบ.....78

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

7.8 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออก.....79
7.9 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าเปลี่ยนแปลง.....80
7.10 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อโหลดที่ทางออกเปลี่ยนแปลง.....80
7.11 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออก.....81
7.12 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจาก 800Ω ไปเป็น 500Ω ……..82
7.13 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจาก 500Ω ไปเป็น 800Ω……...82

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A คือค่าอัตราการแปลงพลังงานจากไฟฟ้ามาเป็นพลังงานทางกล

A_c คืออัตราการส่งถ่ายพลังงานทางกลของเปียโซอิเล็กทริกด้านทางเข้าให้กับเปียโซอิเล็กทริกด้านทางออก

A_m คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้รบกวน

A_{out} คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์

A_v คือค่าขนาดของอัตราการขยายแรงดันทางไฟฟ้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

A_1 คืออัตราการส่งถ่ายพลังงานทางไฟฟ้าไปเป็นพลังงานทางกลของเปียโซอิเล็กทริกด้านทางเข้า

A_2 คืออัตราการส่งถ่ายพลังงานทางไฟฟ้าไปเป็นพลังงานทางกลของเปียโซอิเล็กทริกด้านทางออก

B ค่า Susceptance

B_r ค่า Susceptance ที่ความถี่ Resonance

b ค่าความหน่วง

C ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C

C_b ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_b

C_{d1} ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุด้านทางเข้า

C_{d2} ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุด้านทางออก

C_m ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_m ที่จำลองมาจากทางกล

C'_{m1} ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C'_{m1} ที่จำลองมาจากทางกลของเปียโซอิเล็กทริกด้านทางเข้า

C_{m2} ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_{m2} ที่จำลองมาจากทางกลของเปียโซอิเล็กทริกด้านทางออก

C_1 ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1

C_2 ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2

C_3 ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_3

$C_{ทางเข้า}$ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C_{ทางเข้า}$ ที่ลัดวงจรด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$C_{ทางออก}$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C_{ทางออก}$ ที่ลัดวงจรด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอ์เมอร์
dB	เดซิเบล
D_1	ไดโอดเรียงกระแส D_1
D_2	ไดโอดเรียงกระแส D_2
E	สนามไฟฟ้า
f	ความถี่
f_c	ความถี่ของสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้รบกวนระบบ
f_{cv}	ความถี่Crossover
f_H	ความถี่ที่ทำให้ค่า Susceptance ต่ำสุด
f_L	ความถี่ที่ทำให้ค่า Susceptance สูงสุด
f_{p1}	ความถี่ของโพลตัวที่หนึ่งของวงจรควบคุม
f_{p2}	ความถี่ของโพลตัวที่สองของวงจรควบคุม
$f_{p,p1}$	ความถี่ของโพลตัวที่หนึ่งของการทำ Curve fitting
$f_{p,p2}$	ความถี่ของโพลตัวที่สองของการทำ Curve fitting
f_m	ความถี่ของสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้รบกวน
$f_{\min}$	ความถี่ในการสวิตช์ต่ำสุด
f_{max}	ความถี่ในการสวิตช์สูงสุด
f_r	ความถี่รีโซแนท
f_s	ความถี่ในการสวิตช์
$\hat{f}_s$	ความถี่ในการสวิตช์ที่เป็นสัญญาณขนาดเล็ก
f_{z1}	ความถี่ของซีโร่ตัวที่หนึ่งของวงจรควบคุม
f_{z2}	ความถี่ของซีโร่ตัวที่สองของวงจรควบคุม
F	หน่วยของ Capacitor
G	ค่า Conductance
$G_c(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุม
$G_{vco}(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันเอาต์พุตและความถี่ของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า
$G_p(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลัง
$\left\|G_c(s)\right\|$	อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุม

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\left\|G_p(s)\right\|$	อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลัง
GM	Gain margin
G_{max}	ค่า Conductance สูงสุด
H	หน่วยของค่า Inductance
$H(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของ Optocoupler
Hz	หน่วยของความถี่
I_C	กระแสไฟฟ้าด้านทางเข้าของ Optocoupler
I_F	กระแสไฟฟ้าด้านทางออกของ Optocoupler
i_{in}	กระแสไฟฟ้าด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
i_L	กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำ
K	ค่าพารามิเตอร์ของ Spring
K_c	อัตราขยายดีซีของฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรควบคุม
K_d	อัตราขยายของกระแส I_C กับ I_F
K_H	อัตราขยายของ Optocoupler
L	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ L
L_m	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ L_m ที่จำลองมาจากทางกล
L'_{m1}	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ L'_{m1} ที่จำลองมาจากทางกลของเปียโซอิเล็กทริกด้านทางเข้า
L_{m2}	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ L_{m2} ที่จำลองมาจากทางกลของเปียโซอิเล็กทริกด้านทางออก
$L_{ทางเข้า}$	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ $L_{ทางเข้า}$ที่ลัดวงจรด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอ์เมอร์
$L_{ทางออก}$	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ $L_{ทางออก}$ที่ลัดวงจรด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอ์เมอร์
m	หน่วยวัด
M	ค่าของมวล
n	หน่วยวัด
N	คืออัตราการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานรวมของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

P_{in}	กำลังไฟฟ้าด้านทางเข้า
$P_{in,max}$	กำลังไฟฟ้าด้านทางเข้าสูงสุด
P_{out}	กำลังไฟฟ้าด้านทางออก
$P_{out,max}$	กำลังไฟฟ้าด้านทางออกสูงสุด
PM	Phase margin
Q	ค่า Mechanical Quality factor
rad/sec	เรเดียนต่อวินาที
R	ความต้านทานของตัวต้านทาน R
R_1	ความต้านทานของตัวต้านทาน R_1
R_2	ความต้านทานของตัวต้านทาน R_2
R_3	ความต้านทานของตัวต้านทาน R_3
R_{eq}	ความต้านทานของตัวต้านทานสมมูล
R_{Load}	ความต้านทานของโหลด
R_L	ความต้านทานของโหลด
$R_{L,opt}$	ความต้านทานของโหลดที่ทำให้เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
R_{max}	ความต้านทานสูงสุดของโหลด
R_{min}	ความต้านทานต่ำสุดของโหลด
R_m	ความต้านทานของตัวต้านทาน R_m ที่จำลองมาจากทางกล
R'_{m1}	ความต้านทานของตัวต้านทาน R'_{m1} ที่จำลองมาจากทางกลของเปียโซอิเล็กทริกด้านทางเข้า
R_{m2}	ความต้านทานของตัวต้านทาน R_{m2} ที่จำลองมาจากทางกลของเปียโซอิเล็กทริกด้านทางออก
$R_{ทางเข้า}$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_{ทางเข้า}$ ที่ลัดวงจรด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
$R_{ทางออก}$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_{ทางออก}$ ที่ลัดวงจรด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
s	วินาที
S_1	สวิตซ์ตัวที่หนึ่ง
S_2	สวิตซ์ตัวที่สอง

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

t	เวลา
t_d	ช่วงเวลา Dead-time
t_{min}	ช่วงเวลา Dead-time น้อยที่สุด
t_{max}	ช่วงเวลา Dead-time มากที่สุด
t_{on}	ช่วงเวลาที่มอสเฟตนำกระแสไฟฟ้า
t_{off}	ช่วงเวลาที่มอสเฟตหยุดนำกระแสไฟฟ้า
T_s	คาบเวลาในการสวิตช์
$T(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบควบคุมป้อนกลับ
$\lvert T(s)\rvert$	อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบควบคุมป้อนกลับ
$\angle T(s)$	เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบควบคุมป้อนกลับ
v_c	สัญญาณควบคุม
v_{in}	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
$\hat{v}_c$	สัญญาณควบคุมที่เป็นสัญญาณขนาดเล็ก
v_o	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก Optocoupler
$\hat{v}_o$	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก Optocoupler ที่เป็นสัญญาณขนาดเล็ก
v_{out}	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านทางออกของคอนเวอร์เตอร์
$\hat{v}_{out}$	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านทางออกของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นสัญญาณขนาดเล็ก
v_{ref}	แรงดันอ้างอิง
$\hat{v}_{ref}$	แรงดันอ้างอิงที่เป็นสัญญาณขนาดเล็ก
V	หน่วยวัดแรงดันไฟฟ้า
V_{DC}	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ด้านทางเข้าของคอนเวอร์เตอร์
V_o	แรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก Optocoupler ที่สภาวะคงคัว
V_{out}	แรงดันไฟฟ้าด้านทางออกของคอนเวอร์เตอร์ที่สภาวะคงคัว
X_c	ค่าอิมพีแดนซ์ของ C
X_{cb}	ค่าอิมพีแดนซ์ของ C_b
X_L	ค่าอิมพีแดนซ์ของ L
X_R	ค่าอิมพีแดนซ์ของ R
Y	ค่า Admittance
Y_{in}	ค่า Admittance ด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

Z_{in}	Impedance ด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
Z_f	Impedance ป้อนกลับของวงจรขยายความผิดพลาด
Z_i	Impedance ที่ทางเข้าของวงจรขยายความผิดพลาด
Z_1	Impedance ของ Z_1
Z_2	Impedance ของ Z_2
Z_3	Impedance ของ Z_3
μ	หน่วยวัด
π	ค่าคงที่ประมาณ 3.14
Ω	หน่วยวัดค่าความต้านทาน
ω_{p1}	ความถี่เชิงมุมของโพลตัวที่หนึ่งของวงจรควบคุม
ω_{p2}	ความถี่เชิงมุมของโพลตัวที่สองของวงจรควบคุม
ω_{z1}	ความถี่เชิงมุมของซีโร่ตัวที่หนึ่งของวงจรควบคุม
ω_{z2}	ความถี่เชิงมุมของซีโร่ตัวที่สองของวงจรควบคุม
ϕ	ค่ามุมระหว่างสัญญาณขนาดเล็กด้านทางออกกับทางเข้าด้าน
ϕ_{in}	ค่ามุมของ Impedance ด้านทางเข้า
ϕ_{AV}	ค่ามุมของอัตราการขยายแรงดันทางไฟฟ้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์
η	ค่าประสิทธิภาพของวงจร
$\eta_{\max}$	ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของวงจร
θ	ค่ามุมระหว่างสัญญาณแรงดันทางไฟฟ้าด้านทางเข้ากับสัญญาณกระแสด้านทางเข้า