

การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์โดยใช้เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

DESIGN OF A ZERO-VOLTAGE-SWITCH CONVERTER USING A PIEZOELECTRIC TRANSFORMER.

ประสิทธิ์ พลหาญ
PRASIT PONHAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

บัณฑิตศึกษาดุษฎี

ตงฉบับแรกโดยศาสตราจารย์ ดร. อรรถสิทธิ์ อรรถสิทธิ์

พ.ศ. 2549

ISBN 974-8308-13-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์โดยใช้เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

**DESIGN OF A ZERO-VOLTAGE-SWITCH CONVERTER USING A
PIEZOELECTRIC TRANSFORMER.**



ประสิทธิ์ พลหาญ

PRASIT PONHAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-8308-18-9

**DESIGN OF A ZERO-VOLTAGE-SWITCH CONVERTER USING A
PIEZOELECTRIC TRANSFORMER.**

PRASIT PONHAN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL SYSTEM ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-8308-18-9

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

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

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ DC/DC คอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ทดแทนแมกเน็ติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ออกแบบให้ สวิตช์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าตกคล่อมสวิตช์เป็นศูนย์ และทำงานภายใต้เงื่อนไขโหลดที่เหมาะสม ในการออกแบบวงจรควบคุม จะใช้การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ โดยรวมด้วยวิธีการจำลอง แบบการทำงานอย่างง่ายด้วยโปรแกรม Pspice และออกแบบวงจรควบคุมแบบสาม โพลสองซีโร ผลการทดลองพบว่าวงจรต้นแบบมีสมรรถนะการทำงานที่ดี โดยวงจรมีประสิทธิภาพสูง ($\approx 93\%$), 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 ($\approx 93\%$).

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร. นนทวัฒน์ จุลเคชะ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำและความกรุณาที่ผู้วิจัยได้รับตลอดมา

ขอขอบคุณ ดร.ชรินทร์ 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 การวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์	
ทรานซิวเซอร์.....	16
3.1 บทนำ.....	16
3.2 หลักการวัด.....	17
3.2.1 ขั้นตอนที่ 1	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 เปียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์.....	28
3.7 สรุป.....	32
บทที่ 4 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับเปียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์	33
4.1 บทนำ.....	33
4.2 ภาคการส่งถ่ายกำลังงาน.....	34
4.2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์.....	34
4.2.2 เปียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์.....	34
4.2.3 วงจร Bridge Rectifier.....	35
4.3 สวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบ 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 การทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์ คอนเวอร์เตอร์ภายใต้เงื่อนไข ZVS.....	40
4.4.1 ช่วงเวลาแรก 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 คุณสมบัติของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ.....	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 เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม.....	53
5.7 การออกแบบวงจรควบคุม.....	56
5.8 สรุป.....	58
บทที่ 6 การออกแบบวงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์คอนเวอร์เตอร์	59
6.1 บทนำ.....	59
6.2 การวัดพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์.....	59
6.2.1 ขั้นตอนที่ 1.....	59
6.2.2 ขั้นตอนที่ 2.....	62
6.2.3 ขั้นตอนที่ 3.....	64
6.3 การออกแบบวงจรภาคกำลัง.....	65
6.3.1 ขั้นตอนที่หนึ่งคำนวณหาค่าโหลดที่เหมาะสม.....	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3.2 ขั้นตอนที่ 2 หาช่วงเวลา Dead-time.....	66
6.3.3 ขั้นตอนที่ 3 กำหนดหาช่วงแรงดันไฟฟ้า 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 วงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ.....	74
7.3 การทดสอบวัดค่าประสิทธิภาพของ วงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์.....	77
7.4 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ ทางออกของวงจรเพียโซอิเล็กทริกคอนเวอร์เตอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ.....	79
7.5 การทดสอบการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ ทางออกของวงจรเพียโซอิเล็กทริก ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ.....	80
บทที่ 8 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	83
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก. โปรแกรม MathCAD สำหรับการวิเคราะห์และการออกแบบ วงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์.....	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 แอคชวลเตอรื.....	7
2.3 รูปแบบการทำงานของ Longitudinal Mode.....	7
2.4 รูปแบบการทำงานของ Transverse Mode.....	8
2.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก.....	8
2.6 ลักษณะการการยืด/หดของวัตถุที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริกเซรามิก.....	9
2.7 Reson-type เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์.....	10
2.8 Thickness Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์.....	10
2.9 Radial Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์.....	11
2.10 วงจรสมมูลเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกขณะไม่มีโหลด.....	11
2.11 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์โดยทั่วไป.....	14
3.1 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์.....	16
3.2 การวัดพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์.....	17
3.3 การวัด Admittance ที่ทางเข้าและลัดวงจรด้านทางออก.....	17
3.4 วงจรสมมูลที่ได้จากการวัดพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของ เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ตามรูปที่ 3.3	18
3.5 Admittance ด้านทางเข้าเมื่อลัดวงจรที่ด้านทางออก.....	18
3.6 การวัด Admittance ทางออกลัดวงจรด้านทางเข้า.....	19
3.7 วงจรสมมูลที่ได้จากการวัดพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของ เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ตามรูปที่ 3.6	19
3.8 Admittance ด้านทางออกเมื่อลัดวงจรที่ด้านทางเข้า.....	19

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 วงจรสมมูลทั่วไปของเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์ขณะลัดวงจร ด้านทางเข้าหรือทางออก.....	20
3.10 การแสดงการวัดพารามิเตอร์ของเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์ด้วย Admittance circle	21
3.11 วงจรเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์ก่อนการยวบวงจรเพื่อวิเคราะห์ Input Impedance.....	23
3.12 วงจรเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์หลังการยวบวงจรเพื่อวิเคราะห์ Input Impedance	23
3.13 กราฟของขนาด Input Impedance.....	24
3.14 กราฟของมุม Input Impedance.....	25
3.15 วงจรหาอัตราขยายแรงดันทางไฟฟ้า.....	27
3.16 ขนาดของอัตราขยายแรงดันทางไฟฟ้า.....	28
3.17 มุมของอัตราขยายของแรงดันไฟฟ้า.....	27
3.18 เบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์ที่ความถี่ ω	28
3.19 ย้าย V_{in} และ R ด้านประตมภูมิมาทางด้านทุติยภูมิ.....	29
3.20 ประสิทธิภาพสูงสุดและ โหลดที่เหมาะสม.....	32
4.1 โครงสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้เบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์ เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง.....	33
4.2 วงจรส่วนของการส่งถ่ายพลังงาน.....	34
4.3 วงจรสมมูล Full Bridge Rectifier.....	35
4.4 วงจรสมมูลของเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์และคอนเวอร์เตอร์.....	36
4.5 ช่วงเวลาการทำงานของ ZVS	36
4.6 แสดงช่วงเวลา Dead-time ที่ทำให้เกิดเงื่อนไข ZVS.....	40
4.7 คาบเวลาการทำงานของเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ เมื่อทำงานแบบ ZVS.....	40
4.8 การทำงานของเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_0- t_1$	41
4.9 การทำงานของเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_1- t_2$	41
4.10 การทำงานของเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_2- t_3$	42
4.11 การทำงานของเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_3- t_4$	42
4.12 การทำงานของเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_4- t_5$	43
4.13 การทำงานของเบี่ยโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_5- t_6$	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์.....	45
5.2 บล็อกไดอะแกรมชนิดสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุม ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์.....	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 ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็ยโซอิล็กทริกทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม.....	54
5.11 แผนภาพแสดงสัญญาณขนาดเล็กของเป็ยโซอิล็กทริกทรานฟอ์เมอร์ คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม.....	55
5.12 แผนภาพแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของเป็ยโซอิล็กทริกทรานฟอ์เมอร์ คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุมและการทำ Curve fitting.....	55
5.13 รูปกราฟของการออกแบบวงจรจรวงจรควบคุมแบบ 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_{i1} 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_{i2} ด้านทางออก.....	64
6.11 กราฟแสดงโพลด์ที่เหมาะสม.....	65

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12 กราฟการแสดง Dead-time.....	66
6.13 กราฟแสดงอัตราขยายระหว่าง V_{DC} และ V_{out}	67
6.14 วงจรจำลองสัญญาณขนาดเล็กลงของฟังก์ชันถ่ายโอนเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม.....	68
6.15 กราฟแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรรากกำลังแบบ Small Signal และการทำ Curve Fitting	69
6.16 กราฟแสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรควบคุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชัน ถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $G_c(s)$..	71
6.17 กราฟแสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรควบคุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่าย โอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $T(s)$, 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 ตำแหน่งของการวัดคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรวัด ทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ.....	75
7.2 คลื่นสัญญาณ v_{gs1} , v_{gs2} , v_{ds2} และ i_{in} ที่โหลด 500Ω , $V_{DC} = 50V$ และ $V_{out} = 20V$ ของวงจรวัดคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ.....	75
7.3 คลื่นสัญญาณ v_{ds2} และ v_{ds2} ที่โหลด 500Ω , $V_{DC} = 50V$ และ $V_{out} = 20V$ ของวงจรวัดเปียโซอิเล็กทริก ทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ.....	76
7.4 คลื่นสัญญาณ v_{ds2} และ i_{in} ที่โหลด 500Ω , $V_{DC} = 50V$ และ $V_{out} = 20V$ ของวงจรวัดเปียโซอิเล็กทริก ทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ.....	76
7.5 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ทางเข้า.....	77
7.6 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ทางออก.....	78
7.7 ผลการวัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวงจ วัดเปียโซอิเล็กทริก ทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ.....	78

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.8 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออก.....	79
7.9 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าเปลี่ยนแปลง.....	80
7.10 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อ โหลดที่ทางออกเปลี่ยนแปลง.....	80
7.11 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออก.....	81
7.12 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ คอนเวอร์เตอร์ดันแบบเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจาก 800Ω ไปเป็น 500Ω	82
7.13 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ คอนเวอร์เตอร์ดันแบบเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจาก 500Ω ไปเป็น 800Ω.....	82

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	คือค่าอัตราการแปลงพลังงานจากไฟฟ้ามาเป็นพลังงานทางกล
A_c	คืออัตราการส่งถ่ายพลังงานทางกลของเปียโซอิเล็กทริกด้านทางเข้าให้กับเปียโซอิเล็กทริกด้านทางออก
A_m	คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้รับกวน
A_{out}	คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์
A_v	คือค่าขนาดของอัตราการขยายแรงดันทางไฟฟ้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
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 $C_{ทางเข้า}$ ที่ลัดวงจรด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$C_{\text{ทางออก}}$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C_{\text{ทางออก}}$ ที่ลัดวงจรด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
dB	เดซิเบล
D_1	ไดโอดเรียงกระแส D_1
D_2	ไดโอดเรียงกระแส D_2
E	สนามไฟฟ้า
f	ความถี่
f_c	ความถี่ของสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้ระบบ
f_{cv}	ความถี่ Crossover
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	ความถี่ของสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้ระบบ
f_{\min}	ความถี่ในการสวิตช์ต่ำสุด
f_{\max}	ความถี่ในการสวิตช์สูงสุด
f_r	ความถี่รีโซแนนท์
f_s	ความถี่ในการสวิตช์
\hat{f}_s	ความถี่ในการสวิตช์ที่เป็นสัญญาณขนาดเล็ก
f_{z1}	ความถี่ของซีโรตัวที่หนึ่งของวงจรควบคุม
f_{z2}	ความถี่ของซีโรตัวที่สองของวงจรควบคุม
F	หน่วยของ Capacitor
G	ค่า Conductance
$G_c(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุม
$G_{vco}(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันเอาต์พุตและความถี่ของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า
$G_p(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลัง
$ G_c(s) $	อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุม

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$ G_p(s) $	อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรากกำลัง
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}	กระแสไฟฟ้าด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
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 $L_{ทางเข้า}$ ที่จำลองทางด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
$L_{ทางออก}$	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ $L_{ทางออก}$ ที่จำลองทางด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
m	หน่วยวัด
M	ค่าของมวล
n	หน่วยวัด
N	คืออัตราการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานรวมของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

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
$R_{L,opt}$	ความต้านทานของโหลดที่ทำให้เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
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 $R_{ทางเข้า}$ ที่ลัดวงจรด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
$R_{ทางออก}$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_{ทางออก}$ ที่ลัดวงจรด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
s	วินาที
S_1	สวิตช์ตัวที่หนึ่ง
S_2	สวิตช์ตัวที่สอง

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
$ T(s) $	อัตรายายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบควบคุมป้อนกลับ
$\angle T(s)$	เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบควบคุมป้อนกลับ
v_c	สัญญาณควบคุม
v_{in}	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์
\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 ที่สภาวะคงตัว
V_{out}	แรงดันไฟฟ้าด้านทางออกของคอนเวอร์เตอร์ที่สภาวะคงตัว
X_c	ค่าอิมพีแดนซ์ของ C
X_{cb}	ค่าอิมพีแดนซ์ของ C_b
X_L	ค่าอิมพีแดนซ์ของ L
X_R	ค่าอิมพีแดนซ์ของ R
Y	ค่า Admittance
Y_{in}	ค่า Admittance ด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

Z_{in}	Impedance ด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
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}	ความถี่เชิงมุมของซีโรตัวที่หนึ่งของวงจรควบคุม
ω_{z2}	ความถี่เชิงมุมของซีโรตัวที่สองของวงจรควบคุม
ϕ	ค่ามุมระหว่างสัญญาณขนาดเล็กด้านทางออกกับทางเข้าด้าน
ϕ_{in}	ค่ามุมของ Impedance ด้านทางเข้า
ϕ_{AV}	ค่ามุมของอัตราขยายแรงดันทางไฟฟ้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
η	ค่าประสิทธิภาพของวงจร
η_{max}	ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของวงจร
θ	ค่ามุมระหว่างสัญญาณแรงดันทางไฟฟ้าด้านทางเข้ากับสัญญาณกระแสด้านทางเข้า

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่บางชนิดถูกพัฒนาขึ้นให้มีขนาดบางลง เช่น โทรศัพท์ชนิดจอแบน, จอคอมพิวเตอร์ Notebook เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้ก็ต้องมีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดที่บางตามไปด้วย โดยทั่วไประบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นชนิด Switched – mode Power Supply (เพราะมีขนาดเล็ก) แต่ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าง่ายๆมีข้อจำกัดที่ต้องใช้ทรานส์ฟอร์มเมอร์แบบ แมกเนติก (Magnetic Transformer) (ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งผ่านกำลังไฟฟ้าด้วยสนามแม่เหล็ก) ซึ่งมีความหนาแน่นสูง ทำให้นำไปใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีข้อจำกัดที่ความบางได้ลำบาก ปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังชนิดใหม่ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งผ่านกำลังไฟฟ้าด้วยการสั่นสะเทือนทางกลคือ เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Piezoelectric Transformer) ที่มีข้อดีที่สำคัญคือ มีขนาดที่บางมาก (ประมาณ 1 mm) และไม่เกิดสนามแม่เหล็กขณะทำงาน ทำให้การรบกวนของสนามแม่เหล็กต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์น้อยมาก นอกจากนั้นเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ สามารถออกแบบและสร้างให้ทำงานที่ความถี่สูงได้ ซึ่งมีผลทำให้การกำหนดขนาดของวงจรการทำงานจากระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าทำงานได้ที่ความถี่สูงตามไปด้วย (ขนาดของวงจรเล็กลง)

ดังนั้นการพัฒนานำเอาเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ มาประยุกต์ใช้แทนแมกเนติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นชนิด Switched – mode Power Supply จึงเป็นหัวข้อวิจัยที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปบ้างแล้ว แต่ในประเทศไทยยังคงมีปัญหาในการพัฒนาอย่างมาก เช่น การจัดหาเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ซึ่งมีราคาแพงมากและต้องสั่งผลิตโดยเฉพาะ, การทำความเข้าใจคุณสมบัติการแปลงรูปกำลังจากกำลังทางไฟฟ้าเป็นกำลังทางกลและแปลงกลับเป็นกำลังทางไฟฟ้าอีกต่อหนึ่ง, การใช้วงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม และการออกแบบการควบคุมการทำงาน งานวิจัยเรื่องนี้จึงได้รับความสนใจและสนับสนุนให้วิจัยจากหลายฝ่าย เช่น MTEC (National Metal and Materials Technology Center) และ บริษัท DELTA ELECTRONICS (THAILAND) PUBLIC CO., LTD.

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาหลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
2. ศึกษาที่มาของวงจรสมมูลและวิธีการวัดค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
3. ศึกษาการวิเคราะห์สมการคุณลักษณะของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
4. ศึกษาวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานร่วมกับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่เหมาะสม
5. ศึกษาวงจรสมมูลรวมของคอนเวอร์เตอร์กับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
6. ศึกษาการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์วงจร

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1. การศึกษาเกี่ยวกับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์จะศึกษาโดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าจำลองการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ โดยไม่เข้าไปในการศึกษาการทำงานทาง Physics ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

2. การศึกษาเกี่ยวกับการวัดพารามิเตอร์ภายในของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์จะใช้เทคนิคที่เหมาะสมกับเครื่องมือวัดที่มีอยู่แล้ว

3. การศึกษาวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ จะพิจารณาคอนเวอร์เตอร์ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งได้แก่คอนเวอร์เตอร์ที่สวิตช์ทำงานแบบ Zero Voltage Switching (ZVS) และต้องใช้ประโยชน์จากพารามิเตอร์ภายในของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่จะมาประกอบกันเป็นวงจรทำให้สวิตช์ทำงานแบบ ZVS

4. การควบคุมเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ต้องเลือกระบบควบคุมที่เหมาะสมเพราะเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ มีอัตราขยายของแรงดันไฟฟ้าเป็นชนิดควบคุมด้วยความถี่และก่อนที่จะออกแบบระบบควบคุมได้ ต้องวิเคราะห์ Small Signal Model ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งวิธีวิเคราะห์จะนำเสนอเทคนิคอย่างง่าย

5. การออกแบบวงจรควบคุมจะใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ Open Loop Gain ด้วยกราฟของ Bode

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์, การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์, ออกแบบ DC/DC คอนเวอร์เตอร์ชนิด ZVS แบบ Step – down ที่ใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง, การวิเคราะห์ Small Signal Model ของรีโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์, ออกแบบระบบควบคุมและวงจรควบคุมของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ คอนเวอร์เตอร์

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาหลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
2. ศึกษาวิธีการวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
3. ศึกษาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
4. ศึกษาการออกแบบระบบควบคุมและวงจรควบคุม
5. ศึกษาการออกแบบวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์
6. การทดลองและผลการทดลอง
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 2

เปียโซอิเล็กทริก และเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

2.1 บทนำ

เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างมาจากสารเซรามิก เช่น ควอตซ์(Quartz) ลิเทียมไนโอเบท(LithiumNiobate) และ PZT (Lead Zirconate Titanate) มีหลักการทำงาน โดยอาศัยการสั่นสะเทือนเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงานและมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ขนาดบาง, น้ำหนักเบา, ทำงานโดยไม่ใช้การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กเพื่อส่งถ่ายพลังงาน, ประสิทธิภาพสูงและมีพิสัยการทำงานที่ความถี่สูง คุณสมบัติต่างๆ นี้จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายพลังงานในแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีข้อจำกัดที่ขนาด ความสูง และพื้นที่ใช้งาน

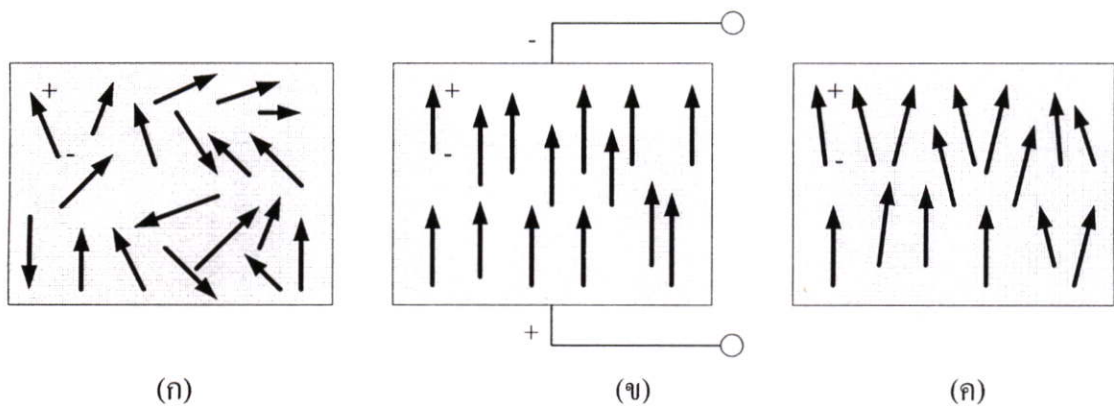
โครงสร้างและการทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ มีการประยุกต์มาจากหลักการทำงานของเปียโซอิเล็กทริก โดยการนำเปียโซอิเล็กทริกสองชิ้นมาเชื่อมต่อกันโดยชิ้นแรกทำหน้าที่เป็นแอคชูเอเตอร์ (Piezoelectric Actuators) และชิ้นที่สองทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducers) เมื่อทั้งนำสองชิ้นมาเชื่อมต่อกันก็กลายเป็นเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ปัจจุบันเทคโนโลยีส่วนใหญ่มีแนวทางในการพัฒนาที่จะให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดที่บาง ซึ่งตรงกับคุณสมบัติเปียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดที่บาง จึงมีการนำเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น Inverter, AC adapter, Battery Charger, Signal Isolation และ DC/DC Converter เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1880 มีการค้นพบคุณสมบัติของเปียโซอิเล็กทริก โดย Jacques และ Pierre CURIE ซึ่งพบว่าเมื่อมีการกดหรือดึงโครงสร้างของ Crystals จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเรียกคุณสมบัตินี้ว่า Piezoelectric effect และในทางกลับกันถ้าให้กำลังสนามแม่เหล็กกับโครงสร้างของ Crystals จะทำให้เกิดการยืดหรือหดตัวของโครงสร้างของ Crystals เรียกคุณสมบัตินี้ว่า Inverse Piezoelectric effect [1]

ในศตวรรษที่ 20 ก็มีการวิจัยและสร้างเปียโซอิเล็กทริกจากสารเซรามิก (Ceramics) ขึ้น ผลการวิจัยนี้ได้พัฒนาให้สามารถกำหนดคุณสมบัติของเปียโซอิเล็กทริกได้ด้วย จึงทำให้สามารถนำเปียโซอิเล็กทริกไปใช้พัฒนาในงานต่างๆ ได้มากมาย เช่น Receivers, Actuators และ เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ การสร้างเปียโซอิเล็กทริกต้องนำอะตอมของธาตุที่ต่างชนิดกันสองธาตุ และมีคุณสมบัติเป็นไอออนบวกกับไอออนลบมาผสมกัน จากนั้นทำให้วัสดุผสมที่เกิดคุณสมบัติที่มีขั้วปรากฏขึ้นด้วยกระบวนการทำให้มีขั้ว เรียกว่าการ โพลลิ่ง (Poling) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป[1]

2.2 กระบวนการทำให้มีขั้ว (โพลลิ่ง, Poling)

วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเปียโซอิเล็กทริกมีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นแบบลูกบาศก์ที่มีธาตุผสมกันอยู่สามธาตุซึ่งมีสูตรว่า $(A^2 + B^1 + O^2)_3$, A คือธาตุที่มีไอออนขนาดใหญ่และเป็นธาตุโลหะนิยมใช้ธาตุ Barium, ส่วน B คือธาตุโลหะที่มีขนาดเล็กนิยมใช้ Titanium หรือ Zirconium โดยปกติโครงสร้างของโมเลกุลจะอยู่ในสภาวะสมดุลเมื่อมีธาตุ B (Titanium หรือ Zirconium) อยู่ตรงกลางของโมเลกุลพอดี แต่หลังจากวัสดุดังกล่าวได้รับอุณหภูมิถึงจุด Curie point แล้วโมเลกุลจะไม่อยู่ในสภาวะสมดุลทำให้โมเลกุลเกิดมีขั้วขึ้น แต่ขั้วของโมเลกุลยังมีทิศทางที่ไม่เป็นแนวเดียวกัน



รูปที่ 2.1 การทำโพลลิ่ง (ก) ขั้วของโมเลกุลยังมีทิศทางที่ไม่เป็นแนวเดียวกัน, (ข) เมื่อมีการให้ สนามแม่เหล็ก (ค) ขั้วของโมเลกุลที่สภาวะคงตัว

หลังจากที่วัสดุได้รับอุณหภูมิที่จุด Curie point ทำให้โมเลกุลแสดงขั้วขึ้น แต่ขั้วยังมีทิศทางที่ไม่เป็นแนวเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) สังเกตว่าทิศทางของขั้วจะมีทิศทางไม่ไปตามแนวเดียวกัน ซึ่งสามารถทำให้ขั้วมีทิศทางไปในแนวเดียวกันได้โดยนำสนามแม่เหล็กที่เป็นทิศทางของสนามแม่เหล็กชนิดทางเดียวและมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กสูง มาต่อระหว่างวัสดุเพื่อทำให้ขั้วของโมเลกุลเป็นไปในแนวเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) สังเกตว่าขั้วของโมเลกุลมีทิศทางไปในแนวเดียวกันหมดหลังจากนั้นก็ค่อยๆ ลดสนามแม่เหล็กลงพร้อมกับอุณหภูมิ ทำให้ขั้วของวัสดุเข้าสู่สภาวะที่ขั้วส่วนใหญ่มีทิศทางไปในแนวเดียวกันซึ่งเรียกว่าสภาวะคงตัว ดังแสดงในรูป 2.1(ค) ซึ่งจะวัสดุที่ได้จะแสดงคุณสมบัติของเปียโซอิเล็กทริก คือถ้ามีการกดหรือการดึงที่วัสดุดังกล่าวจะทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น และถ้าให้แรงดันไฟฟ้าที่วัสดุดังกล่าวจะทำให้วัสดุยืดหดได้ คุณสมบัตินี้สามารถไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้ [1]

2.3 เปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก

อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์หลายชนิดที่มีการผลิตขึ้นมาโดยใช้วัสดุประเภทเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก เพราะมีการผลิตที่ทำได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูง และยังสามารถลดขนาดน้ำหนักของอุปกรณ์ลงได้มาก อุปกรณ์ที่ผลิตจากสารเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก เช่น รีซีฟเวอร์ (Receivers), แอคชูเอเตอร์ (Actuators), อัลตราโซนิคมอเตอร์ (Ultrasonic motor), ทรานส์ฟอร์มเมอร์ (transformers) เป็นต้น [2]

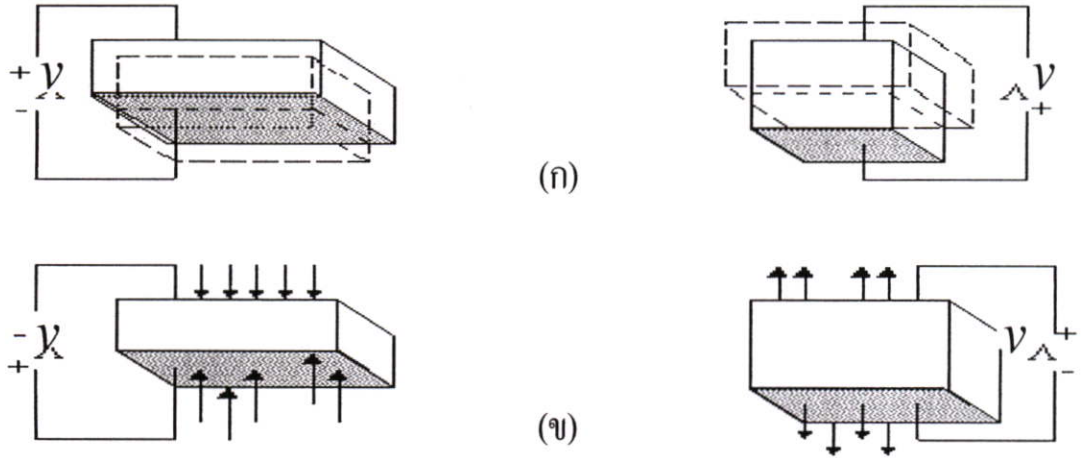
2.4 หลักการทำงานของสารเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก

เปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก คือสารเซรามิกที่มีคุณสมบัติของการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า มีหลักการทำงานโดยอาศัยการเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริก แล้วทำให้เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุนั้น หรือมีการเปลี่ยนรูปจากพลังงานกลเป็นพลังงานทางไฟฟ้า โดยเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริก แล้วทำให้เกิดการยืดและหดตัวของวัตถุ [2]

คุณสมบัติในการทำงานของสารเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก ประกอบด้วยคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางกลของสารเปียโซอิเล็กทริกประกอบด้วย ความเครียด Stress (T), ความเค้น Strain (S) และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารเปียโซอิเล็กทริกประกอบด้วย Electric field (E), Polarization (P) และมีการทำงานสองลักษณะด้วยกันดังนี้ [2]

1) การทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducers) คือแรงที่มากกระทำกับวัตถุที่เป็นเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกในลักษณะของแรงดึงหรือแรงกดแล้วมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัตถุนั้น (Direct effect) ทิศทางของแรงดันไฟฟ้าแปรตามลักษณะลักษณะการกดหรือการดึง ดังรูปที่ 2.2 (ก) การทำงานประเภทนี้นิยมใช้ในงานวัดค่าปริมาณต่างๆ เช่น วัดความดันอากาศ, วัดความเครียดภายในชิ้นส่วนของวัสดุ เป็นต้น [2]

2) การทำงานของเปียโซอิเล็กทริกแอคชูเอเตอร์ (Piezoelectric Actuators) คือวัตถุที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก ที่มีลักษณะการยืดหรือหดได้ว่า Inverse effect เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัตถุนั้น ถ้ามีการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่แบบสลับขั้วอย่างต่อเนื่องก็จะทำให้วัตถุนั้นเกิดการสั่นได้ดังรูปที่ 2.2 (ข) การทำงานประเภทนี้มักใช้กับหัวเครื่องพิมพ์ชนิดพ่นหมึก (Ink jet printer) เป็นต้น [2]

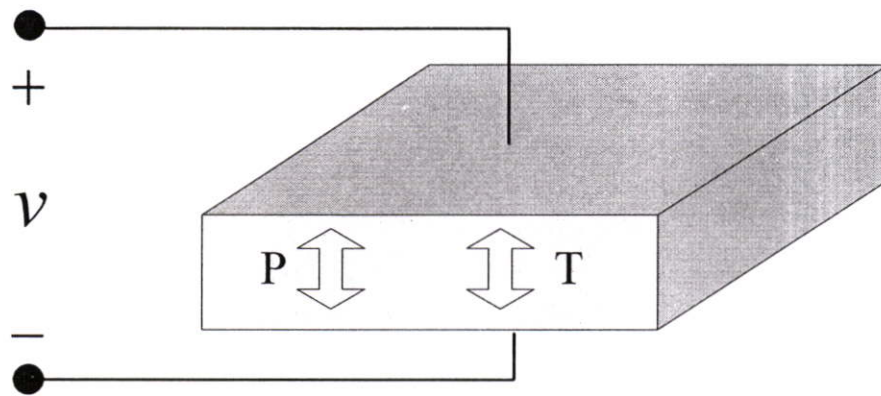


รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นสาร piezoelectric ชนิดเซรามิก (ก) piezoelectric ทรานสดิวเซอร์ (ข) piezoelectric แอคชูเอเตอร์

2.5 รูปแบบการทำงานของ piezoelectric ชนิดเซรามิก

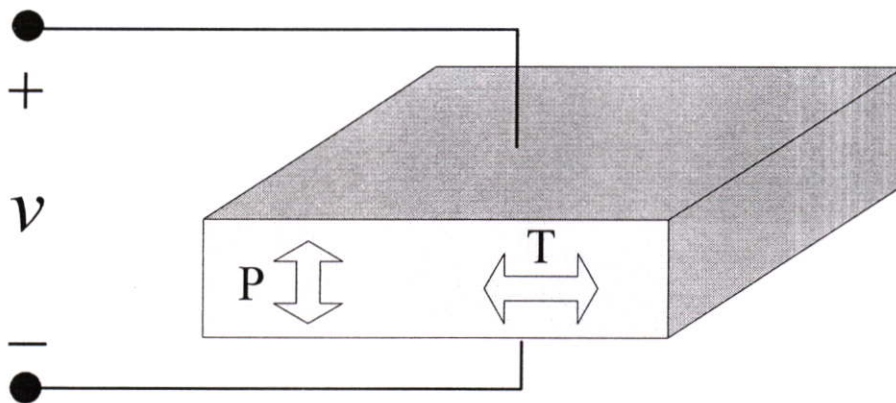
piezoelectric ชนิดเซรามิกมีรูปแบบการทำงานอยู่สองรูปแบบด้วยกันคือ การทำงานในรูปแบบของ Longitudinal Mode และ Transverse Mode [3]

1) การทำงานในรูปแบบของ Longitudinal Mode เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัสดุที่เป็น piezoelectric เซรามิก แล้วทำให้วัสดุนั้นเกิดการยืดหรือหดในแนวทิศทางเดียวกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัสดุนั้น ตามรูปที่ 2.3 [3]



รูปที่ 2.3 รูปแบบการทำงานของ Longitudinal Mode

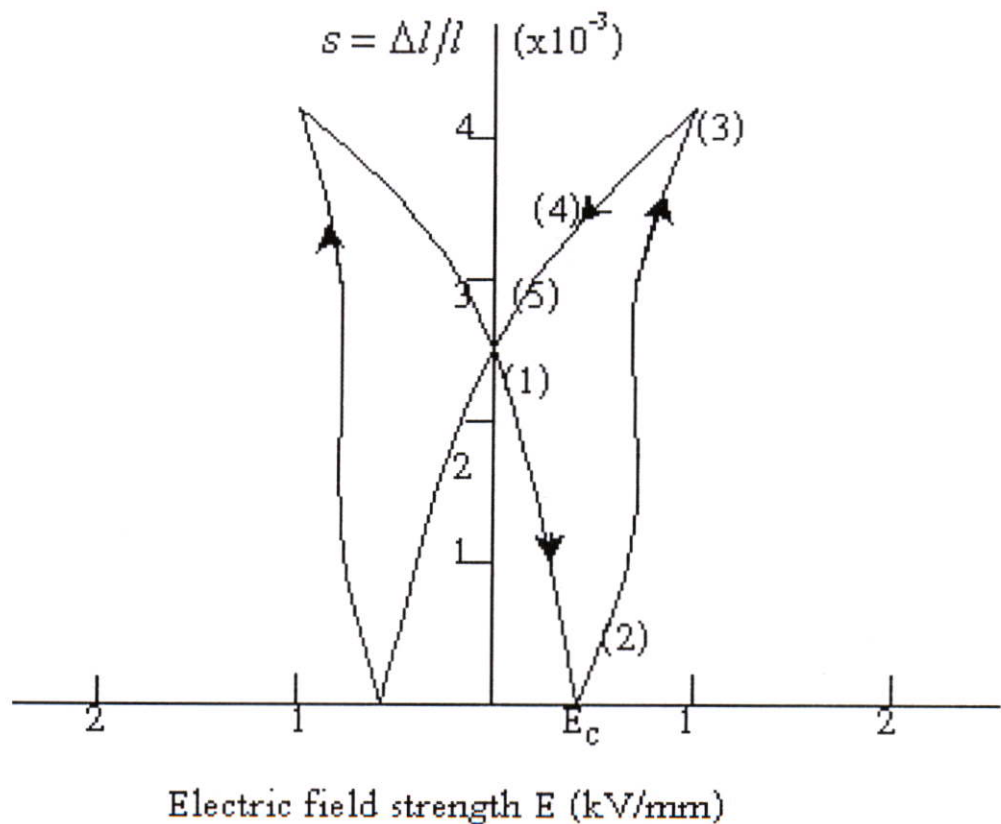
2) การทำงานในลักษณะของ Transverse Mode เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัตถุที่เป็นเพียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกแล้ว ทำให้วัตถุนั้นเกิดการยืดหรือหดตั้งฉากกับทิศทางของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัตถุนั้น ตามรูปที่ 2.4 [3]



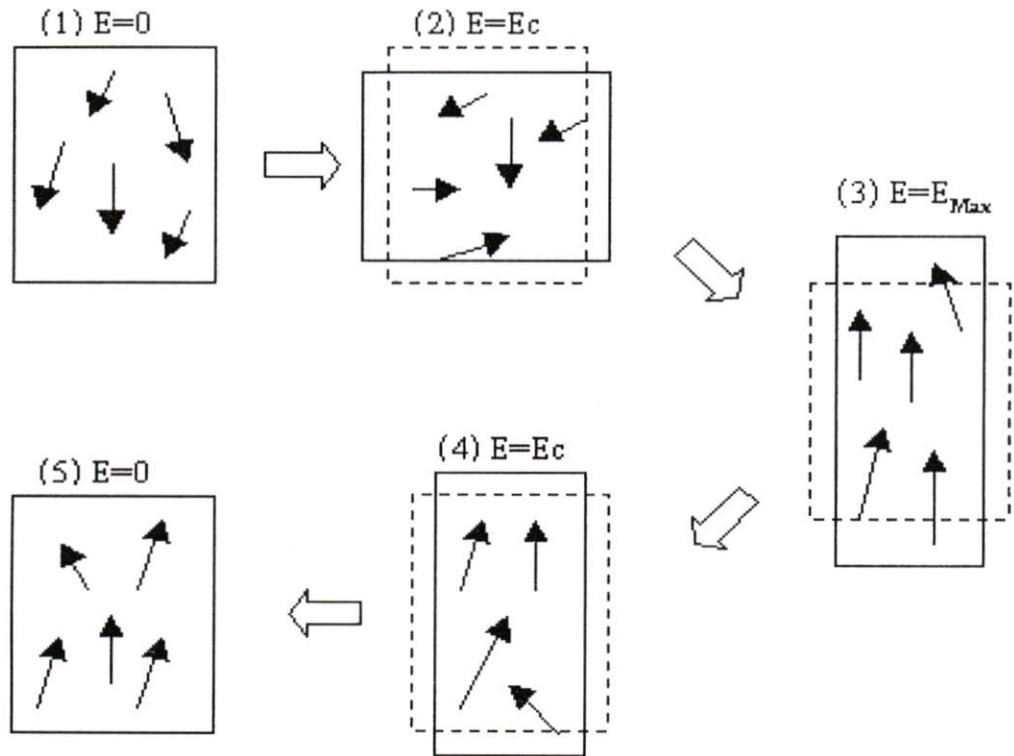
รูปที่ 2.4 รูปแบบการทำงาน Transverse Mode

2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเป็ยโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก

ลักษณะการทำงานทางไฟฟ้าและทางกลของวัสดุที่เป็นเป็ยโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก แสดงตามรูปที่ 2.5 เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า ($E=0$) วัสดุที่เป็นเป็ยโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก มีขนาดคงที่ เมื่อมีสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง ($E=E_c$) วัสดุที่เป็นเป็ยโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกมีการยืดตัว ($2 \rightarrow 3$, ตามรูปที่ 2.5) และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง ($E=E_{Max}$) วัสดุเกิดการยืดตัวมากที่สุด (3 , ตามรูปที่ 2.5) และสนามไฟฟ้ากลับมาที่ตำแหน่ง ($E=E_c$) ($3 \rightarrow 4$, ตามรูปที่ 2.5) วัสดุจะหดตัวจากตำแหน่งที่ยืดตัวสูงสุดเล็กน้อย และที่สนามไฟฟ้า ($E=0$) (5 , ตามรูปที่ 2.5) วัสดุมีขนาดคงที่ แต่ทิศทางของขั้วของเป็ยโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกมีทิศทางตรงข้ามกับตำแหน่งเมื่อตอนแรกดังแสดงตามรูปที่ 2.6 และเมื่อมีสนามไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งอีกครั้งในทิศทางตรงข้าม การยืด/หดของวัสดุจะเป็นไปตามลักษณะตามรูปที่ 2.5 และตามรูปที่ 2.6 ผลที่ได้ขั้วของเป็ยโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกก็จะกลับมาทิศทางเดิมของตำแหน่งเริ่มต้น [2]



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของเป็ยโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก



รูปที่ 2.6 ลักษณะการการบิด/หดของวัสดุที่เป็นสารเป็ยโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก

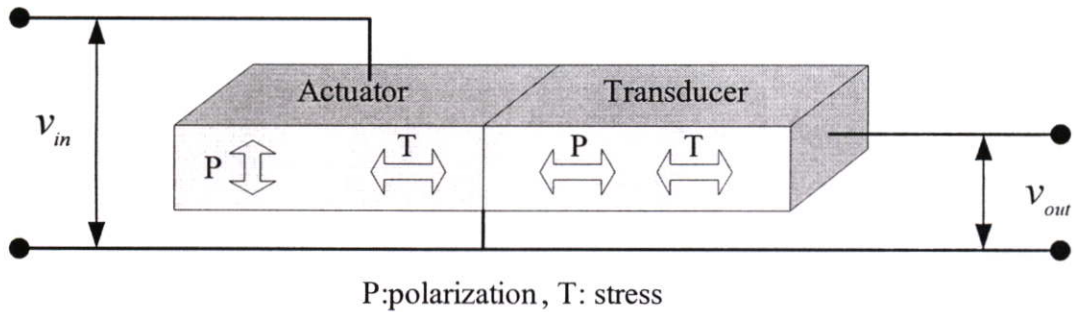
2.7 ชนิดของเป็ยโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

โดยส่วนมากจะมีการแบ่งชนิดของเป็ยโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ออกเป็นสามแบบ ตามลักษณะของโหมดการทำงานดังต่อไปนี้

2.7.1 Reson-type เป็ยโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

ในแบบ Reson-type เป็ยโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ส่วนแรกมีลักษณะการทำงานในรูปแบบของ transverse mode แสดงออกในรูปแบบของ Actuator ส่วนที่สองมีลักษณะการทำงานในรูปแบบของ longitudinal mode แสดงออกในรูปแบบของ Transducer นำไปใช้งานกับโหลดที่มีค่า

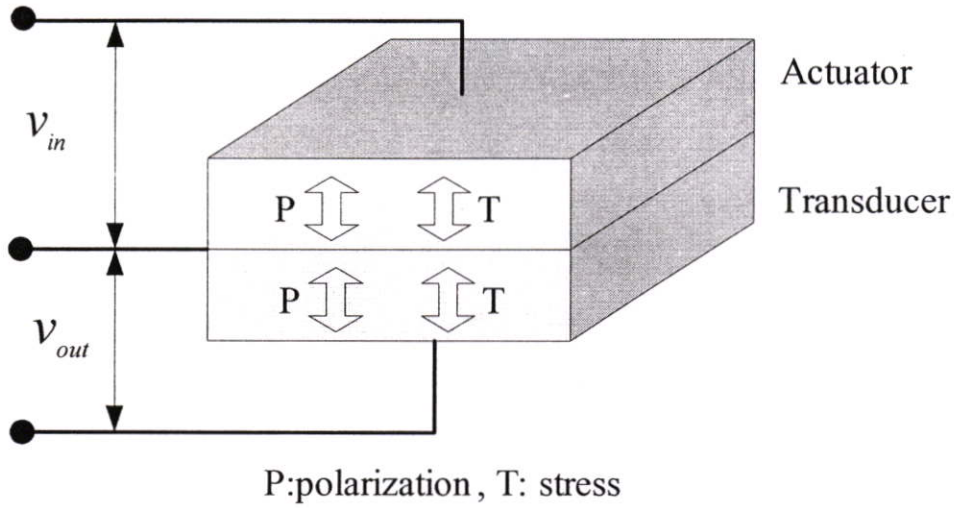
สูง (ประมาณ $100\text{K}\ \Omega$) และต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงจึงจะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูง เช่นการนำไปใช้ทำ Black-light ในจอคอมพิวเตอร์ Notebook เป็นต้น [3]



รูปที่ 2.7 Reson-type เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

2.7.2 Thickness Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

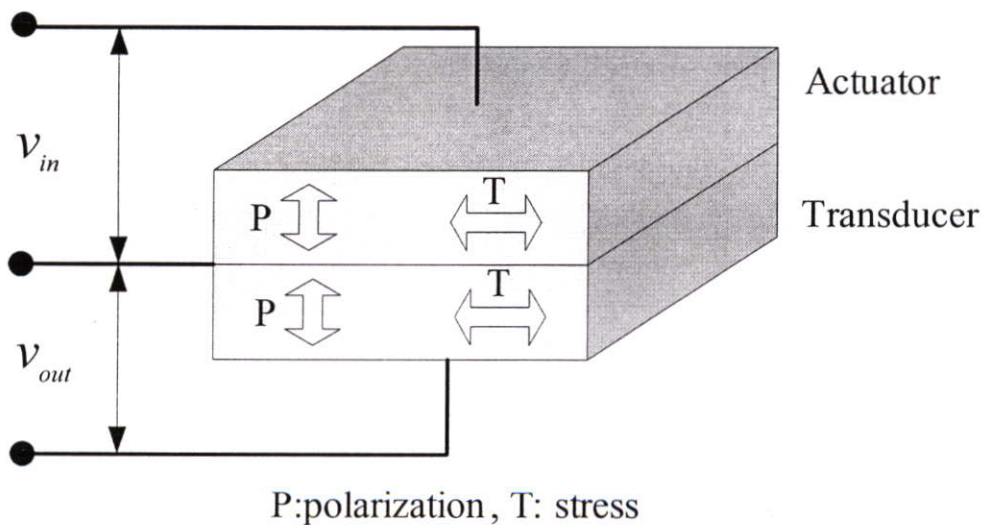
ในแบบ Thickness Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ส่วนบนมีลักษณะการทำงานในรูปแบบ longitudinal mode แสดงออกในรูปแบบ Actuator ส่วนล่างมีลักษณะการทำงานในรูปแบบของ longitudinal mode แสดงออกในรูปแบบของ Transducer นำไปใช้งานกับโหลดที่มีค่า (ประมาณ $10\ \Omega$) และความแรงดันไฟฟ้าต่ำจึงจะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูง เช่นนำไปใช้ทำ DC/DC converter และ Battery Charger เป็นต้น [3]



รูปที่ 2.8 Thickness Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

2.7.3 Radial Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

ในแบบ Radial Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ส่วนแรกมีลักษณะการทำงานในรูปแบบของ transverse mode แสดงออกในรูปแบบของ Actuator ส่วนที่สองมีลักษณะการทำงานในรูปแบบของ transverse mode แสดงออกในรูปแบบของ Transducer [3]



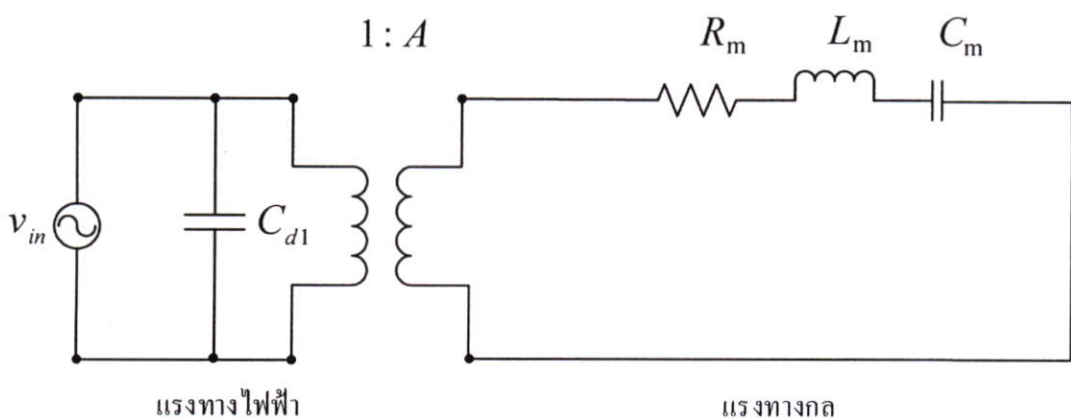
รูปที่ 2.9 Radial Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

2.8 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก

การจำลองวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกคือการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบทางไฟฟ้ากับระบบทางกล ของเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า[4]

ในการจำลองวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกสามารถทำได้สองทางคือการคำนวณจากสมการพื้นฐานซึ่งจะยุ่งยากมาก และทางที่สองใช้หลักการความสัมพันธ์ทางไฟฟ้ากับทางกล โดยจะมองทั้งทางไฟฟ้าและทางกล ทางไฟฟ้าก็จะเริ่มจากค่าความแรงดันไฟฟ้าและค่าของตัวเก็บประจุด้านทางเข้า (C_{d1}) ที่เกิดจากการที่นำแรงดันไฟฟ้ามาต่อคร่อมกับเปียโซอิเล็กทริกเซรามิก ส่วนค่าที่เกิดจากทางกลจะเป็นค่าที่ได้จากการสั่นสะเทือนทางกล เช่นมวล (M), spring (K) และความหน่วง (b) ซึ่งสามารถแปลงค่าเหล่านี้ไปเป็นค่าทางไฟฟ้าได้ โดยค่าของมวล (M) สามารถจำลองเป็นค่าทางไฟฟ้าคือ ค่าความเหนี่ยวนำ (L), ค่าความหน่วง (b) สามารถจำลองเป็นค่าทางไฟฟ้าคือ ค่าความต้านทาน (R), ค่าของ Spring (K) สามารถจำลองเป็นค่าทางไฟฟ้าคือค่าของตัวเก็บประจุ (C) หลังจากที่เราแปลงค่าต่างๆมาเป็นค่าทางไฟฟ้า ก็สามารถใช้หลักการของไฟฟ้าในการแก้ปัญหาได้

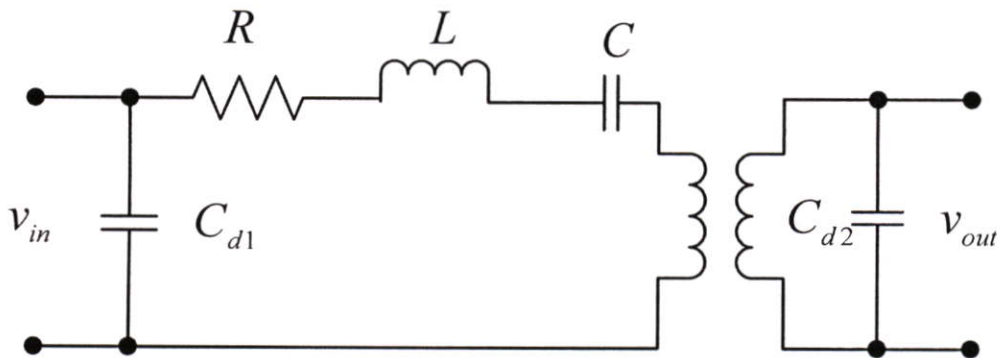
โดยที่พารามิเตอร์ R_m , L_m และ C_m จะอยู่ในส่วนของการทำงานทางกลที่จำลองเป็นค่าทางไฟฟ้า ส่วน C_{d1} , C_{d2} เป็นค่าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเปียโซอิเล็กทริกเซรามิก และ A คือค่าอัตราการแปลงพลังงานจากไฟฟ้ามาเป็นพลังงานทางกล[2] [4]



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกขณะไม่มีโหลด

2.9 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ใช้หลักการของการจำลองโดยนำวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกเซรามิก (หัวข้อที่ 2.8) สองวงจรมารวมต่อแบบกลับด้านกัน (ระบบทางไฟฟ้า->ระบบทางกล->ระบบทางกล->ระบบทางไฟฟ้า) เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์นี้มีทั้งคุณสมบัติความเป็นไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกล ในส่วนของคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ การที่นำแรงดันไฟฟ้ามาต่อคร่อมที่ เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ จะสังเกตเห็นเสมือนมีตัวเก็บประจุด้านทางเข้า (C_{d1}) และที่ทางด้านออกจะสังเกตเห็นเสมือนมีตัวเก็บประจุด้านทางเข้า (C_{d2}) ส่วนของทรานส์ฟอร์มเมอร์เป็นการจำลองอัตราการแปลงพลังงานทางกลมาเป็นพลังงานทางไฟฟ้าโดยรวม หรือ อัตราการแปลงพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลโดยรวม ซึ่งอัตราการแปลงพลังงานจะแทนด้วย N และวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถแทนได้โดยรูปที่ 3.1 [2]



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์โดยทั่วไป

2.10 สรุป

เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ได้จากการรวมเอาเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกสองรูปแบบการทำงานเข้าด้วยกันคือ รูปแบบการทำงานแบบ Actuator และ Transducer ตามลำดับ โดยที่รูปแบบการทำงานแบบ Actuator ทำหน้าที่แปลงพลังงานทางไฟฟ้าที่ทางเข้าเป็นพลังงานทางกลแบบการสั่นสะเทือนที่ด้านทางออก ส่วนรูปแบบการทำงานแบบ Transducer ทำหน้าที่แปลงพลังงานทางกลแบบสั่นสะเทือนเป็นพลังงานทางไฟฟ้าที่ด้านทางออก เมื่อรวมรูปแบบการทำงานสองรูปแบบ

เข้าด้วยกันเรียกเป็ยโซอิล็กทรลทรวานฟอร์เมอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันทางไฟฟ้าจากระดับหนึ่ง
ด้านทางเข้าไปเป็นแรงดันทางไฟฟ้าอีกระดับหนึ่งที่ด้านทางออก ซึ่งมีวงจรสมมูลตามรูปที่ 2.15

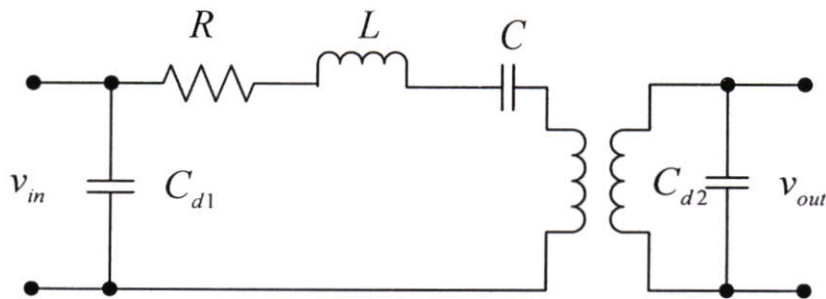
บทที่ 3

การวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

3.1 บทนำ

การนำเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มาใช้งาน จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ภายในของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ซึ่งพารามิเตอร์บางพารามิเตอร์ไม่สามารถวัดได้โดยตรง เพราะพารามิเตอร์เหล่านั้นเป็นพารามิเตอร์ทางกล แต่อย่างไรก็ตามสามารถศึกษาการทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ได้โดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 ดังนั้นขั้นตอนที่สำคัญของการศึกษาเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คือ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ต่อไป

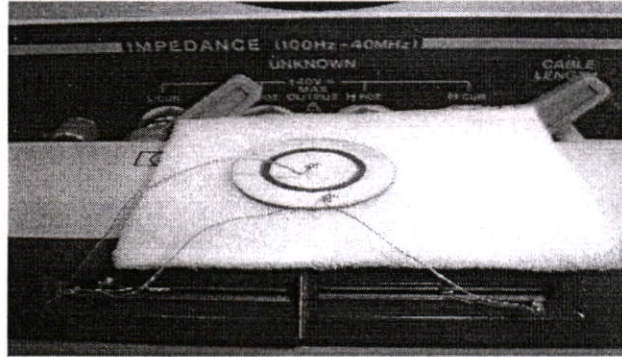
เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถจำลองได้ด้วยวงจรสมมูล ตามรูปที่ 3.1 โดยที่ R , L , และ C เป็นพารามิเตอร์ที่จำลองของการทำงานทางกล C_{d1} , C_{d2} เป็นค่าตัวเก็บประจุเสมือนทางด้านเข้าและทางด้านออกตามลำดับ, N คืออัตราการผลิตรูปแบบของพลังงานรวมของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว [4]



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

3.2 หลักการวัด

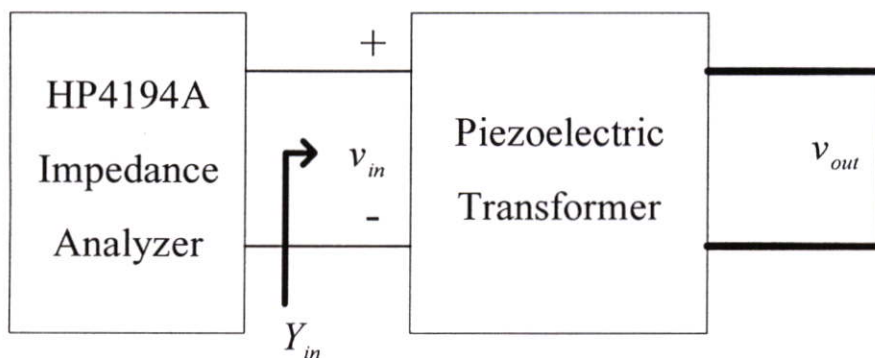
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ สามารถวัดได้ตามรูปที่ 3.2 โดยแบ่งออกเป็นสามขั้นตอนดังต่อไปนี้



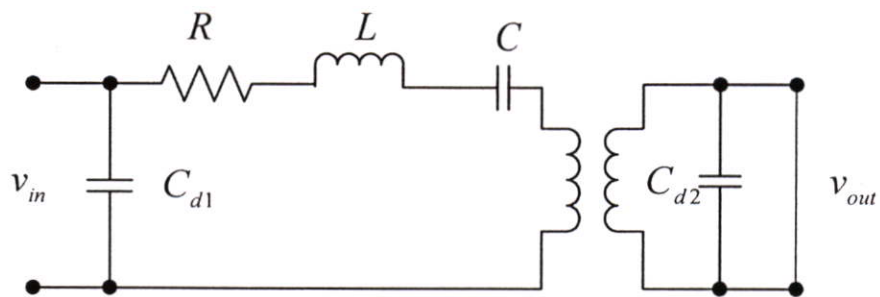
รูปที่ 3.2 การวัดพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

3.2.1 ขั้นตอนที่ 1

นำเครื่องวัด Impedance Analyzer HP41941A วัดค่า Admittance ทางด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ขณะที่ลัดวงจรทางด้านทางออกตามรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ค่า Admittance ที่ได้จากการวัดประกอบด้วย Susceptance และ Conductance ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ตามหัวข้อที่ 3.3 [4]



รูปที่ 3.3 การวัดค่า Admittance ที่ทางเข้าและลัดวงจรด้านทางออก



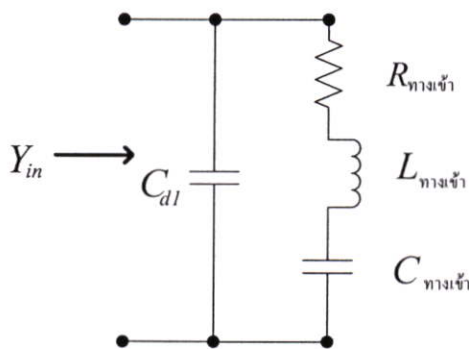
รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลที่ได้จากการวัดพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ตามรูปที่ 3.3

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ได้ดังนี้

$$R_{\text{ทางเข้า}} = R \tag{3.1}$$

$$L_{\text{ทางเข้า}} = L \tag{3.2}$$

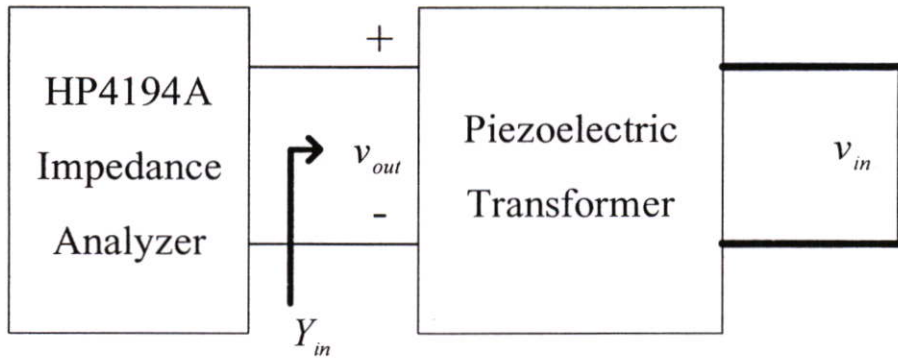
$$C_{\text{ทางเข้า}} = C \tag{3.3}$$



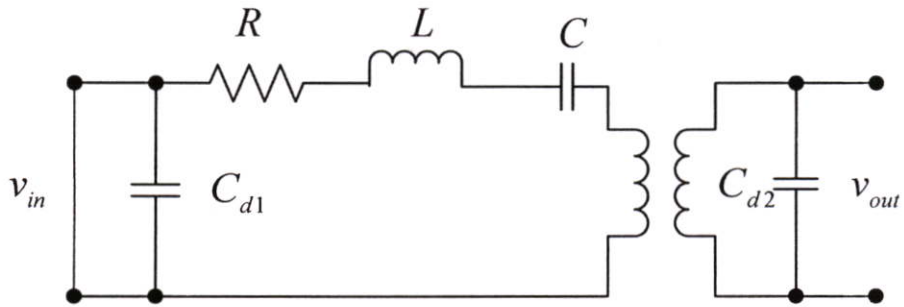
รูปที่ 3.5 Admittance ด้านทางเข้าเมื่อลัดวงจรที่ด้านทางออก

3.2.2 ขั้นตอนที่ 2

นำเครื่องวัด Impedance Analyzer HP41941A วัดค่า Admittance ทางด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ขณะที่ลัดวงจรทางด้านทางเข้าตามรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ค่า Admittance ที่ได้จากการวัดประกอบด้วย Susceptance และ Conductance ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ตามหัวข้อที่ 3.3 [4]



รูปที่3.6 การวัด Admittance ทางออกกั้วจรด้านทางเข้า



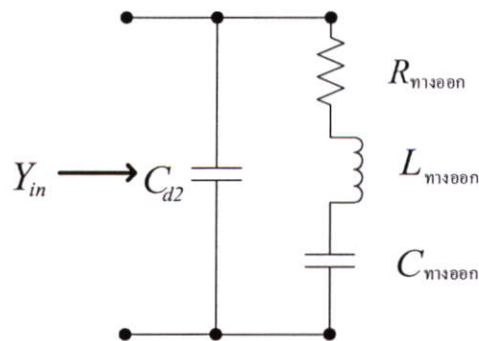
รูปที่3.7 วงจรสมมูลที่ได้จากการวัดพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ตามรูปที่ 3.6

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ได้ดังนี้

$$R_{\text{ทางออก}} = RN^2 \tag{3.4}$$

$$L_{\text{ทางออก}} = LN^2 \tag{3.5}$$

$$C_{\text{ทางออก}} = \frac{C}{N^2} \tag{3.6}$$



รูปที่3.8 Admittance ด้านทางเข้าเมื่อกั้วจรที่ด้านทางเข้า

3.2.3 ขั้นตอนี่ 3 การคำนวณค่า N

N คืออัตราการผลิตรูปแบบของพลังงานรวมของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถคำนวณได้จาก วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์เช่นเดียวกับทรานส์ฟอร์มเมอร์

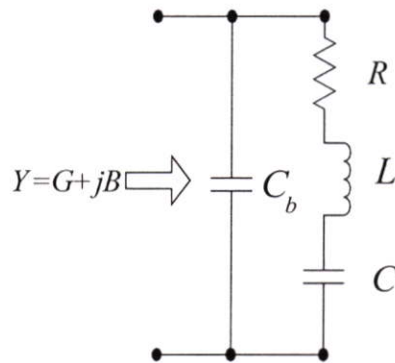
$$N = \sqrt{\frac{R_{\text{ทางออก}}}{R_{\text{ทางเข้า}}}} \quad \text{หรือ} \quad (3.7)$$

$$N = \sqrt{\frac{L_{\text{ทางออก}}}{L_{\text{ทางเข้า}}}} \quad \text{หรือ} \quad (3.8)$$

$$N = \sqrt{\frac{C_{\text{ทางเข้า}}}{C_{\text{ทางออก}}}} \quad (3.9)$$

3.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

การวัดเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ตามรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.6 สามารถจำลองวงจรสมมูลทั่วไปของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ได้ตามรูปที่ 3.9 ซึ่งสามารถแสดงสมการทั่วไปที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้ [6] [7] [8] [9]



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลทั่วไปของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ขณะลัดวงจรด้านทางเข้าหรือทางออก

$$Y = \frac{R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} + j \left(\frac{R^2 + (X_L - X_C)^2 - X_{C_b}(X_L - X_C)}{X_{C_b}(R^2 + (X_L - X_C)^2)} \right) \quad (3.10)$$

$$Y = G + jB \quad (3.11)$$

$$G = \frac{R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.12)$$

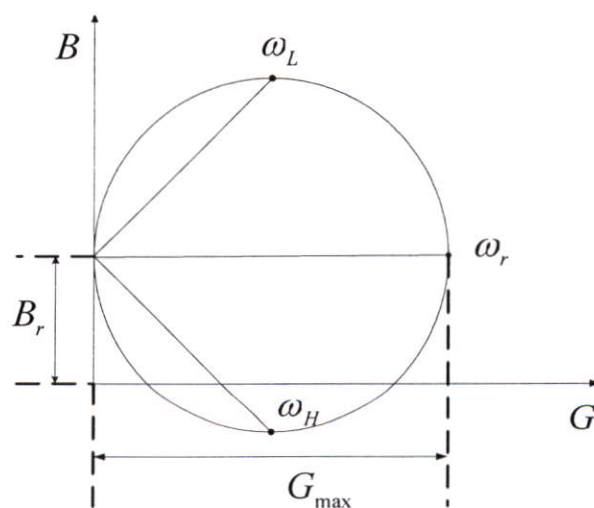
$$B = \frac{R^2 + (X_L - X_C)^2 - X_{C_b}(X_L - X_C)}{X_{C_b}(R^2 + (X_L - X_C)^2)} \quad (3.13)$$

Impedance ของ C_b มากกว่า Impedance ของ R, L, C และ กำหนดความถี่ที่ความถี่ Series Resonance $\omega = \omega_r \Rightarrow X_L = X_C$, คำนวณค่า G และ B ที่ความถี่ $\omega = \omega_r$ กำหนด $G(\omega_r) = G_{\max}$, $B(\omega_r) = B_r$

$$G_{\max} = \frac{1}{R} \Rightarrow R = \frac{1}{G_{\max}} \quad (3.14)$$

$$C_b = \frac{B_r}{\omega_r} \quad (3.15)$$

พิจารณาความถี่ที่ตำแหน่งต่ำสุด (ω_L) และความถี่ที่ตำแหน่งสูงสุด (ω_H) ของ Admittance ตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การแสดงการวัดพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ด้วย Admittance circle

ถ้าพิจารณา Impedance ของ C_{dl} มีค่ามากกว่า ค่าของ L, R และ C
 Q คือ Mechanical Quality Factor ของวงจร Series Resonance

$$Q = \frac{\omega_r}{\omega_H - \omega_L} \quad (3.16)$$

พิจารณาค่าพารามิเตอร์ L

$$Q = \omega_r \frac{L}{R} \quad (3.17)$$

$$L = R \frac{1}{\omega_H - \omega_L} \quad (3.18)$$

พิจารณาค่าพารามิเตอร์ C

$$Q = \frac{1}{RC \omega_r} \quad (3.19)$$

$$C = \frac{\omega_H - \omega_L}{R(\omega_r)^2} \quad (3.20)$$

สรุปการวัดและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คือ
 จากรูปที่ 3.4

R : คำนวณจากสมการ (3.14)

$C_{dl} = C_b$: คำนวณจากสมการ (3.15)

L : คำนวณจากสมการ (3.18)

C : คำนวณจากสมการ (3.20)

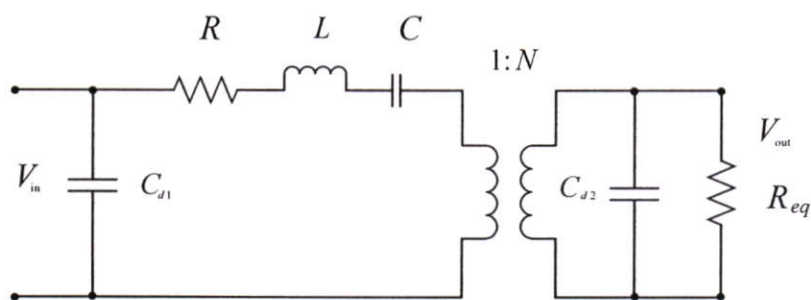
จากรูปที่ 3.7

$C_{d2} = C_b$: เช่นเดียวคำนวณจากสมการ (3.15)

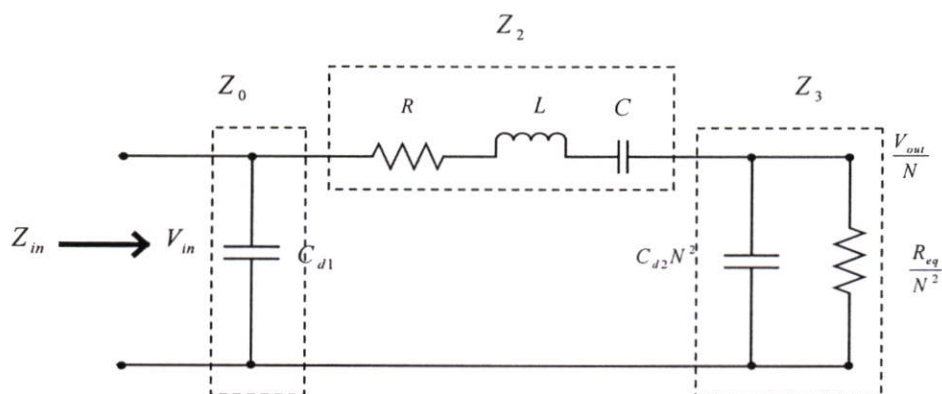
N : คำนวณจากสมการ (3.7) หรือ (3.8) หรือ (3.9)

3.4 Input Impedance

ค่าของ Input Impedance คำนวณได้ตามรูปที่ 3.11 ซึ่งวงจรสมมูลที่มีโหลด (R_{eq}) ต่ออยู่ และได้สมการ Input Impedance (Z_{in}) ตามสมการที่ (3.25) ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถแยกวิเคราะห์ได้สองส่วน คือขนาดของ Input Impedance และมุมของ Input Impedance ตามสมการที่ (3.26) และสมการที่ (3.27) [3]



รูปที่ 3.11 วงจรเทียบโซ่เล็กทรานส์ฟอร์เมอร์ก่อนการขุดวงจรเพื่อวิเคราะห์ Input Impedance



รูปที่ 3.12 วงจรเทียบโซ่เล็กทรานส์ฟอร์เมอร์หลังการขุดวงจรเพื่อวิเคราะห์ Input Impedance

โดยที่

$$Z_3 = \frac{N^2 \times \frac{1}{SC_{d2}} \times \frac{R_L}{N^2}}{N^2 \times \frac{1}{SC_{d2}} + \frac{R_L}{N^2}} \quad (3.21)$$

$$Z_2 = R + \frac{1}{SC} + LS \quad (3.22)$$

$$Z_0 = \frac{1}{SC_{d1}} \quad (3.23)$$

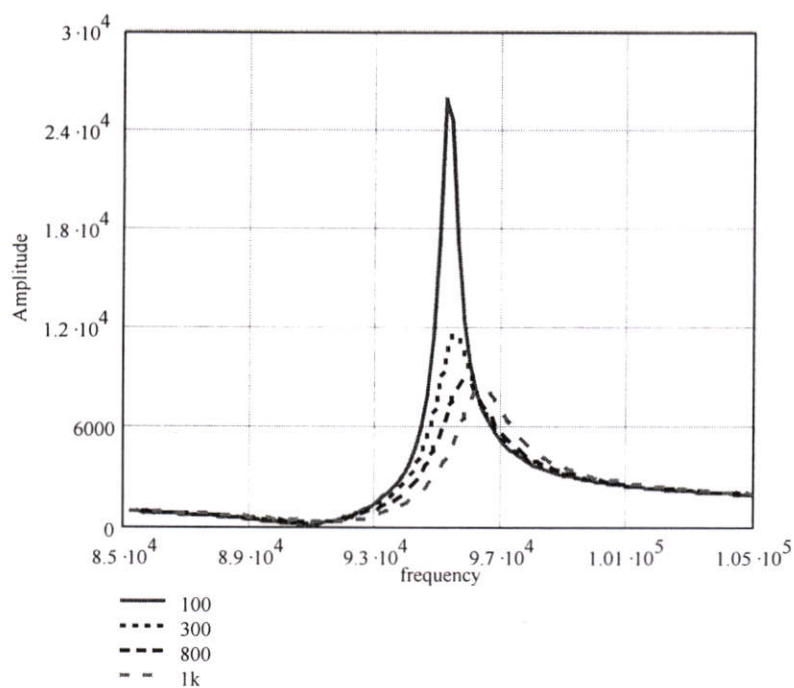
$$Z_1 = Z_2 + Z_3 \quad (3.24)$$

$$Z_m = \frac{Z_1 \times Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (3.25)$$

จากสมการที่(3.25)นำมาวิเคราะห์หาขนาดของ Input Impedance ได้ดังนี้

$$|Z_m| = \left| \frac{Z_1 \times Z_0}{Z_1 + Z_0} \right| \quad (3.26)$$

จากสมการที่ (3.26) นำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังต่อไปนี้



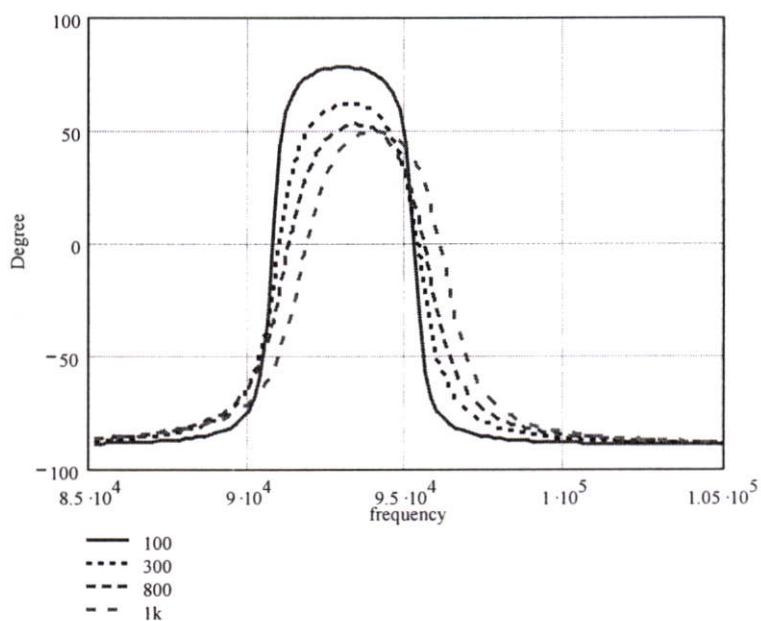
รูปที่ 3.13 กราฟของขนาด Input Impedance

จากรูปที่ 3.13 ถ้าขนาดของ โหลดเพิ่มมากขึ้นที่ความถี่หลังความถี่ resonant ขนาดของ Input Impedance มีขนาดเล็กลง

จากสมการที่(3.25)นำมาวิเคราะห์หามุมของ Input Impedance ได้ดังนี้

$$\phi_m = a \tan \left[\frac{\text{Im}(Z_{in})}{\text{Re}(Z_{in})} \right] \quad (3.27)$$

จากสมการที่ (3.27) นำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังต่อไปนี้

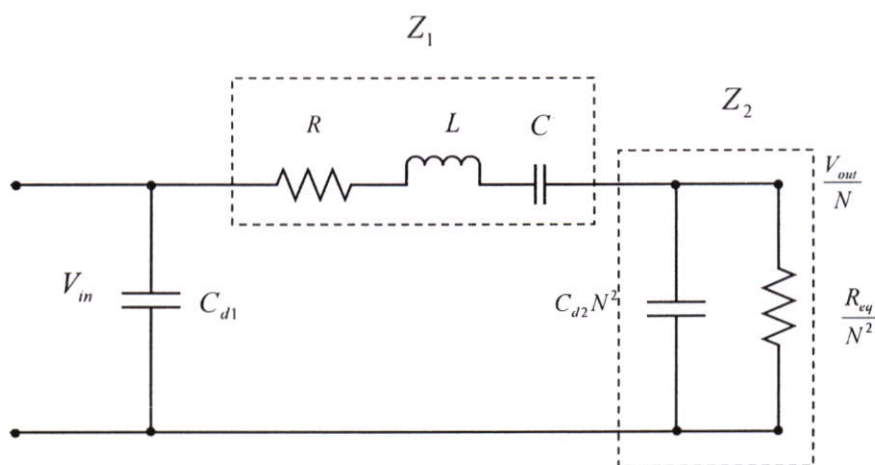


รูปที่ 3.14 กราฟของมุม Input Impedance

จากรูปที่ 3.14 ถ้าขนาดของโหลดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มุมของ Input Impedance จะมีขนาดเป็นบวกน้อยลงซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ทางเข้าตามหลังหลังแรงดันไฟฟ้าลดลง

3.5 อัตราการขยายความแรงดันไฟฟ้า (Voltage Gain)

อัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าระหว่างด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์และด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 3.15 และได้สมการอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าตามสมการที่ (3.31) ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถนำมาแยกวิเคราะห์ได้สองส่วน คือขนาดของอัตราการขยายระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์กับแรงดันไฟฟ้าด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ตามสมการที่ (3.32) และมุมของอัตราการขยายระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์กับแรงดันไฟฟ้าด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ตามสมการที่ (3.33) [3]



รูปที่ 3.15 วงจรวิเคราะห์อัตราการขยายของแรงดันไฟฟ้า

$$Z_2 = \frac{N^2 \times \frac{1}{SC_{d2}} \times \frac{R_L}{N^2}}{N^2 \times \frac{1}{SC_{d2}} + \frac{R_L}{N^2}} \quad (3.28)$$

$$Z_1 = R + \frac{1}{SC} + LS \quad (3.29)$$

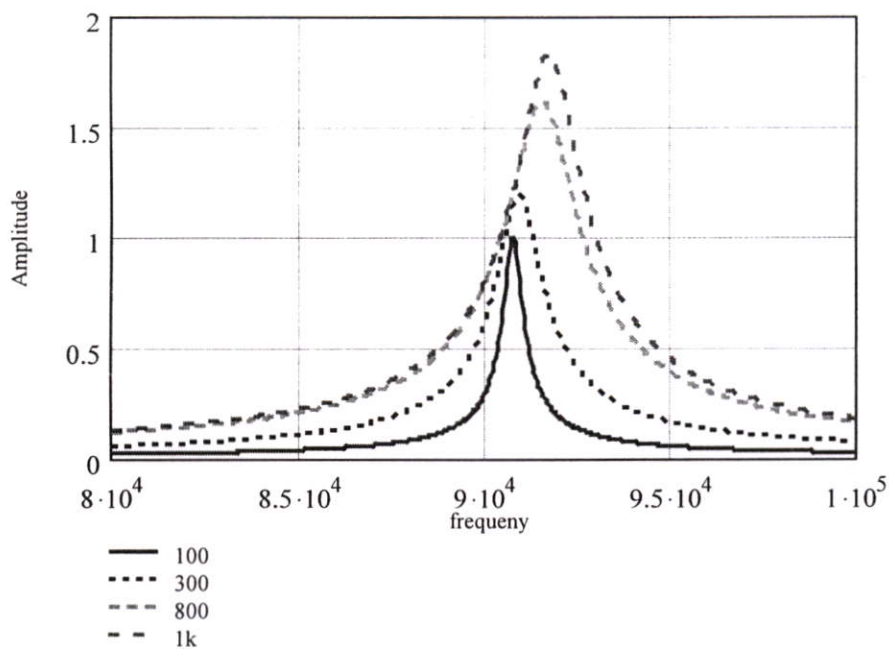
$$\frac{V_{out}}{N} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} V_{in} \quad (3.30)$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} N \quad (3.31)$$

จากสมการที่(3.31)นำมาวิเคราะห์ห้ขนาดของอัตราการขยายของแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

$$|A_v| = \left| \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} N \right| \quad (3.32)$$

จากสมการที่(3.32)นำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังต่อไปนี้

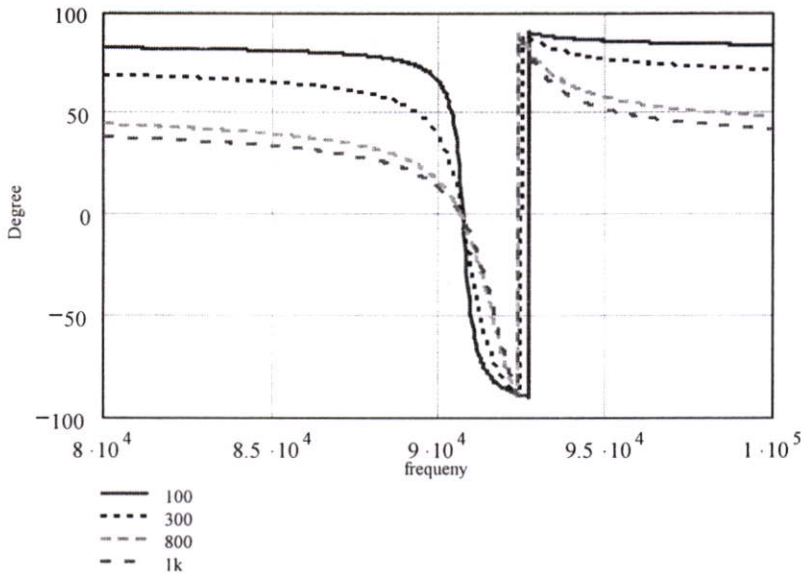


รูปที่ 3.16 ขนาดของอัตราขยายของแรงดันไฟฟ้า

จากสมการที่(3.31)นำมาวิเคราะห์มุมของอัตราขยายของแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\phi_{AV} = a \tan \left[\frac{\text{Im}(A_v)}{\text{Re}(A_v)} \right] \quad (3.33)$$

จากสมการที่(3.33)นำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังต่อไปนี้



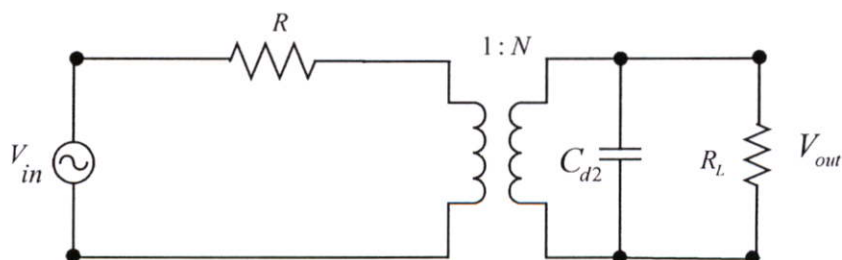
รูปที่ 3.17 มุมของอัตรการขยายของแรงดัน ไฟฟ้า

3.6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและโหลดที่เหมาะสมของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

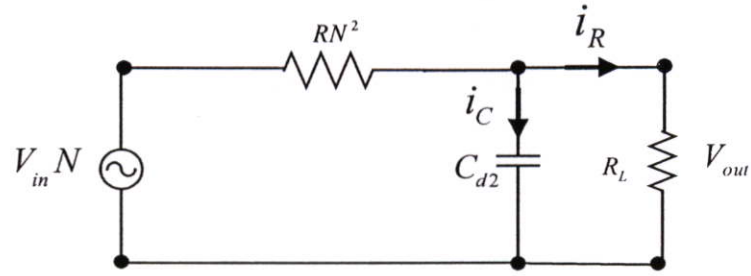
การออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานร่วมกับเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ให้มีประสิทธิภาพสูงต้องทราบว่าเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ทำงานที่โหลดที่เหมาะสมหรือไม่ ถ้าทำงานร่วมกับโหลดที่เหมาะสมก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของคอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพสูงไปด้วย [10]

เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถจำลองแทนได้ด้วยวงจรสมมูล ตามรูปที่ 3.1 [2][3] โดยที่ R , L และ C เป็นพารามิเตอร์ที่จำลองผลการทำงานทางกล C_{d1} , C_{d2} เป็นตัวเก็บประจุเสมือนทางด้านเข้าและทางด้านออกตามลำดับ N คืออัตรการเปลี่ยนรูปของพลังงานรวมของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

ที่ $\omega = \omega_r$ และ C_{d1} มีค่า Impedance สูง



รูปที่ 3.18 เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ความถี่ ω_r



รูปที่ 3.19 ย้าย V_m และ R ด้านทางเข้าไปยังมาทางด้านทางออก

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.34)$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N}{\left(\frac{N^2 R}{R_L} + jN^2 R \omega_r C_{d2} + 1 \right)} \quad (3.35)$$

$$|A_v| = \frac{N}{\sqrt{\left(\frac{N^2 R}{R_L} + 1 \right)^2 + (N^2 R \omega_r C_{d2})^2}} \quad (3.36)$$

กำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออกคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$P_{out} = \frac{|V_{out}|^2}{R_L} \quad (3.37)$$

$$|V_{out}| = V_{in} |A_v| \quad (3.38)$$

$$P_{out} = \frac{N^2 V_m^2}{R_L \left[\left(1 + \frac{N^2 R}{R_L} \right)^2 + (\omega_r C_{d2} N^2 R)^2 \right]} \quad (3.39)$$

สมการของกำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออก(3.39) สามารถคำนวณกำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออกสูงสุด ของวงจรที่โหลดใดๆ ได้จากการ Differentiation สมการที่(3.39) เปรียบเทียบกับ R_L และกำหนดให้ผลที่มีเท่ากับศูนย์ [10]

$$\frac{d(P_{out})}{dR_L} = 0 \quad (3.40)$$

โหลดที่ทำให้เกิดกำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออกสูงสุดของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ดังต่อไปนี้

$$R_{L,P_{out},max} = \frac{N^2 R}{\sqrt{1 + (\omega_r C_{d2} N^2 R)^2}} \quad (3.41)$$

เมื่อ $(\omega_r C_{d2} N^2 R)^2 \ll 1$

$$R_{L,P_{out},max} = N^2 R \quad (3.42)$$

แทนสมการที่ (3.42) ลงในสมการที่ (3.39) ได้กำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออกสูงสุดของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ดังต่อไปนี้

$$P_{out,max} = \frac{N^2 V_m^2}{2R \left(1 + \sqrt{1 + (\omega_r C_{d2} N^2 R)^2} \right)} \quad (3.43)$$

เมื่อ $(\omega_r C_{d2} N^2 R)^2 \ll 1$

$$P_{out,max} = \frac{N^2 V_m^2}{4R} \quad (3.44)$$

กำลังงานด้านทางเข้ามีค่าดังต่อไปนี้

$$P_{in} = N^2 R |i_C + i_R|^2 + P_{out} \quad (3.45)$$

$$P_{in} = V_{out}^2 \left[\frac{N^2 R + R_L}{R_L^2} + (\omega_r C_{d2})^2 N^2 R \right] \quad (3.46)$$

สมการ (3.44) และ (3.46) สามารถคำนวณประสิทธิภาพของวงจรได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.47)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{N^2 R}{R_L} + (\omega_r C_{d2})^2 N^2 R R_L} \quad (3.48)$$

สมการสามารถคำนวณประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรที่โหลดใดๆ ได้จากการ Differentiation สมการที่ (3.48) เปรียบเทียบกับ R_L และกำหนดให้ผลที่มีเท่ากับศูนย์

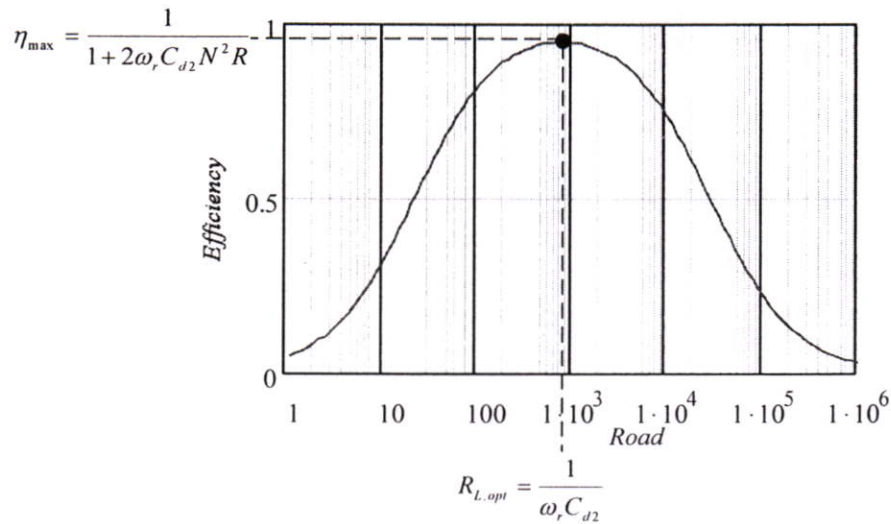
สมการของประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรดังต่อไปนี้

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + 2\omega_r C_{d2} N^2 R} \quad (3.49)$$

โดยที่

$$R_{L,opt} = \frac{1}{\omega_r C_{d2}} \quad (3.50)$$

จากสมการที่(3.48) นำมาแสดงกราฟได้ตามรูปที่3.20 โดยตำแหน่งที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (η_{max}) ได้จากโหลดที่เหมาะสม ($R_{L(opt)}$) ตามสมการที่ (3.48) (3.49) (3.50)



รูปที่ 3.20 ประสิทธิภาพสูงสุดและโหลดที่เหมาะสม

3.7 สรุป

ในการนำเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ไปใช้งานต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของวงจรและสามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของวงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ซึ่งทำได้โดยการนำเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ มาทำการลัดวงจรทางด้านทางออก แล้วหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรโดยใช้เทคนิค Admittance circle หลังจากนั้นก็ทำการลัดวงจรทางด้านทางเข้า แล้ววิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของวงจรโดยใช้เทคนิค Admittance circle เหมือนกับตอนแรก จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ก็จะได้พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

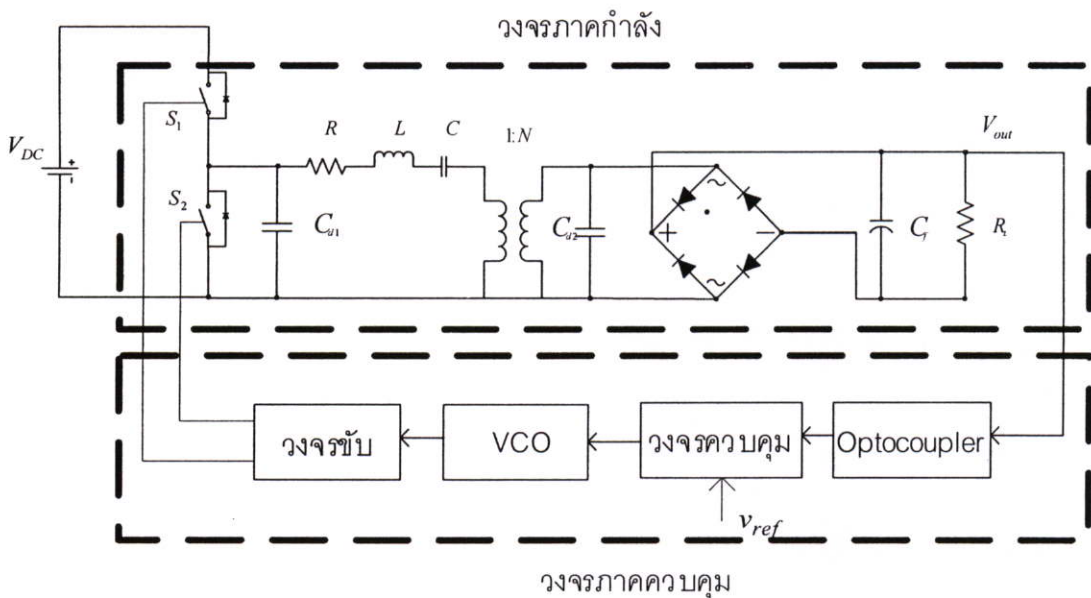
ในการนำ เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ไปออกแบบใช้งานต่างๆ สิ่งที่สำคัญมากไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ คือการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ทั้งนี้เพราะเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ มีการทำงานที่ความถี่ช่วงหนึ่งเท่านั้น และโหลดกับความถี่ที่ทำงานต้องมีความเหมาะสมจึงจะทำให้วงจรทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 4

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

4.1 บทนำ

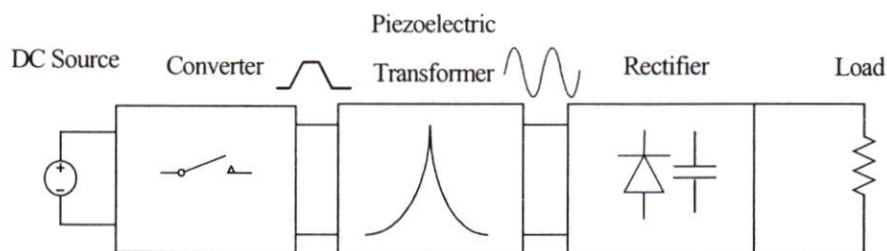
แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ตามรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย โครงสร้างสองส่วนคือ ภาคการส่งถ่ายกำลังงานและภาคระบบควบคุม ในส่วนภาคการส่งถ่ายกำลังงานทำหน้าที่ในการส่งถ่ายพลังงานจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอีก ระดับหนึ่งทางด้านทางออก ส่วนนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบสร้าง คือประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ต้องมีค่าสูง และหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุที่มีมิติสูงเช่น Inductor ซึ่งทำให้ได้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดที่บาง ในส่วนของโครงสร้างของภาคระบบควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการสร้างสัญญาณขับนำสวิทช์เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านทางออกแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 โครงสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง

4.2 ภาคการส่งถ่ายกำลังงาน

รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบของภาคการส่งถ่ายกำลังงาน



รูปที่ 4.2 วงจรส่วนของการส่งถ่ายพลังงาน

4.2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์

วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้งานทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้กับเพียโซอิเล็กทริกทรานซฟอร์เมอร์โดยรูปสัญญาณที่ได้มีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมคางหมู ในส่วนคอนเวอร์เตอร์นี้ต้องออกแบบให้สวิทช์ในคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบ Zero Voltage Switching (ZVS) การออกแบบให้สวิทช์ทำงานแบบ ZVS ทำให้พลังงานที่สูญเสียในขณะสวิทช์มีค่าน้อยลง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของคอนเวอร์เตอร์มากขึ้น ส่วนตัวสวิทช์ต่อกันเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ Half Bridge Switch ซึ่งแสดงตามรูปที่ 4.1 [11]

หลักการควบคุมจะใช้การควบคุมด้วยความถี่หลังความถี่ Resonance โดยถ้าเพิ่มความถี่จะหมายถึงการเพิ่ม Impedance ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเพียโซอิเล็กทริกทรานซฟอร์เมอร์มากขึ้นส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดน้อยลง ในทางตรงกันข้ามถ้าลดความถี่จะหมายถึงการลด Impedance ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเพียโซอิเล็กทริกทรานซฟอร์เมอร์น้อยลงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดมากขึ้น

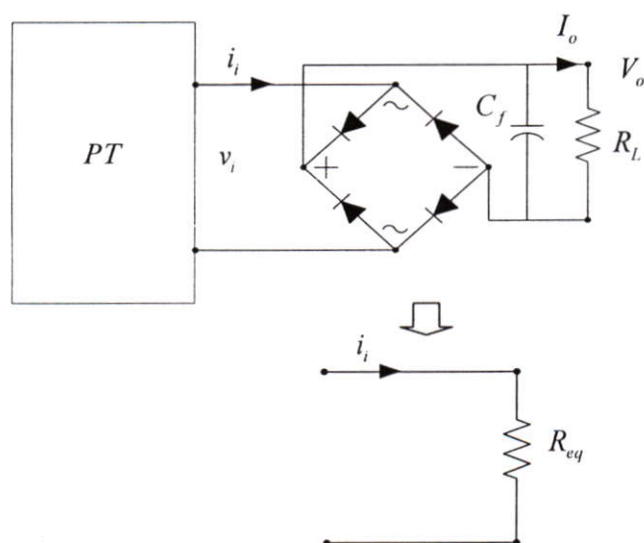
เมื่อกระแสไหลเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดลดลง วงจรควบคุมจะลดความถี่ลงทำให้ Impedance ของเพียโซอิเล็กทริกทรานซฟอร์เมอร์ลดลง แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเพียโซอิเล็กทริกทรานซฟอร์เมอร์น้อยลง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดมากขึ้น จึงทำให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้ ตรงกันข้ามเมื่อกระแสไหลลดลงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดมากขึ้นวงจรควบคุมจะเพิ่มความถี่ขึ้นทำให้ Impedance ของเพียโซอิเล็กทริกทรานซฟอร์เมอร์มากขึ้น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเพียโซอิเล็กทริกทรานซฟอร์เมอร์มากขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดน้อยลง จึงทำให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้เช่นกัน

4.2.2 เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดอัตราขยายแรงดันทางไฟฟ้า โดยแรงดันทางไฟฟ้าทางด้านทางออกมีขนาดแปรตามความถี่ของการสวิทช์ที่คอนเวอร์เตอร์ และรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ด้านทางออกเป็นสัญญาณไฟฟ้าสลับที่มีความถี่ตามความถี่ของการสวิทช์ที่คอนเวอร์เตอร์เช่นกัน ในการออกแบบต้องวิเคราะห์การทำงานขณะที่โหลดเหมาะสม ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 สมการที่ (3.42) เพราะในการออกแบบต้องออกแบบจะเลือกโหลดที่ทำให้เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด [10]

4.2.3 วงจร Bridge Rectifier

ในส่วนนี้ใช้วงจร Full Bridge Rectifier ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ด้านออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์มาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจ่ายให้กับโหลด ในวิเคราะห์ ได้ย้ายโหลด R_L ผ่าน Full Bridge Rectifier ได้ R_{eq} ตามรูปที่ 4.3 [12]



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูล Full Bridge Rectifier

ให้กำลังด้านทางเข้าเท่ากับกำลังด้านทางออกตามรูปที่ 4.3 จะได้

$$P_i = P_o \quad (4.1)$$

โดยที่ $P_i = \frac{I_i^2}{2} R_{eq} \quad (4.2)$

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_i d(\omega t) = \frac{2I_i}{\pi} \quad (4.3)$$

$$P_o = I_o^2 R_L = \left(\frac{2I_i}{\pi} \right)^2 R_L \quad (4.4)$$

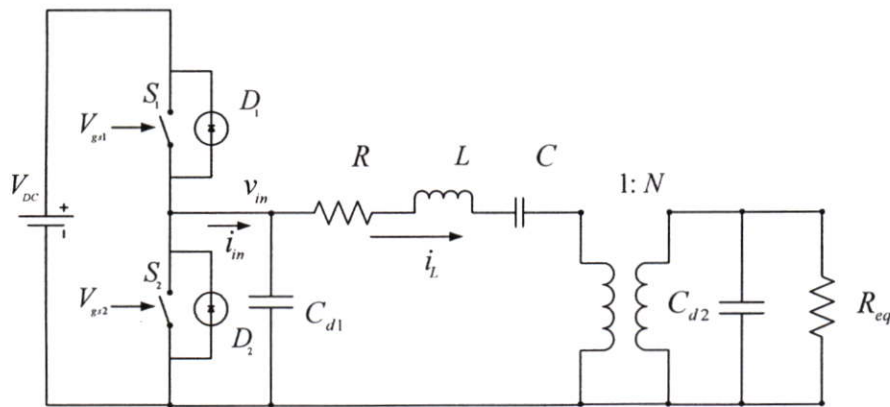
แทนสมการที่(4.2)และ(4.4) ในสมการที่ 4.1

$$\frac{I_i^2}{2} R_{eq} = \left(\frac{2I_i}{\pi} \right)^2 R_L \quad (4.5)$$

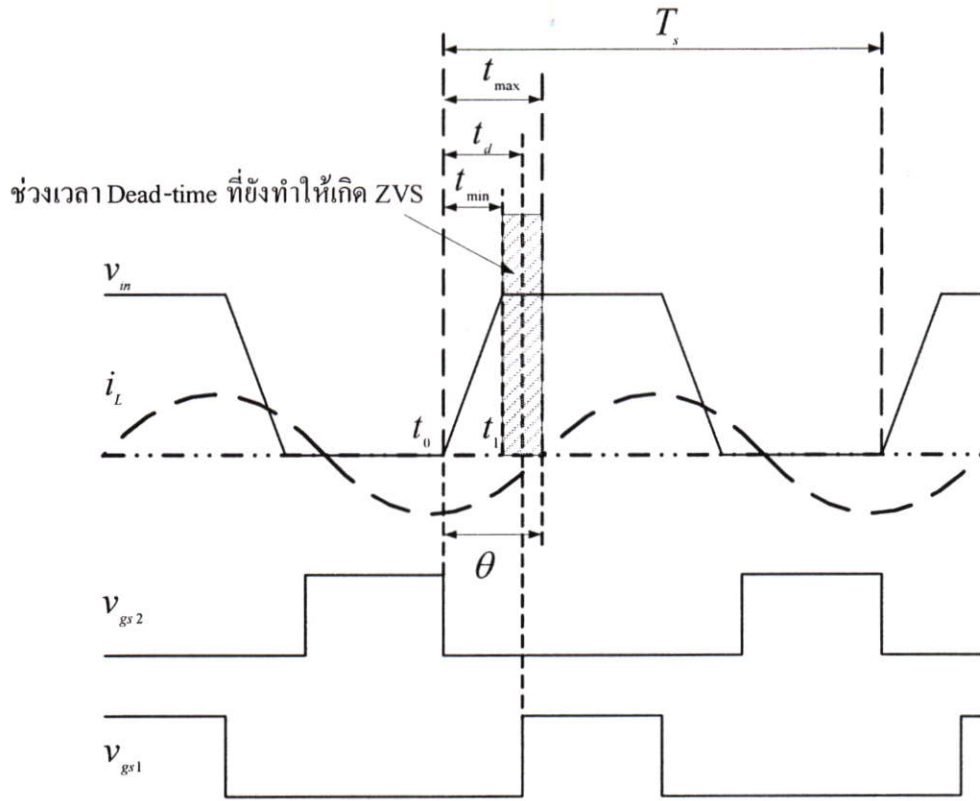
$$R_{eq} = R_L \frac{8}{\pi^2} \quad (4.6)$$

4.3 สวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบ Zero Voltage Switching (ZVS)

ในการออกแบบให้วงจรมีประสิทธิภาพสูง ต้องออกแบบให้สวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบ ZVS คือต้องให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ ก่อนที่จะมีการปิดหรือเปิดสวิตช์ การออกแบบต้องกำหนด Dead-time (t_d) ที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ ในการกำหนด Dead-time (t_d) จะกำหนดน้อยไปหรือมากไปไม่ได้เพราะจะไม่ทำให้เกิดการทำงานแบบ ZVS, จึงต้องกำหนดเงื่อนไขสองประการในการออกแบบ คือช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่น้อยที่สุด ($t_d = t_{min}$) ที่จะทำให้เกิด ZVS และช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่มากที่สุด ($t_d = t_{max}$) ที่ยังคงทำให้เกิดการทำงานแบบ ZVS



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลของเบี่ยโซอิล็กทรินทรานฟอ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.5 ช่วงเวลาการทำงานของ ZVS

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

ช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่น้อยที่สุด (t_{min}) ที่ S_2 ทำงานได้แบบ ZVS อธิบายได้คือ ถ้าที่ $t_d = t_{min}$, $v_{in} = V_{dc}$ ดังนั้น v_{ds2} เท่ากันศูนย์, เมื่อ S_2 ปิดวงจรจึงเกิดการดำเนินงานแบบ ZVS, การวิเคราะห์เริ่มจากสมการช่วงเวลาในตัวเก็บประจุเสมือนด้านทางเข้า (C_{d1}) เก็บประจุ (Charge) จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าตรงด้านทางเข้า (V_{dc}) แสดงเป็นสมการได้ดังนี้ [13] (เนื่องจากเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์มี Quality Factor (Q) สูงจึงสามารถประมาณว่ากระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ L เป็นสัญญาณ Sinusoidal [13])

$$i(t) = I_L \sin(\omega t - \theta) \quad (4.6)$$

ขั้นตอนการเก็บประจุของ C_{d1} ในช่วงเวลา $t_0 < t < t_1$ ในรูปที่ 4.5 เป็นช่วงเวลาสั้นๆ ในหนึ่งคาบเวลาเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณจึงประมาณว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลใน C_{d1} เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งโดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า C_{d1} ที่ t_0 ที่ดังนี้ [13]

$$i_{C_{d1}(t_0)} = I_{cd1} = -I_L \sin(-\theta) \quad (4.7)$$

$$I_{C_{d1}} = I_L \sin(\theta) \quad (4.8)$$

สมการความสัมพันธ์ ของกระแสที่ไหลเข้า C_{d1}

$$i_{C_{d1}} = C_{cd1} \frac{dV_{DC}}{dt}$$

$$dt = \frac{C_{d1}}{i_{C_{d1}}} dV_{DC} \quad (4.9)$$

$$\int dt = \int \frac{C_{d1}}{i_{C_{d1}}} dV_{DC} \quad (4.10)$$

$$t = \frac{C_{d1}}{i_{C_{d1}}} V_{DC} \quad (4.11)$$

แทน $i_{(C_{d1})}$ ด้วยสมการที่ (4.3) และ $t = t_{\min}$

$$t_{\min} = \frac{C_{d1} V_{DC}}{I_L \sin(\theta)} \quad (4.12)$$

แรงดันทางไฟฟ้าที่ V_{in} เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูทำให้ยากต่อการคำนวณ จึงประมาณให้แรงดันทางไฟฟ้าที่ V_{in} เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเพราะค่ามี fundamental ใกล้เคียงกัน โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ V_{in} มีค่า fundamental ดังนี้ [13]

$$V_{in} = \frac{2V_{DC}}{\pi} \quad (4.13)$$

ค่า Impedance ที่ทางเข้าของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ของรูปที่ 4.5 เมื่อไม่พิจารณาค่า Impedance ของ C_{d1}

$$Z_{in} = R_m + X_m \quad (4.14)$$

$$R_{in} = R + \frac{R_{eq}}{N^2(1 + (2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2)} \quad (4.15)$$

$$X_{in} = 2\pi f_s L - \frac{1}{2\pi f_s C} - \frac{(2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2}{(2\pi f_s C_{d2} N^2)(1 + (2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2)} \quad (4.16)$$

สมการที่ (4.9) (4.10) และ (4.11) คำนวณขนาด Impedance ที่ทางด้านเข้า

$$|Z_m| = \sqrt{R_m^2 + X_m^2} \quad (4.17)$$

สมการที่ (4.9)(4.10) (และ (4.11) คำนวณมุม Impedance ทางด้านเข้า

$$\theta = a \tan \left[\frac{X_m}{R_m} \right] \quad (4.18)$$

ค่ากระแสที่ L จากสมการที่ (4.8) และ (4.12)

$$I_L = \frac{V_{in}}{|Z_m|} = \frac{2V_{DC}}{\pi|Z_m|} \quad (4.19)$$

แทนค่าสมการ(4.14)ลงในสมการที่(4.7)

$$t_{min} = \frac{\pi C_{d1} |Z_m|}{2 \sin(\theta)} \quad (4.20)$$

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

ช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่มากที่สุด (t_{max}) ที่ S_2 ยังคงทำงานได้แบบ ZVS จากรูปที่ 4.5 ถ้าสวิตช์ S_2 ปิดวงจรหลังจากกระแส I_L เริ่มเป็นบวกจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ C_{d1} จ่ายกระแสแทน V_{DC} เพราะสวิตช์ S_1 เปิดอยู่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ V_{in} ลดส่งผลให้แรงดันไฟฟ้า V_{ds2} ไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นถ้า S_2 ปิดวงจรทำให้เกิดการสูญเสียที่สวิตช์, และการทำงานไม่เป็นแบบ ZVS จากรูปที่ 4.5 วิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ของมุมของกระแสไฟฟ้า I_L ในหนึ่งคาบเวลา

ถ้าหนึ่งคาบเวลา (T_s) เท่ากับ 360° แล้วคาบเวลา t_{max} เท่ากับมุมของกระแส I_L ตามรูปที่ 4.5

$$\frac{T_s}{360^\circ} = \frac{t_{\max}}{\theta} \quad (4.21)$$

$$t_{\max} = \frac{T_s \theta}{360^\circ} \quad (4.22)$$

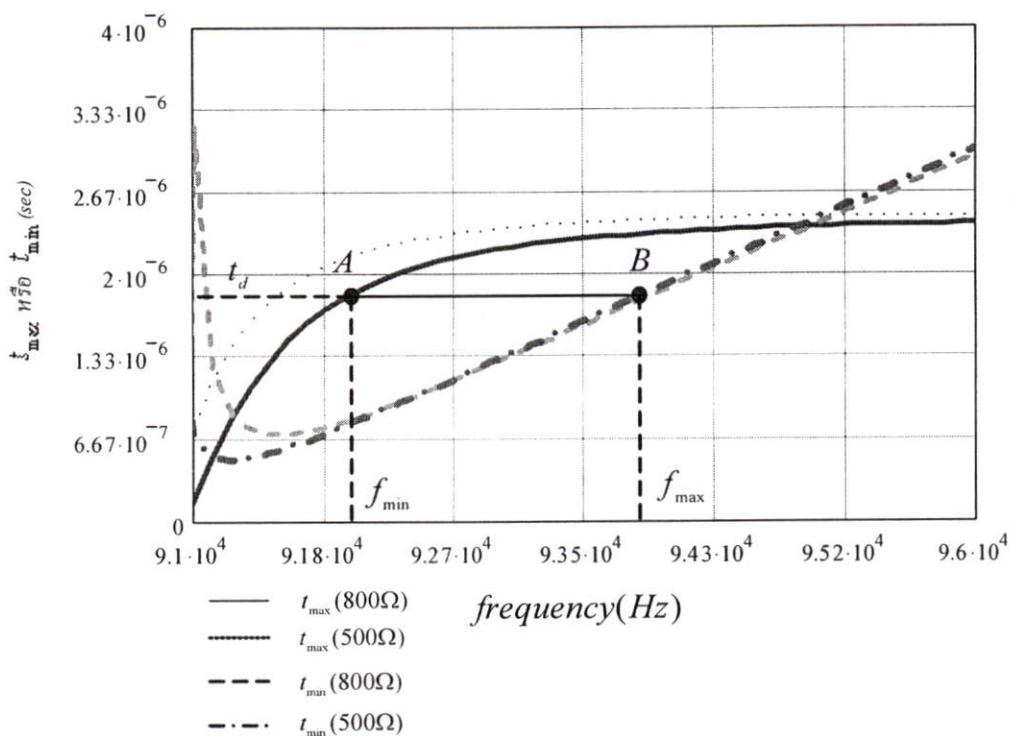
โดยที่

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (4.23)$$

แทนค่าสมการที่(4.18)ลงในสมการที่(4.17) ได้

$$t_{\max} = \frac{\theta}{f_s 360^\circ} \quad (4.24)$$

นำสมการ (4.15) และ (4.19) มาวิเคราะห์เพื่อหาช่วงเวลา Dead-time ที่ยังอยู่ภายใต้เงื่อนไข ZVS จากรูปที่ 4.6 ช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่อยู่ระหว่าง t_{\min} และ t_{\max} เป็นพื้นที่ที่ยังอยู่ในเงื่อนไข ZVS ในการออกแบบให้กำหนดช่วงเวลา Dead-time (t_d) แล้วลากเส้นภายในพื้นที่ของเงื่อนไข ZVS ทำให้ได้ความถี่สูงสุดของการสวิตช์ (f_{\max}) และความถี่ต่ำสุดของการสวิตช์ (f_{\min}) เพื่อใช้ในการออกแบบต่อไป



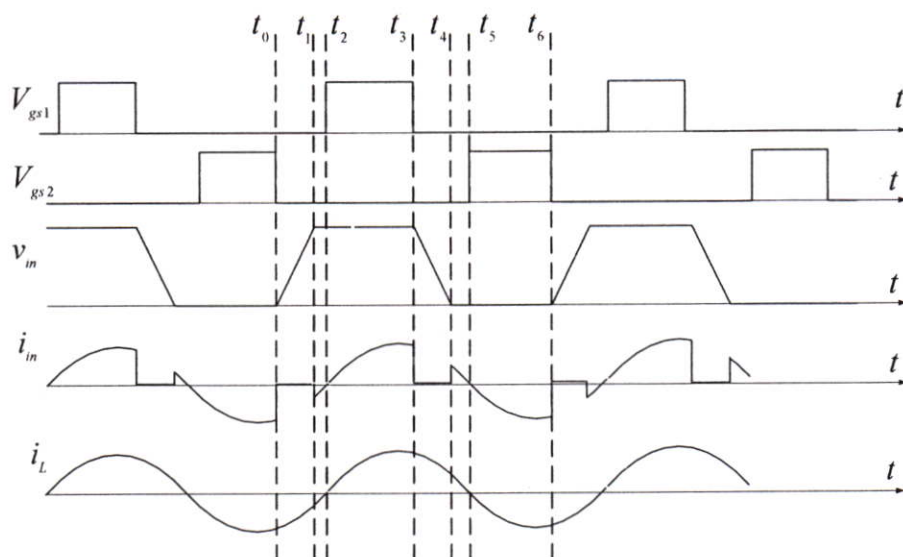
รูปที่ 4.6 แสดงช่วงเวลา Dead-time ที่ทำให้เกิดเงื่อนไข ZVS

4.4 การทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ภายใต้เงื่อนไข ZVS

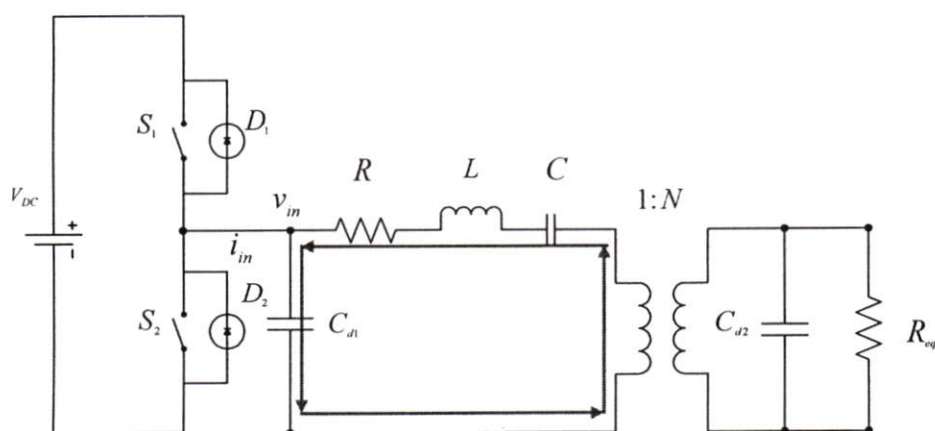
การทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 ตามรูปที่ 4.4 ภายใต้การทำงานที่สวิตช์ทำงาน ZVS อธิบายตามคาบเวลาการทำงานได้ดังต่อไปนี้ [13]

การเกิด ZVS ในสวิตช์ตัวที่หนึ่ง (S_1) จากรูปที่ 4.7 ที่คาบเวลา $t_0 - t_1$ ตัวเก็บประจุด้านทางเข้า C_{dl} เก็บประจุ (Charge) จนเต็มทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ตัวที่สองเท่ากับ V_{DC} ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ตัวที่หนึ่งเป็นศูนย์ เมื่อสวิตช์ตัวที่หนึ่งทำงานในช่วงเวลานี้จะทำให้เกิด ZVS ในสวิตช์ตัวที่หนึ่ง

การเกิด ZVS ในสวิตช์ตัวที่สอง (S_2) จากรูปที่ 4.7 ที่คาบเวลา $t_3 - t_4$ ตัวเก็บประจุด้านทางเข้า C_{dl} คายประจุ (Discharge) จนหมดทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ตัวที่สองเท่ากับศูนย์ เมื่อสวิตช์ตัวที่สองทำงานในช่วงเวลานี้จะทำให้เกิด ZVS ในสวิตช์ตัวที่สอง



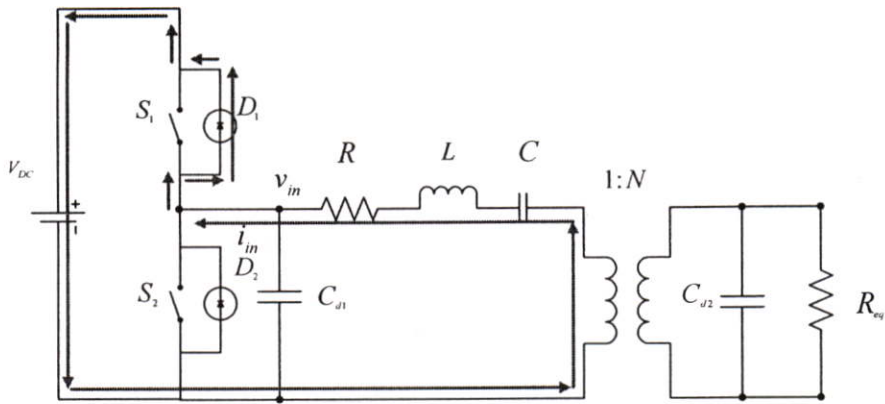
รูปที่ 4.7 คาบเวลาการทำงานของเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์เมื่อทำงานแบบ ZVS



รูปที่ 4.8 การทำงานของเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_0 - t_1$

4.4.1 ช่วงเวลาแรก ที่เวลา t_0 ถึง t_1

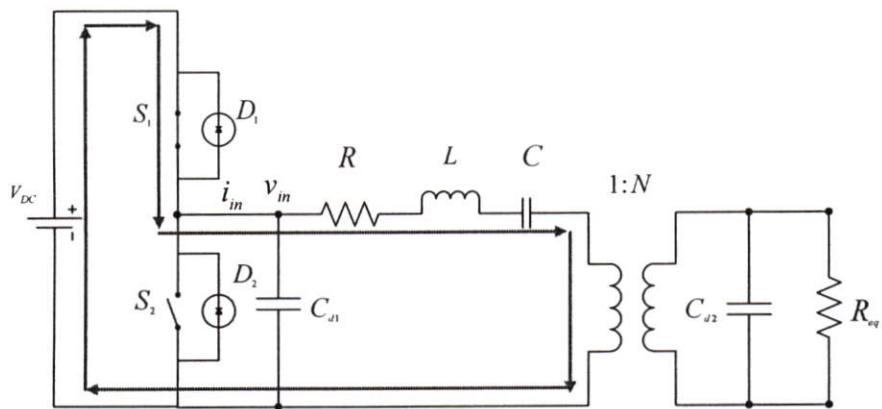
เมื่อสวิตช์ S_2 เริ่มเปิดวงจรที่เวลา t_0 โดยที่สวิตช์ S_1 ยังคงเปิดวงจรอยู่ C_{d1} เริ่มเก็บประจุไฟฟ้าโดยกระแสไฟฟ้าจากตัวเหนี่ยวนำ L จนแรงดันไฟฟ้าที่ C_{d1} มีค่าเท่ากับ V_{DC} ขณะสวิตช์ S_2 เปิดวงจรแรงดันไฟฟ้าที่ S_2 จะเท่ากับศูนย์ เพราะ C_{d1} มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นศูนย์ทำให้เกิดทำงานแบบ ZVS และ C_{d1} จะเก็บประจุไฟฟ้าไปตลอดช่วงเวลา t_0 ถึง t_1 ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_1 จะต้องไม่ปิดวงจรก่อนที่ C_{d1} เก็บประจุไฟฟ้าจนแรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_{d1} เท่ากับ V_{DC} เพราะถ้าสวิตช์ S_1 ปิดวงจรก่อน v_{Cd1} เท่ากับ V_{dc} , v_{ds1} จะไม่เท่ากับศูนย์ทำให้สวิตช์ S_1 ไม่ทำงานแบบ ZVS



รูปที่ 4.9 การทำงานของเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_1 - t_2$

4.4.2 ช่วงเวลาที่สอง ที่เวลา t_1 ถึง t_2

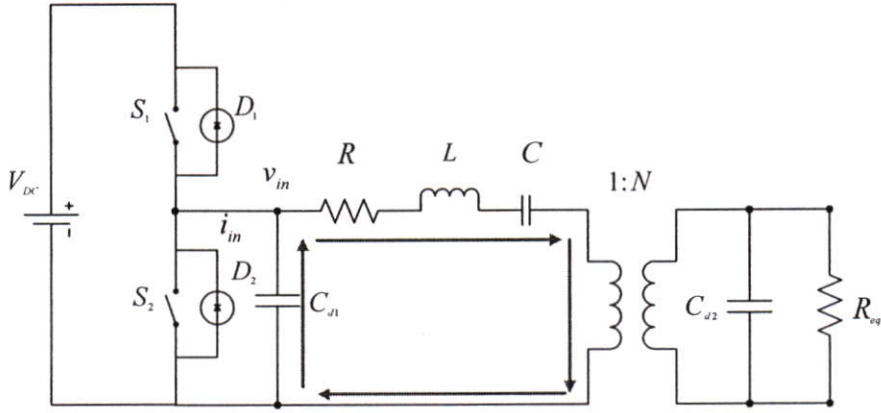
ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_1 และ S_2 ยังเปิดวงจรอยู่ C_{d1} เก็บประจุไฟฟ้าถ้า v_{Cd1} มากกว่า V_{dc} จะทำให้ D_1 ทำงานกระแสไฟฟ้าไหลจาก C_{d1} ผ่าน D_1 ไปยัง V_{dc}



รูปที่ 4.10 การทำงานของเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_2 - t_3$

4.4.3 ช่วงเวลาที่สาม ที่เวลา t_2 ถึง t_3

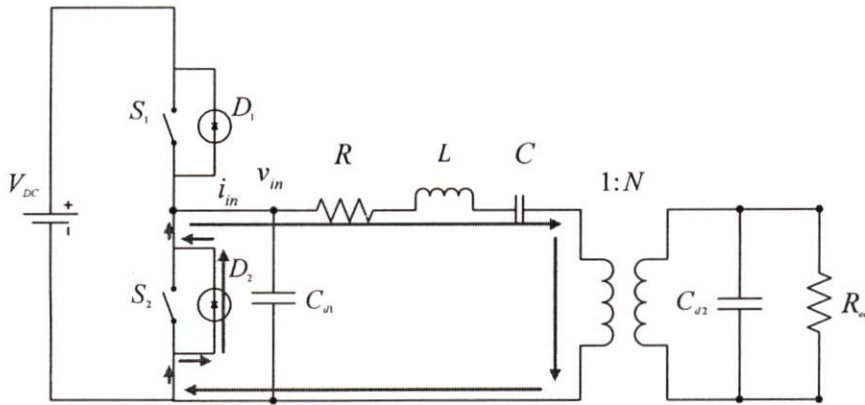
ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_2 ยังเปิดวงจรอยู่แต่สวิตช์ S_1 เริ่มปิดวงจรหลังระยะเวลาที่ v_{Cd1} เท่ากับ V_{dc} , v_{ds1} เท่ากับศูนย์ S_1 ทำงานแบบ ZVS กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสวิตช์ S_1 ไปที่ R, L และ C โดยไม่ไหลเข้า C_{d1} เพราะมีประจุไฟฟ้าเต็ม



รูปที่ 4.11 การทำงานของเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา t_3 - t_4

4.4.4 ช่วงเวลาที่สี่ ที่เวลา t_3 ถึง t_4

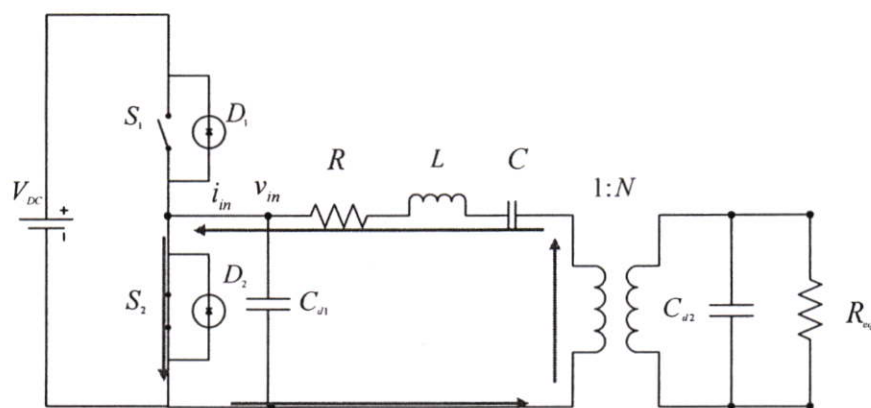
เมื่อสวิตช์ S_1 เริ่มเปิดวงจรสวิตช์ที่เวลา t_3 , เมื่อสวิตช์ S_1 เริ่มเปิดวงจรแรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ S_1 จะเท่ากับศูนย์เพราะ C_{d1} มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ V_{dc} , S_1 จึงทำงานแบบ ZVS โดยที่ S_2 ยังเปิดวงจรอยู่ C_{d1} จะคายประจุไฟฟ้าตลอดช่วงเวลา t_3 ถึง t_4 ให้ตัวเหนี่ยวนำ L จนแรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_{d1} มีค่าลดลงจนเท่ากับศูนย์ ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_2 จะต้องไม่ปิดวงจรก่อนที่ C_{d1} คายประจุไฟฟ้าจนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_{d1} เท่ากับศูนย์ เพราะถ้าสวิตช์ S_2 ปิดวงจรก่อนจะทำให้ S_2 ไม่ทำงานแบบ ZVS



รูปที่ 4.12 การทำงานของเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา t_4 - t_5

4.4.5 ช่วงเวลาที่ห้า ที่เวลา t_4 ถึง t_5

ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_1 และ S_2 ยังเปิดวงจรอยู่ C_{d1} คายประจุหมด แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_{d1} มีค่าเท่ากับศูนย์ช่วงเวลา t_4 ถึง t_5 กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน D_2



รูปที่ 4.13 การทำงานของปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา t_5 - t_6

4.4.6 ช่วงเวลาที่หก ที่เวลา t_5 ถึง t_6

ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_1 ยังเปิดวงจรอยู่แต่สวิตช์ S_2 เริ่มปิดวงจรหลังระยะเวลา $t = t_5$ ที่แรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_{d1} มีค่าเท่ากับศูนย์กระแสไฟฟ้าจะไหลจาก R , L และ C ผ่านสวิตช์ S_2 โดยไม่ไหลเข้า C_{d1} เพราะสวิตช์ S_2 ต่อขานาน C_{d1} และ v_{cd1} เท่ากับศูนย์ ดังนั้น S_2 ทำงานแบบ ZVS

4.7 สรุป

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ประกอบด้วยภาคกำลังและภากระบบควบคุม โดยมีวงจรภาคกำลังเป็นวงจรหลักในการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกที่ต้องการ ส่วนระบบควบคุมเป็นวงจรสำหรับควบคุมผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกให้เป็นไปตามคุณสมบัติของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ต้องการ ได้แก่การมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว และความสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกให้มีค่าอยู่ภายในย่านที่กำหนดได้ โดยวิธีการออกแบบวงจรควบคุมที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ คือ วิธีผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 5

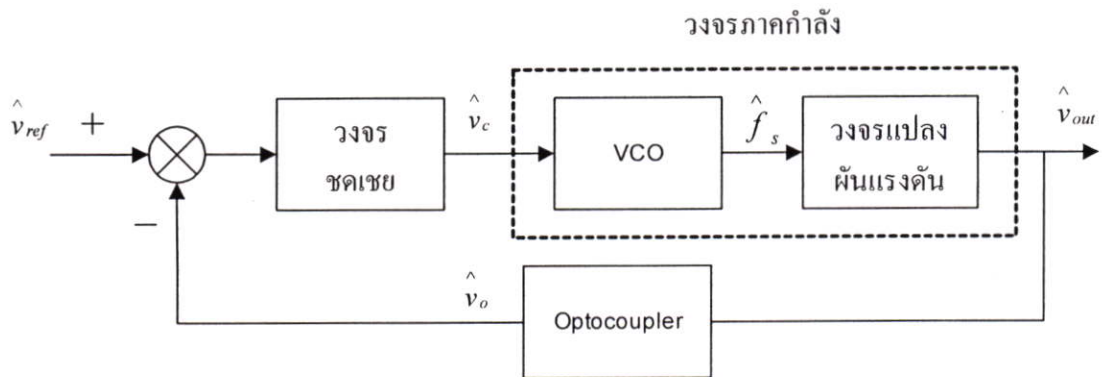
การออกแบบระบบควบคุมและวงจรควบคุม

5.1 บทนำ

การออกแบบระบบควบคุมและวงจรควบคุมโดยวิธีวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบต่อความถี่ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการออกแบบที่ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ชั้นสูง การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติเสถียรภาพของระบบได้ด้วย โดยพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดโดยรวมของระบบ (Open loop transfer function) การออกแบบวงจรควบคุมด้วยวิธีนี้กระทำบนแผนภาพ Bode โดยออกแบบวงจรควบคุมเพื่อให้แผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดโดยรวม (แผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรรวมรวมกับแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรากกำลัง และแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนของส่วนวัดสัญญาณ) มีคุณสมบัติตามต้องการ ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทนี้ [14]

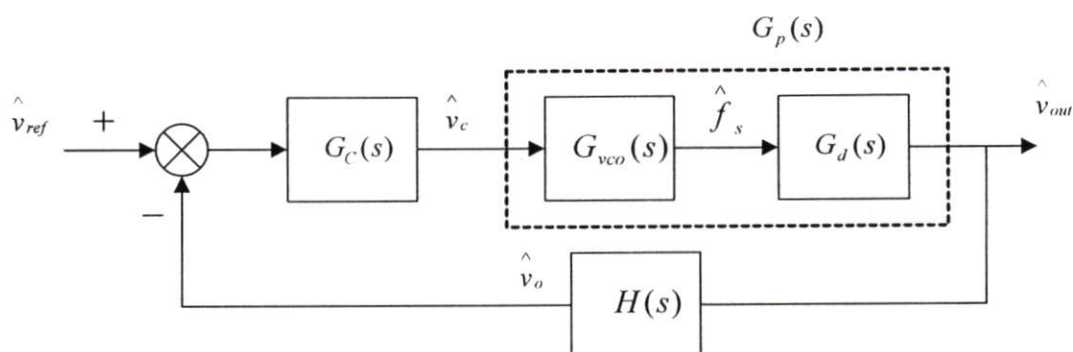
5.2 คุณสมบัติของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ดีจะต้องมีเสถียรภาพตลอดการทำงาน คือสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางด้านออกได้ดี และมีผลตอบสนองที่รวดเร็วเมื่อมีการรบกวนการทำงาน การออกแบบเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว เริ่มต้นจากการพิจารณาโดยแสดงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ด้วยบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 5.1 [14]



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์

รูปที่ 5.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมชนิดสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์



รูปที่ 5.2 บล็อกไดอะแกรมชนิดสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ทางด้านทางออกและแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง แสดงได้ดังสมการที่ (5.1)

$$\frac{\hat{v}_{out}}{\hat{v}_{ref}} = \frac{R(s)}{1 + T(s)} \quad (5.1)$$

เมื่อ

$$T(s) = G_C(s)G_p(s)H(s)$$

$$R(s) = G_C(s)G_p(s)$$

โดยที่

\hat{v}_{ref} คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงชนิดสัญญาณขนาดเล็กในรูปตัวแปรเชิงซ้อน s

$G_d(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ทางด้านทางออกกับความถี่ที่ทางด้านทางเข้าของคอนเวอร์เตอร์

$G_{vco}(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความถี่ที่ทางด้านทางเข้าของคอนเวอร์เตอร์กับสัญญาณควบคุม

$G_C(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุม

$G_p(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลัง

$H(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของ Optocoupler

- $T(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบควบคุม (Open loop transfer function)
- $R(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนไปหน้าของระบบควบคุม (Forward loop transfer function)

คุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบที่ต้องการจะพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดสมการที่ (5.1) มีดังต่อไปนี้

5.2.1 เสถียรภาพ

เสถียรภาพของระบบ คือ ความสามารถในการกลับเข้าสู่สภาพสมดุลเดิมของระบบหลังจากถูกรบกวน สามารถตรวจสอบได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด กล่าวคือ หากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบมี Pole อยู่ทางด้านขวาของระนาบเชิงซ้อน (s) ระบบนั้นจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งจากสมการที่ (5.1) Pole หรือตำแหน่งรากของพหุนามส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดหาได้จากสมการที่ (5.2) [14]

$$1 + T(s) = 0 \quad (5.2)$$

สมการดังกล่าวถูกแสดงในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด ดังนั้นเสถียรภาพของระบบจึงสามารถวิเคราะห์ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดโดยการจัดรูปสมการที่ (5.2) ใหม่จะได้สมการที่แสดงเงื่อนไขที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ กล่าวคือ (5.3) [14]

$$T(s) = -1 = |1| \angle -180^\circ \quad (5.3)$$

ระบบจะขาดเสถียรภาพหาก Phase lag ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ Crossover frequency, f_{cv} [ความถี่ที่อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่าเป็น 1 (0 dB)] มีค่าเท่ากับ 180° คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ใช้พิจารณาเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ ได้แก่ Phase margin, PM และ Gain margin, GM [14]

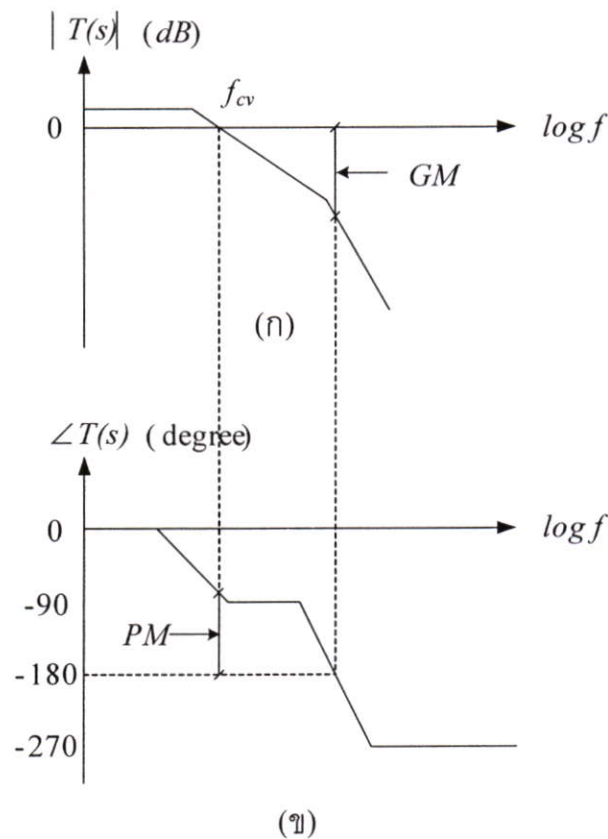
ก. Phase margin

คือ ผลต่างระหว่าง 180° กับ Phase lag ที่ Crossover frequency แสดงดังรูปที่ 5.3(ก) ระบบที่มีเสถียรภาพจะต้องมีค่า Phase margin เฟสเป็นบวกซึ่งก็คือ มีค่า Phase lag ที่ความถี่ Crossover frequency น้อยกว่า 180° นั่นเอง โดยที่ Phase margin นี้ถึงแม้ว่ามีค่าเป็นบวกแต่หากมีค่าเข้าใกล้ 0° มากเกินไปจะทำให้ความมีเสถียรภาพของระบบจะลดลงได้เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่

ทางออกที่ได้จะเกิดการแกว่งมากเกินไป ในทางปฏิบัติ Phase margin ควรจะมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า 45° [14]

ข. Gain margin

คือ ผลต่างระหว่าง 0 dB กับอัตราขยายที่ความถี่ที่ Phase lag เป็น 180° แสดงดังรูปที่ 5.3(ข) ในทำนองเดียวกับ Phase margin ระบบที่มีเสถียรภาพจะต้องมีค่า Gain margin เป็นบวกซึ่งก็คือ มีค่าอัตราขยายที่ความถี่ที่ Phase lag เป็น 180° น้อยกว่า 0 dB นั่นเอง ในทางปฏิบัติ Gain margin ควรจะมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า 6 dB [14]



รูปที่ 5.3 กราฟแสดง Phase margin และ Gain margin ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด

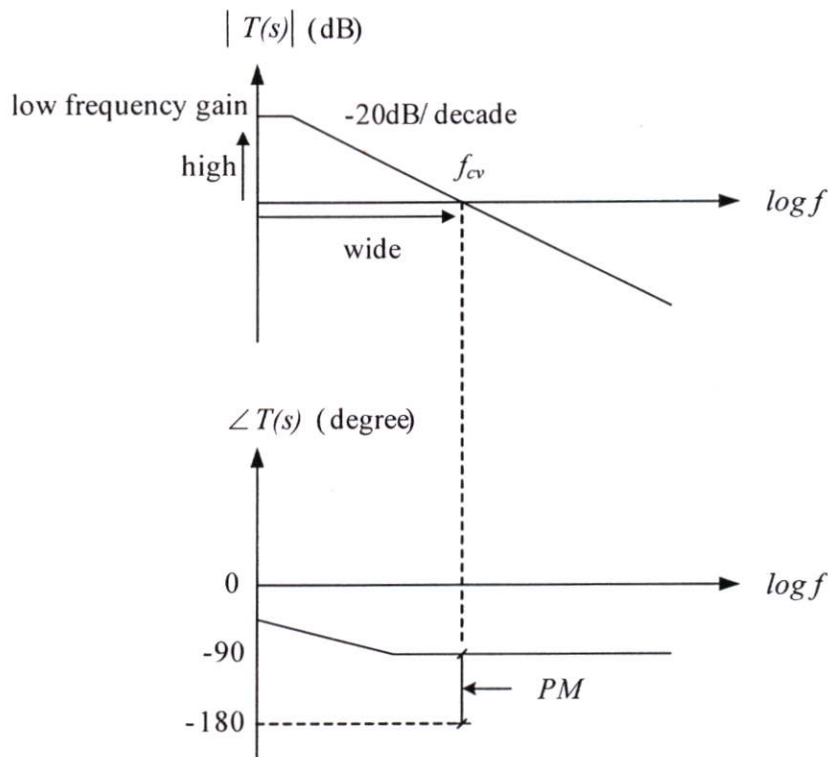
5.2.2 คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี

คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ที่จะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ [14]

1. Phase margin และ Gain margin ควรมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า 45° และ 6 dB ตามลำดับเพื่อความมีเสถียรภาพและไม่ให้แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกแกว่งมากเกินไป

2. อัตราขยาย DC ควรมีค่ามากเพื่อให้มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกขณะสถานะคงตัวได้ดี

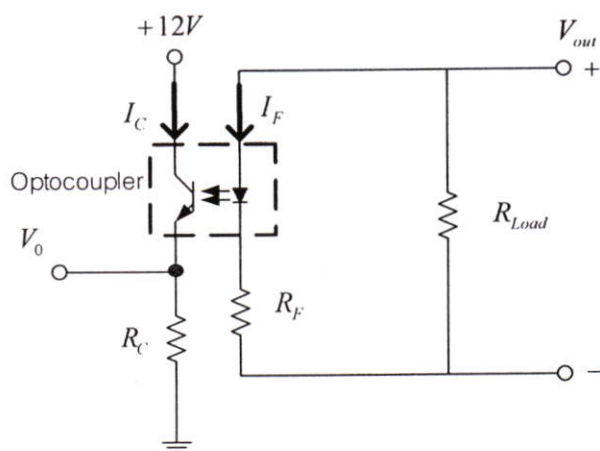
3. ความถี่ Crossover frequency, f_{cv} ควรมีค่ามากเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 0.25 เท่าของความถี่ในการสวิตช์เพราะอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกมีความถี่ของการสวิตช์ปรากฏที่ทางออก คุณสมบัติดังกล่าวสามารถสรุปแสดงเป็นแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 กราฟของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ต้องการ

5.3 วงจรแบ่งแรงดันทางไฟฟ้าที่มี Optocoupler

ในการป้อนกลับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกสำหรับวงจรเบี่ยโซอิลเล็กทริกทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์จำเป็นต้องสร้างวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเพื่อแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรดังกล่าว (20 V) ให้ได้ค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ (5 V) ซึ่งได้จากแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของ MC34067P (ไอซีควบคุมการทำงาน) Optocoupler จะทำหน้าที่ในการแยกกราวด์ ของระบบภาคกำลังกับภากระบบควบคุม โดยวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกแสดงดังรูปที่ 5.5 แสดงสมการระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกและแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกแสดงได้ดังสมการที่ (5.7)



รูปที่ 5.5 วงจรแสดงการทำงานของ Optocoupler

สมการกระแสไฟฟ้าของ I_F

$$I_F = \frac{V_{out}}{R_F} \quad (5.4)$$

สมการกระแสไฟฟ้าของ I_C

$$I_C = \frac{V_o}{R_C} \quad (5.5)$$

สมการความสัมพันธ์ของ I_C กับ I_F โดยที่ K_d คืออัตราค่าการเปลี่ยนแปลงของ I_C กับ I_F

$$\frac{I_C}{I_F} = K_d \quad (5.6)$$

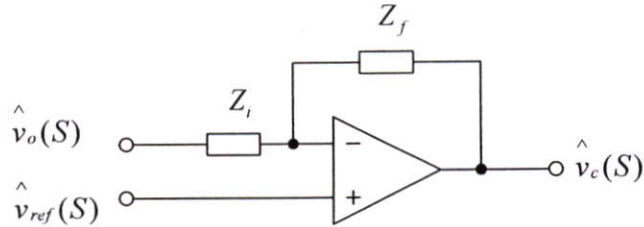
แทนสมการที่(5.4)และ(5.5)ลงในสมการที่(5.6)

$$\frac{V_o}{V_{out}} = \frac{K_d R_C}{R_F} \quad (5.7)$$

5.4 วงจรควบคุม

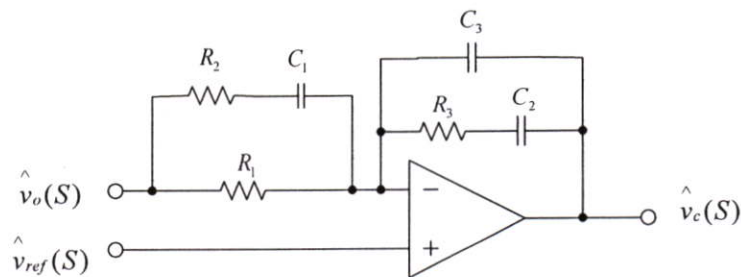
ในการนำแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ไปใช้งาน แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกจะต้องมีค่า อยู่ภายในย่านที่กำหนดถึงแม้แรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าหรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลง การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกให้คงที่จะกระทำโดยการป้อนกลับแบบลบ (รูปที่ 5.1) เพื่อให้ระบบปรับความถี่

ด้วยตัวเองอย่างอัตโนมัติโดยที่สัญญาณควบคุมความการปรับความถี่ถูกสร้างจากวงจรขยายสัญญาณความผิดพลาด (Error amplifier) ซึ่งขยายค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (Reference voltage, v_{ref}) กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกดังแสดงในรูปที่ 5.6 ระบบจะทำการปรับความถี่ไปจนแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง [14]



รูปที่ 5.6 วงจรควบคุมที่สร้างด้วยวงจรขยายสัญญาณความผิดพลาด

แม้ว่าการป้อนกลับจะทำให้ระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้อย่างอัตโนมัติ แต่อาจเป็นต้นเหตุให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ นอกจากนี้การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกที่ได้ อาจจะไม่เป็นที่ต้องการ เช่นมีการตอบสนองช้า มีการแกว่งมากเกินไป หรือมีความคลาดเคลื่อนมากจากค่าที่ต้องการ ปัญหาเหล่านี้สามารถป้องกันและควบคุมได้ด้วยการออกแบบวงจรควบคุมให้เหมาะสม การออกแบบวงจรควบคุมจึงเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบเพื่อให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์มีสมรรถนะที่ดี และจะนำเสนอในบทต่อไป ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะรูปแบบของวงจรควบคุม [14]



รูปที่ 5.7 วงจรควบคุมแบบ 3 - Pole 2 - Zero

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้วงจรควบคุมแบบแบบ 3 - Pole 2 - Zero แสดงดังรูปที่ 5.7 เป็นวงจรควบคุมที่ใช้วิธีการควบคุมแบบแรงดันไฟฟ้า ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกแสดงได้ดังสมการที่ (5.8) [14]

$$G_c(s) = \frac{\hat{v}_c(s)}{\hat{v}_o(s)} = K_C \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)} \quad (5.8)$$

โดยที่

$$K_C = R_1(C_2 + C_3)$$

$$\omega_{z1} = \frac{1}{R_3 C_3}$$

$$\omega_{z2} = \frac{1}{(R_1 + R_2)C_3}$$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{R_2 C_1}$$

$$\omega_{p2} = \frac{1}{R_3 \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}}$$

โดยที่

ω_{z1} คือ ความถี่เชิงมุมของ Zero ตัวที่หนึ่งของวงจรถอบคุม

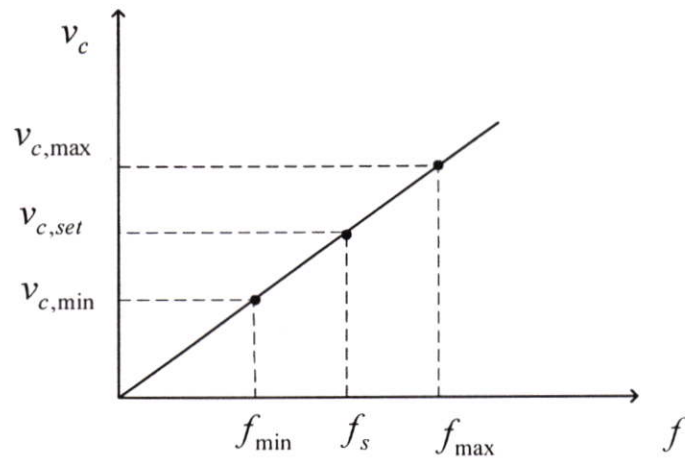
ω_{z2} คือ ความถี่เชิงมุมของ Zero ตัวที่สองของวงจรถอบคุม

ω_{p1} คือ ความถี่เชิงมุมของ Pole ตัวที่หนึ่งของวงจรถอบคุม

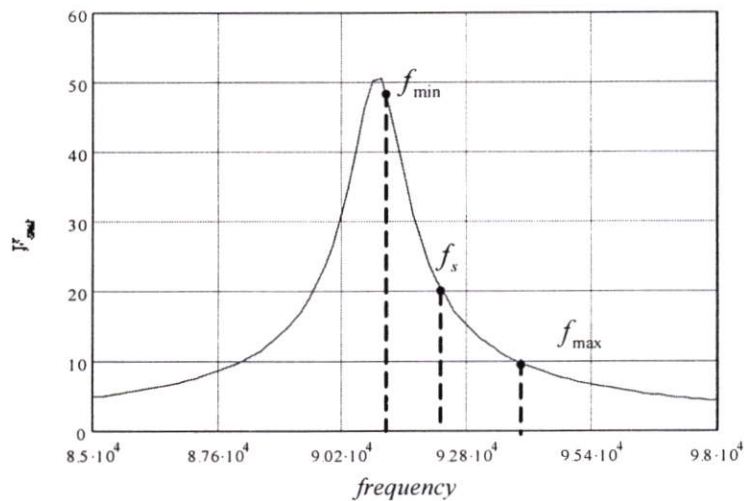
ω_{p2} คือ ความถี่เชิงมุมของ Pole ตัวที่สองของวงจรถอบคุม

5.5 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ (VCO)

แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์สามารถควบคุมได้ด้วยการปรับความถี่ของสวิตช์โดยที่ค่า Duty Cycle คงที่จากรูปที่ 5.8 เมื่อสัญญาณควบคุมที่มาจากวงจรถอบคุม (v_c) มีค่ามากขึ้นวงจรแปลงผันแรงดันทางไฟฟ้าเป็นความถี่ (VCO) จะเพิ่มความถี่ขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ (V_{out}) ลดลง(รูปที่ 5.9) และเมื่อสัญญาณควบคุมที่มาจากวงจรถอบคุม (v_c) มีค่าลดลงวงจรแปลงผันแรงดันทางไฟฟ้าเป็นความถี่ (VCO) จะลดความถี่ลงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ (V_{out}) เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5.9) จึงทำให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ได้



รูปที่ 5.8 แผนภาพแสดงการทำงานของ VCO



รูปที่ 5.9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ V_{out} กับความถี่

5.6 การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณขนาดเล็กของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม

การวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กของฟังก์ชันถ่ายโอนเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้วิธีการหาด้วยการรบกวนด้วยสัญญาณขนาดเล็ก (\hat{v}_c) ตามรูปที่ 5.10 แล้วทำการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง \hat{v}_{out} และ \hat{v}_c (รูปที่ 5.11) ซึ่งสมการของการรบกวนด้วยสัญญาณขนาดเล็กใช้สมการที่ (5.11) โดยเปลี่ยนความถี่เพิ่มขึ้นทำให้ได้ทั้งขนาดและมุมตามกราฟรูปที่ (5.12) หลังจากนั้นนำกราฟที่ได้ไปหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุมโดยการทำ Curve fitting

สมการการการกวนด้วยสัญญาณขนาดเล็ก

$$V_C = V_C + \hat{v}_c \quad (5.9)$$

$$V_{out} = V_{out} + \hat{v}_{out} \quad (5.10)$$

สมการสัญญาณขนาดเล็ก

$$\hat{v}_c = A_C \sin(2\pi f_C) \quad (5.11)$$

$$\hat{v}_{out} = A_{out} \sin(2\pi f_C - \phi) \quad (5.12)$$

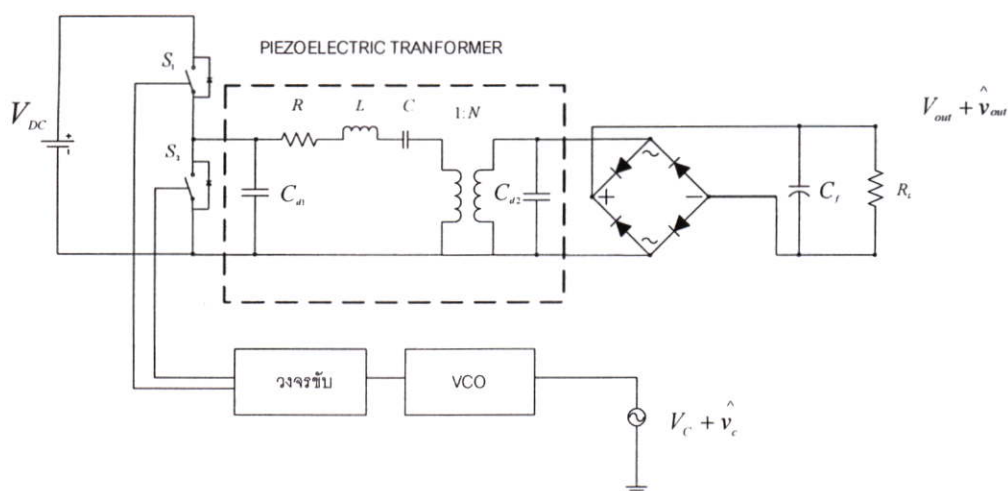
โดยที่

A_C คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้รบกวน

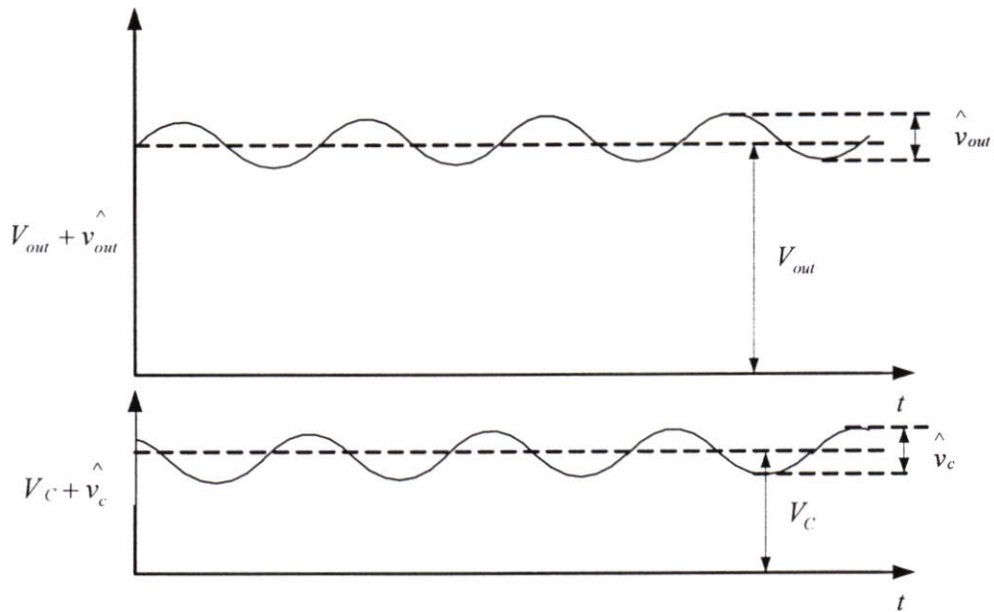
f_C คือความถี่ของสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้รบกวน

A_{out} คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

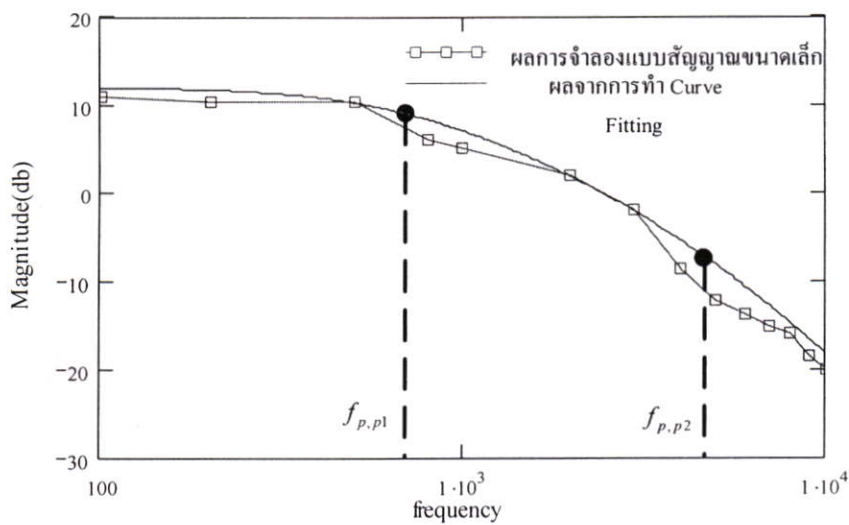
ϕ คือมุมของสัญญาณขนาดเล็กด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.10 วงจรจำลองสัญญาณขนาดเล็กเพื่อวิเคราะห์ของฟังก์ชันถ่ายโอนเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม



รูปที่ 5.11 แผนภาพแสดงสัญญาณขนาดเล็กของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม



รูปที่ 5.12 แผนภาพแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุมและการทำ Curve fitting

การวาง Pole เพื่อวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ ไม่รวมวงจรควบคุมทำโดยใช้เทคนิค Curve Fitting ได้สมการที่ (5.13)

$$G_p(S) = \frac{K_p}{\left(1 + \frac{S}{2\pi f_{p,p1}}\right) \left(1 + \frac{S}{2\pi f_{p,p2}}\right)} \quad (5.13)$$

โดยที่

- K_p คือ อัตราขยายของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ ไม่รวมวงจรควบคุม
- $f_{p,p1}$ คือ Pole ที่วางตัวที่หนึ่ง
- $f_{p,p2}$ คือ Pole ที่วางตัวที่สอง

5.7 การออกแบบวงจรควบคุม

ในหัวข้อที่ 5.7 จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ ไม่รวมวงจรควบคุม ได้จากผลคูณระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลังกับ ฟังก์ชันถ่ายโอนของ Optocoupler $[G_p(s)H(s)]$ ในรูปที่ 5.2 หรืออีกนัยหนึ่งคือผลรวมของแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งสอง, การออกแบบวงจรควบคุมจึงเป็นการออกแบบแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมซึ่งเมื่อรวมกับแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ $G_p(s)H(s)$ แล้วได้แผนภาพ Bode รวมของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการดังรูปที่ 5.13 ขั้นตอนการออกแบบวงจรควบคุมมีดังต่อไปนี้

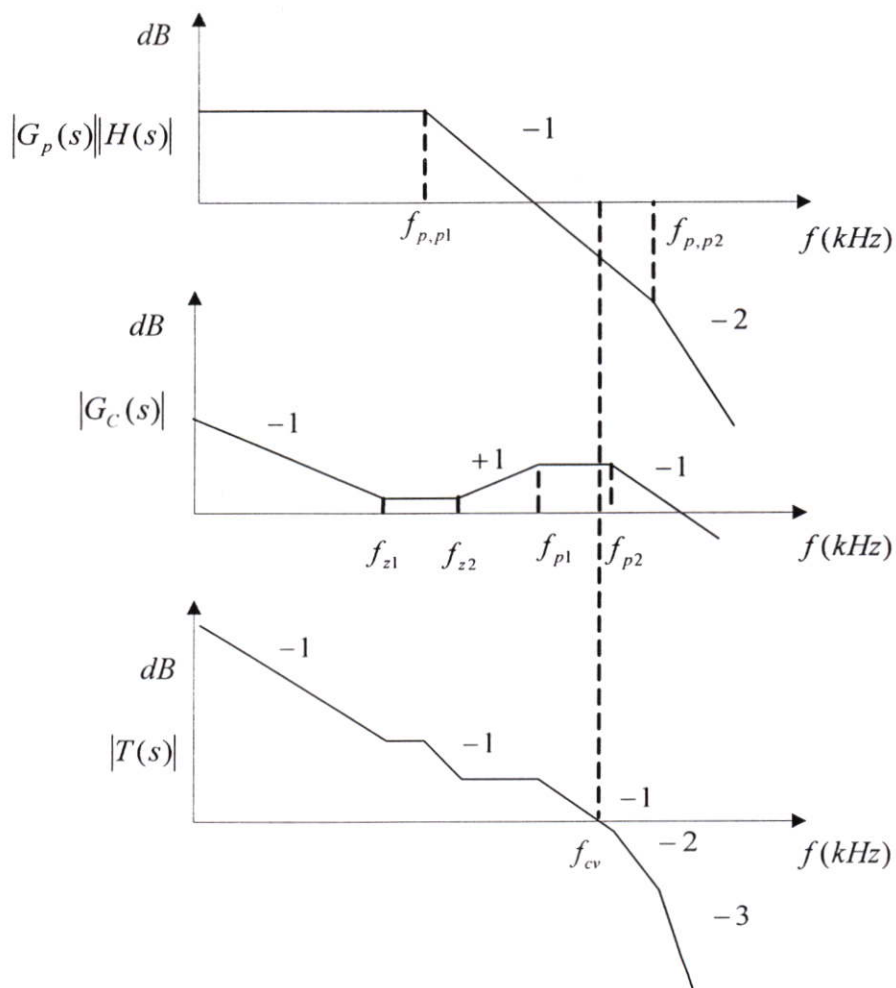
1. กำหนดความถี่ Crossover frequency แล้วคำนวณค่าอัตราขยายที่ตำแหน่งนั้นของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมที่ต้องการ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอัตราขยายที่ความถี่ Crossover frequency ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ $G_p(s)H(s)$ แต่เครื่องหมายตรงกันข้ามเพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ Crossover frequency ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมมีค่าเป็นศูนย์
2. วาง Pole ของวงจรควบคุมที่จุดกำเนิดหนึ่งตัวเพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมมีค่ามาก ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมมีค่ามากเช่นกัน
3. วาง Zero ตัวที่หนึ่งของวงจรควบคุมที่ความถี่ต่ำเพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมมี Slope เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมมีค่าคงที่
4. วาง Zero ตัวที่สองของวงจรควบคุมที่ความถี่มากกว่า Pole ตัวที่หนึ่งของฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s)H(s)$ เล็กน้อย เพื่อให้ฟังก์ชันถ่ายโอนรวมมีความ Slope เท่ากับศูนย์ส่งผลให้ Crossover frequency เลื่อนไกลออกไป

5. วาง Pole ตัวที่สองของวงจรถบคุมที่ความถี่น้อยกว่าความถี่ Crossover frequency เพื่อให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถบคุมมี Slope เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมลดลงเข้าสู่ Crossover frequency

6. วาง Pole ตัวที่สามของวงจรถบคุมที่ความถี่มากกว่าความถี่ Crossover frequency เพื่อให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถบคุมมี Slope เท่ากับ -20 dB/Decade ทำให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมมีค่าความ Slope มาก ส่งผลให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนรวมที่ความถี่สูงมีการลดทอนมาก

7. คำนวณค่าอัตราขยายที่ความถี่ของ Pole และ Zero ทั้งหมดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถบคุมโดยใช้ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 6

8. คำนวณค่าอุปกรณ์วงจรถบคุม



รูปที่ 5.13 รูปกราฟของการออกแบบวงจรถบคุมแบบ 3 – Pole 2 – Zero

โดยที่

f_{z1}	คือ ความถี่ของ Zero ตัวที่หนึ่งของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถอบคุม
f_{z2}	คือ ความถี่ของ Zero ตัวที่สองของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถอบคุม
f_{p1}	คือ ความถี่ของ Pole ตัวที่หนึ่งของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถอบคุม
f_{p2}	คือ ความถี่ของ Pole ตัวที่สองของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถอบคุม
$f_{p,p1}$	คือ ความถี่ของ Pole ตัวที่หนึ่งของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถอบคุมกำลัง
$f_{p,p2}$	คือ ความถี่ของ Pole ตัวที่สองของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถอบคุมกำลัง
+1	คือ +20dB/ Decade
-1	คือ -20dB/Decade
-2	คือ -40dB/ Decade
-3	คือ -80dB/ Decade

5.8 สรุป

การออกแบบวงจรถอบคุมโดยวิธีผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นการออกแบบวงจรถอบคุมเพื่อให้ได้แผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมที่มีคุณสมบัติดังนี้ Phase Margin และ Gain Margin ควรมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า 45° และ 6 dB ตามลำดับ อัตราขยายที่ความถี่ต่ำควรมีค่ามาก และความถี่ Crossover frequency ควรมีค่าสูงแต่ไม่ควรเกิน 0.25 เท่าของความถี่ในการสวิตช์ เนื่องจากคุณสมบัติที่กล่าวมาจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกไม่แกว่งมากเกินไป มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกที่ดี และสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว ตัวอย่างการออกแบบวงจรถอบคุมจะนำเสนอในบทต่อไป

บทที่ 6

การออกแบบวงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

6.1 บทนำ

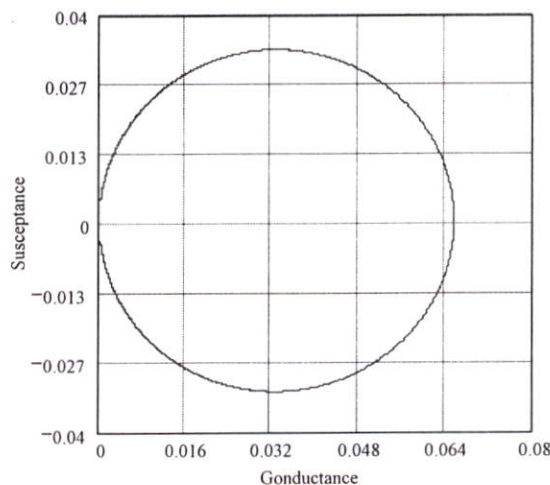
เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์มีส่วนประกอบหลายส่วนและแต่ละส่วนต้องออกแบบให้ตรงกับความต้องการใช้งานและต้องให้เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ประสิทธิภาพสูงพร้อมทั้งสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกได้ตามต้องการและมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว ในบทนี้แสดงการออกแบบวงจรต้นแบบเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ โดยรายละเอียดในการออกแบบสร้างวงจรแต่ละส่วนจะนำเสนอดังต่อไปนี้

6.2 การวัดพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ถูกนำมาวัดและวิเคราะห์หาพารามิเตอร์โดยใช้เครื่องวัด HP4194A Impedance Analyzer มีขั้นตอนการวัดสามขั้นตอนดังนี้

6.2.1 ขั้นตอนที่ 1

ลัดวงจรทางด้านทางออกตามรูปที่ 3.3 นำเครื่องวัด HP4194A Impedance Analyzer มาวัด Admittance ทางด้านทางเข้าที่ประกอบด้วย Susceptance และ Conductance นำค่าดังกล่าวมาแสดงกราฟ Circle measurement ตามรูปที่ 6.1 แล้วคำนวณพารามิเตอร์ตามหัวข้อที่ 3.3 ได้ดังนี้



รูปที่ 6.1 กราฟแสดงกราฟ G, B

$$G_{\max} = 0.065 \quad B_r = 0.00067 \quad f_r = 90722\text{Hz} \quad f_L = 90677\text{Hz} \quad f_H = 90774\text{Hz}$$

นำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ตามรูปที่ 3.9 ได้ดังนี้

คำนวณหาค่า R

$$R = \frac{1}{G_{\max}}$$

$$R = 15.385$$

คำนวณหาค่า C_{d1}

$$C_{d1} = \frac{B_r}{2\pi f_r}$$

$$C_{d1} = 1.175 \text{ nF}$$

คำนวณหาค่า L

$$L = R \frac{1}{(2\pi f_H - 2\pi f_L)}$$

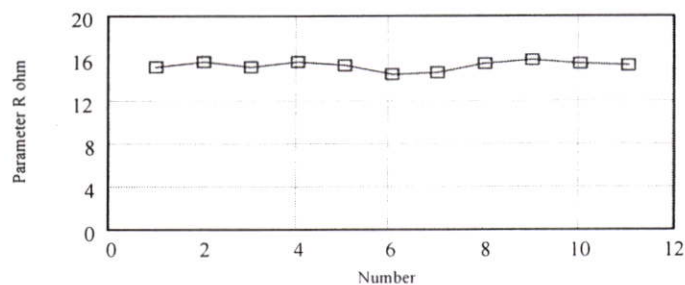
$$L = 25 \text{ mH}$$

คำนวณหาค่า C

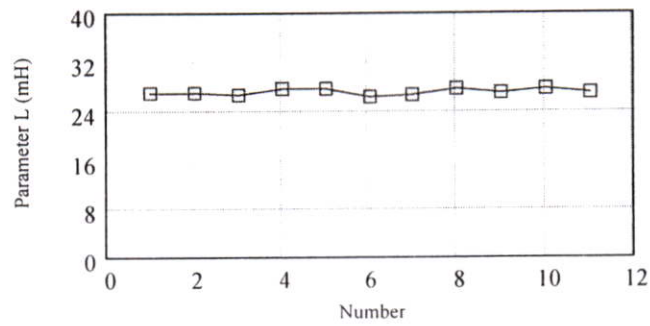
$$C = \frac{(2\pi f_H - 2\pi f_L)}{R(2\pi f_r)^2}$$

$$C = 115.34 \text{ pF}$$

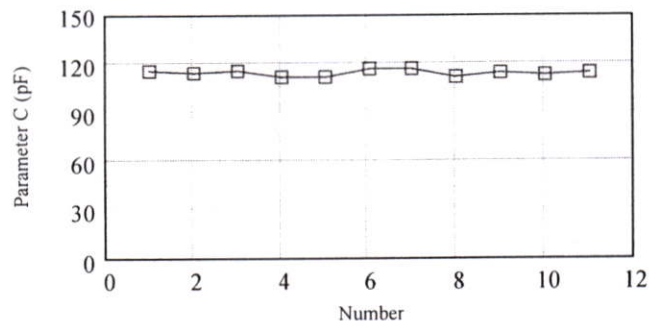
ทำการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้งแสดงตามรูปที่ 6.2 แล้วนำพารามิเตอร์ที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย โดยค่าเฉลี่ยที่ได้จะเป็นค่าที่จะนำไปใช้จริง



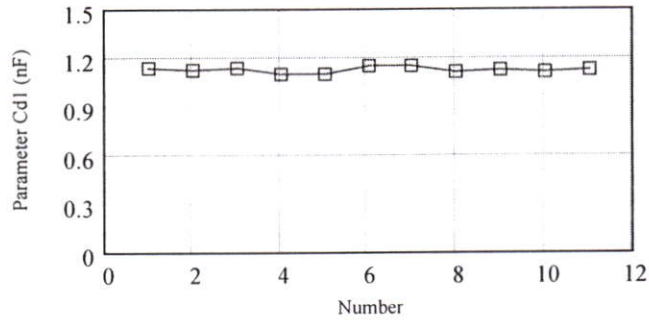
รูปที่ 6.2 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ R ด้านทางเข้า



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ L ด้านทางเข้า



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C ด้านทางเข้า



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C_{dl} ด้านทางเข้า

จากรูปที่ 6.2 ถึงรูปที่ 6.5 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ด้านทางออกเฉลี่ยได้ดังนี้

$$R_{\text{ทางเข้า}} = 15.24 \Omega$$

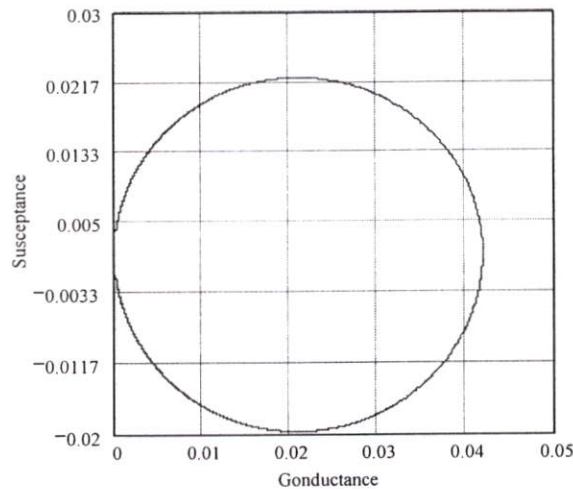
$$L_{\text{ทางเข้า}} = 26.93 \text{ mH}$$

$$C_{\text{ทางเข้า}} = 114.26 \text{ pF}$$

$$C_{dl} = 1.119 \text{ nF}$$

6.2.2 ขั้นตอนี่ 2

ลัดวงจรทางด้านทางเข้าตามรูปที่ 3.6 นำเครื่องวัด HP4194A Impedance Analyzer มาวัด Admittance ทางด้านทางเข้าที่ประกอบด้วย Susceptance และ Conductance นำค่าดังกล่าวมาแสดง กราฟ Circle Admittance ตามรูปที่ 6.6 แล้วคำนวณพารามิเตอร์ตามหัวข้อที่ 3.3 ได้ดังนี้



รูปที่ 6.6 กราฟแสดง Circle Admittance

$$G_{\max} = 0.042, B_r = 0.0012, f_r = 90715\text{Hz}, f_L = 90667\text{Hz}, f_H = 90762\text{Hz}$$

นำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาพารามิเตอร์ ได้ดังนี้

คำนวณหาค่า R

$$R = \frac{1}{G_{\max}}$$

$$R = 23.81$$

คำนวณหาค่า C_{d1}

$$C_{d1} = \frac{B_r}{2\pi f_r}$$

$$C_{d1} = 2.105\text{nF}$$

คำนวณหาค่า L

$$L = R \frac{1}{(2\pi f_H - 2\pi f_L)}$$

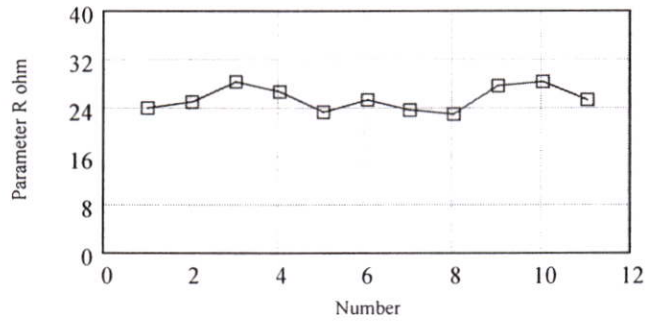
$$L = 40\text{mH}$$

คำนวณหาค่า C

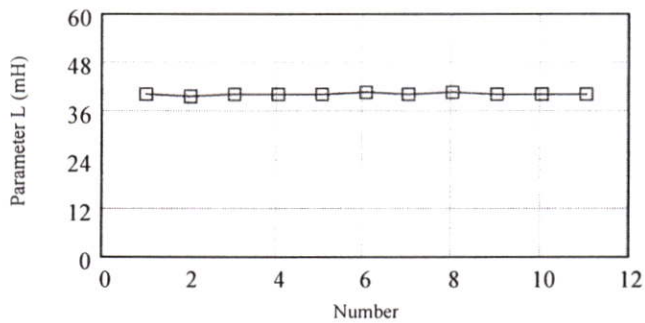
$$C = \frac{(2\pi f_H - 2\pi f_L)}{R(2\pi f_r)^2}$$

$$C = 7.72 \text{ pF}$$

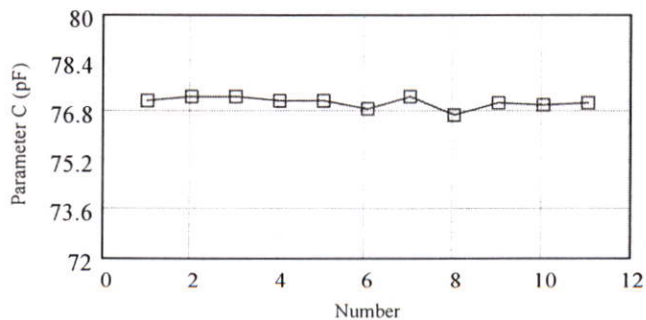
ทำการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้งแสดงตามรูปที่ 3.6 แล้วนำพารามิเตอร์ที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย โดยค่าเฉลี่ยที่ได้จะเป็นค่าที่จะนำไปใช้จริง



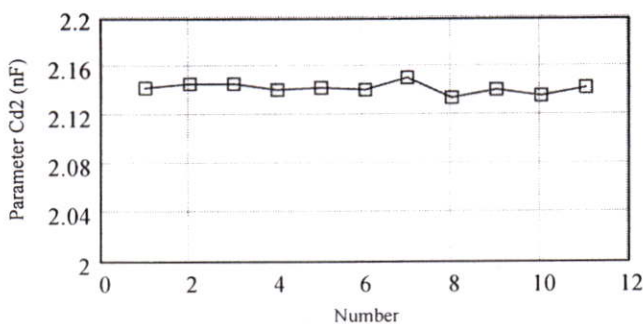
รูปที่ 6.7 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ R ด้านทางออก



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ L ด้านทางออก



รูปที่ 6.9 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C ด้านทางออก



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C_{d2} ด้านทางออก

จากรูปที่ 6.7 ถึงรูปที่ 6.10 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ด้านทางออกเฉลี่ยได้ดังนี้

$$R_{\text{ทางออก}} = 25.33\Omega$$

$$L_{\text{ทางออก}} = 39.86mH$$

$$C_{\text{ทางออก}} = 77.12pF$$

$$C_{d2} = 2.14 nF$$

6.2.3 ขั้นตอนที่ 3

สรุปผลการวัดพารามิเตอร์ ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ โดยใช้หลักการดังต่อไปนี้

- พารามิเตอร์ R , L และ C ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ได้จากการวัดในขั้นตอนที่ 1

$$R_{\text{ทางเข้า}} = 15.24\Omega$$

$$L_{\text{ทางเข้า}} = 26.93mH$$

$$C_{\text{ทางเข้า}} = 114.25pF$$

- พารามิเตอร์ C_{d1} และ C_{d2} ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ได้จากการวัดในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 ตามลำดับ

$$C_{d1} = 1.12nF$$

$$C_{d2} = 2.14nF$$

- พารามิเตอร์ N ได้จากการวัดในครั้งที่ 2 โดยสมการ (3.7), (3.8) และ (3.9) โดยมีค่าดังนี้

$$N = \sqrt{\frac{R_{\text{ทางออก}}}{R_{\text{ทางเข้า}}}} = 1.216$$

สรุปผลการวัดพารามิเตอร์ ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

$$R = 15.24\Omega$$

$$L = 26.93mH$$

$$C = 114.25pF$$

$$C_{d1} = 1.12nF$$

$$C_{d2} = 2.12nF$$

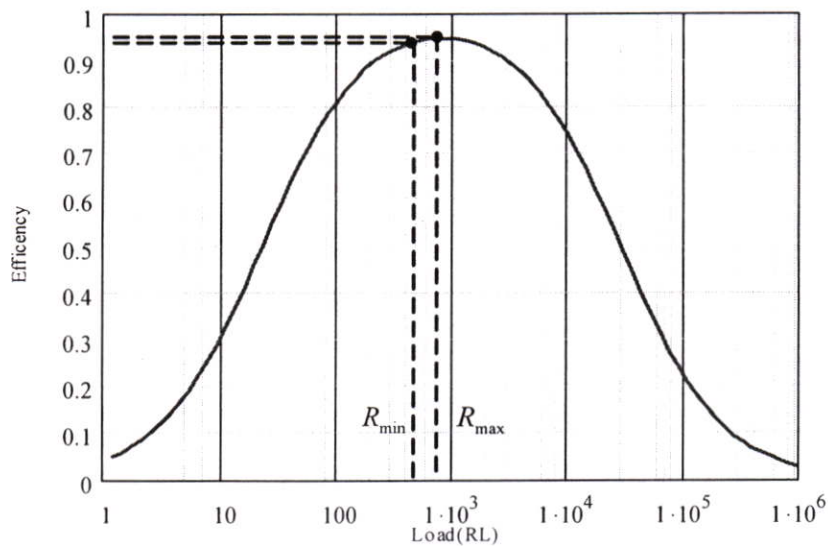
$$N = 1.216$$

6.3 การออกแบบวงจรภาคกำลัง

ในการออกแบบใช้เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์และพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดในหัวข้อที่แล้วนำมาใช้ในการออกแบบ การออกแบบมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

6.3.1 ขั้นตอนที่หนึ่งคำนวณหาค่าโหลดที่เหมาะสม

เพื่อให้เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ทำงานมีประสิทธิภาพสูงสุดจะต้องคำนวณหาค่าโหลดที่เหมาะสมตามสมการที่ (3.50) นำมาแสดงเป็นกราฟได้ตามรูปที่ 6.2

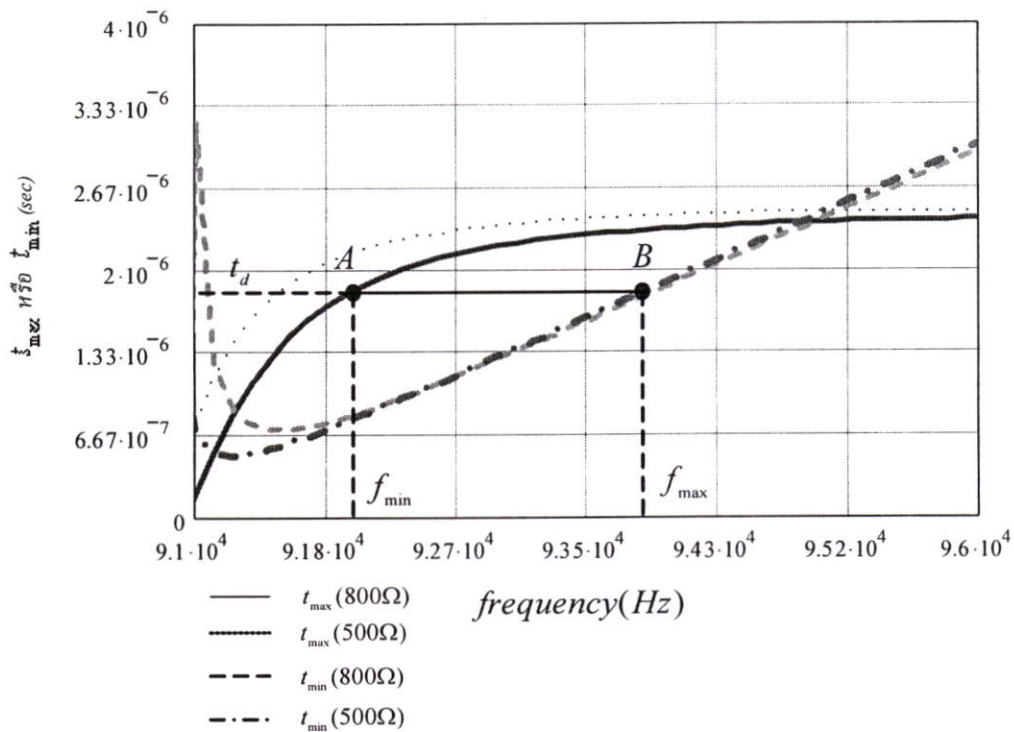


รูปที่ 6.11 กราฟแสดงโหลดที่เหมาะสม

กำหนดช่วงของโหลดที่เหมาะสมโดยกำหนดช่วงโหลดที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงกว่า 90% จากรูปที่ 6.11 กำหนดโหลดในช่วง $R_{min} = 500\Omega$ และ $R_{max} = 800\Omega$ โหลดที่ใช้คำนวณจะเป็นค่าของ R_{eq}

6.3.2 ขั้นตอนที่ 2 หาช่วงเวลา Dead-time

เพื่อให้สวิตช์ทำงานแบบ ZVS จะต้องหาช่วงเวลาที่น้อยที่สุด (t_{min}) และช่วงเวลาที่มากที่สุด (t_{max}) ในสมการที่ (4.15) และ (4.19) ตามลำดับ แล้วนำสมการมาแสดงเป็นกราฟโดยใช้ค่าโหลดตามขั้นตอนที่ 1 คือ $R_{min} = 500 \Omega$ และ $R_{max} = 800 \Omega$ ได้กราฟดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 กราฟการแสดง Dead-time

การหาช่วงเวลาที่น้อยที่สุด (t_{min}) และช่วงเวลาที่มากที่สุด (t_{max}) ของค่าโหลด $R_{min} = 500 \Omega$ และ $R_{max} = 800 \Omega$ จากรูปที่ 6.12 จะมีช่วงเวลา dead-time ทำให้เกิด ZVS คือช่วงเวลาที่อยู่ต่ำกว่า t_{max} และสูงกว่า t_{min} โดยจะเลือกช่วงเวลา dead-time ที่อยู่ด้านในสุดเพื่อให้ครอบคลุมค่าโหลดได้ทั้งหมดจากการกำหนดค่า dead-time จะทำให้ได้ค่า f_{min} และ f_{max} ตามมา จากรูปสามารถกำหนดค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$\text{Dead-time} = 1.8 \text{ us}$$

$$f_{min} = 91000 \text{ Hz}$$

$$f_{max} = 94000 \text{ Hz}$$

6.3.3 ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาช่วงแรงดันไฟฟ้า V_{DC} ที่เปลี่ยนแปลงได้

จากขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สองได้ค่าช่วงโหลดที่ $R_{min} = 500 \Omega$ และ $R_{max} = 800 \Omega$ ค่า Deat-time = 1.8 us ค่าความถี่ต่ำสุด ($f_{min} = 91000\text{Hz}$) และ ค่าความถี่สูงสุด ($f_{max} = 94000\text{Hz}$) จาก

ค่าดังกล่าวนำมาวิเคราะห์การขยายระหว่าง V_{DC} กับ V_{out} โดยให้ V_{out} คงที่ เพื่อหาช่วงการเปลี่ยนแปลงของ V_{DC}

จากสมการ (6.4) สามารถวิเคราะห์ช่วงแรงดันไฟฟ้า V_{DC} ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้สูงสุด และต่ำสุดที่ยังทำให้เกิด ZVS และยังควบคุมแรงดันทางไฟฟ้า V_{out} ได้

สมการค่าหลักมูลของ V_m ซึ่ง V_m มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู

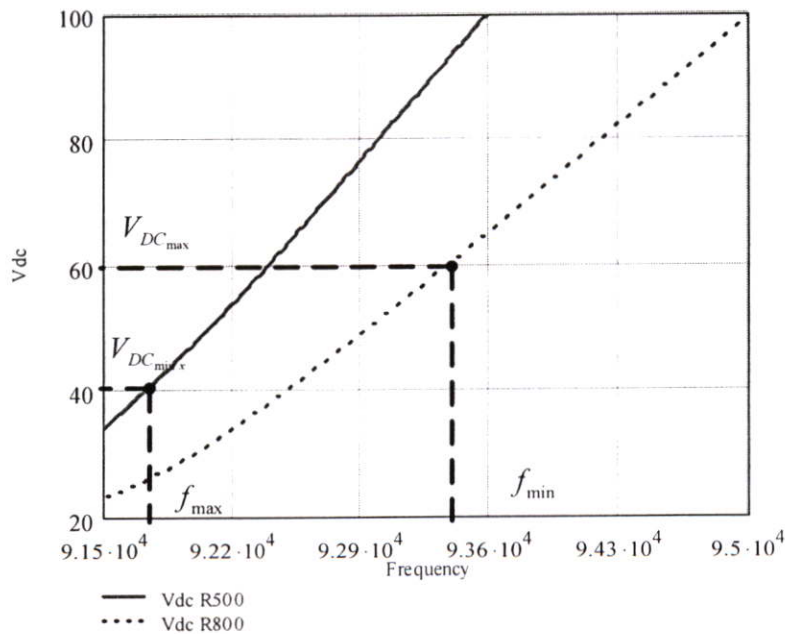
$$V_m = V_{DC} \frac{2 \sin(\pi_d f_s)}{\pi \pi_d f_s} \quad (6.1)$$

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{DC} และ V_{out}

$$V_{out} = V_m |A_V| \quad (6.2)$$

$$V_{out} = V_{DC} \frac{2 \sin(\pi_d f_s)}{\pi \pi_d f_s} |A_V| \quad (6.3)$$

$$V_{DC} = V_{out} \frac{\pi^2 t_d f_s}{2 \sin(\pi_d f_s) |A_V|} \quad (6.4)$$



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงอัตราขยายระหว่าง V_{DC} และ V_{out}

จากรูปที่ 6.13 ในช่วงความถี่ f_{min} และ f_{max} จะได้ช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ด้านทางเข้า (V_{DC}) ต่ำสุด และสูงสุดที่ยังทำให้เกิดสวิตช์ทำงานแบบ ZVS และยังควบคุมแรงดันทางไฟฟ้า V_{out} ได้

$$V_{DC} \text{ ต่ำสุด} = 40\text{V}$$

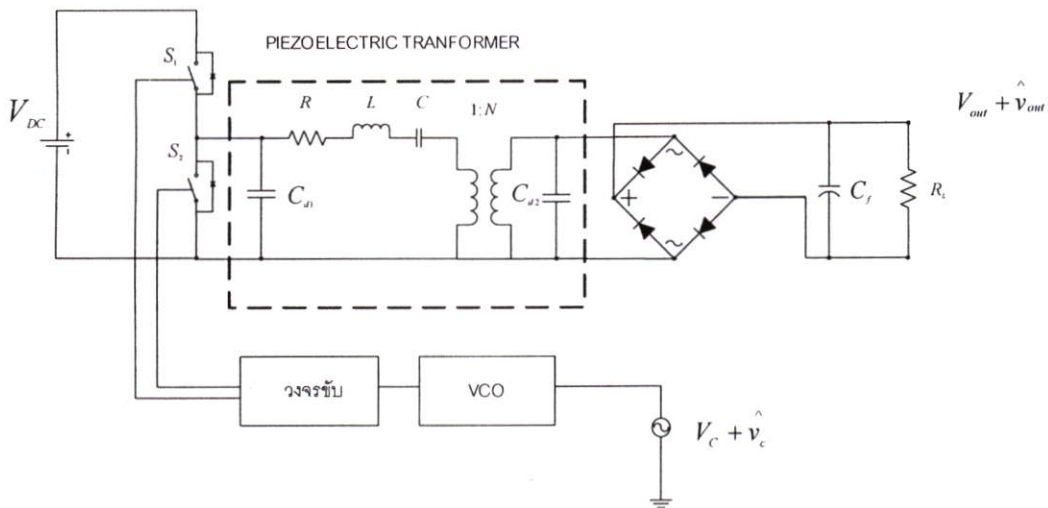
$$V_{DC} \text{ สูงสุด} = 60\text{V}$$

6.4 การออกแบบวงจรควบคุม

การออกแบบวงจรควบคุมเพื่อให้มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกตามต้องการ และมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้วงจรควบคุมแบบ 3 - Pole 2 - Zero ขั้นตอนการออกแบบแบ่งเป็นสองขั้นตอนดังนี้

6.4.1 ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณขนาดเล็กของภาคกำลัง

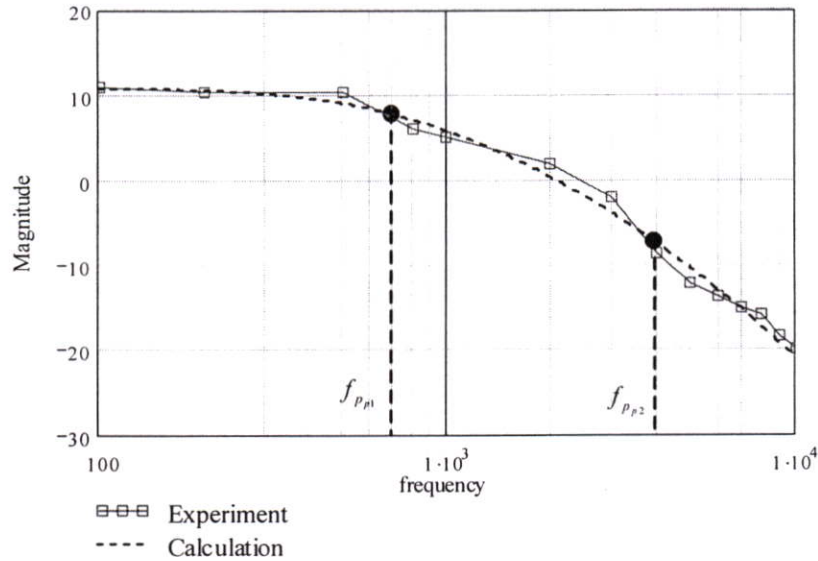
หลังจากที่ออกแบบวงจรภาคกำลังโดยใช้พารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ได้จากการวัดและค่า $R_{Load} = 500 \Omega$ Deat-time = 1.8 us, ค่าความถี่ในการสวิตช์ $f_s = 92100\text{Hz}$, $C_f = 10 \mu\text{F}$, $V_{in} = 50 \text{V}$ นำวงจรดังกล่าวมาทำการจำลองแบบในโปรแกรมตามรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 วงจรจำลองสัญญาณขนาดเล็กของฟังก์ชันถ่ายโอนเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม

โดยที่เปลี่ยนความถี่ของ \hat{v}_c ไป ดังนี้ 100 Hz , 200 Hz, 500 Hz, 800 Hz , 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz, 4 kHz, 5 kHz, 6 kHz, 7 kHz, 8 kHz, 9 kHz, 10 kHz, แล้วนำผลการจำลองแบบของ \hat{v}_c และ \hat{v}_{out}

ที่แต่ละความถี่มาหาขนาดอัตราขยายระหว่าง \hat{v}_{out} และ \hat{v}_c จากนั้นนำค่าอัตราขยายมาแสดงเป็นกราฟที่ความถี่ดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 กราฟแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรกำลังแบบ Small Signal และการทำ Curve Fitting

จากข้อมูลที่ได้ทำ Curve Fitting ได้ตำแหน่งของ Pole ตัวที่หนึ่งที่ความถี่ 700Hz , Pole ตัวที่สองที่ความถี่ 4 kHz และอัตราขยาย 3.58 ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของอัตราขยาย V_{out} และ V_c ดังนี้

$$G_p(S) = \frac{3.548}{\left(1 + \frac{S}{1257}\right)\left(1 + \frac{S}{6283}\right)}$$

6.4.2 ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบวงจรควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดได้จากผลคูณระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอน ของวงจรกำลังกับฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมและฟังก์ชันถ่ายโอนของ Optocoupler, $[(G_p(s)G_c(s)H(s))]$ สามารถออกแบบวงจรควบคุมมีดังต่อไปนี้

1. กำหนดความถี่ Crossover frequency ที่ 3 kHz ค่าอัตราขยายที่ความถี่ Crossover frequency ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมที่ต้องการ 15 dB ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอัตราขยายที่ความถี่ Crossover frequency ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกำลังแต่เครื่องหมายตรงกันข้าม

2. วาง Pole ของวงจรถบคุมที่จุดกำเนิดหนึ่งตัว เพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถบคุมมีค่ามาก ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่ามากเช่นกัน

3. วาง Zero ตัวที่หนึ่งของวงจรถบคุมที่ความถี่ 0.4 kHz เพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถบคุมมี Slope เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมมีค่าคงที่

4. วาง Zero ตัวที่สองของวงจรถบคุมที่ความถี่ 0.6 kHz เพื่อให้ฟังก์ชันถ่ายโอนรวมมีความ Slope เท่ากับศูนย์ส่งผลให้ Crossover frequency เลื่อนไกลออกไป

5. วาง Zero ตัวที่สองของวงจรถบคุมที่ความถี่ 6 kHz เพื่อให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถบคุมมี Slope เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมลดลงเข้าสู่ Crossover frequency

6. วาง Pole ตัวที่สามของวงจรถบคุมที่ความถี่ 7 kHz เพื่อให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถบคุมมี Slope เท่ากับ -20 dB/Decade ทำให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่าความชัน -40 dB/Decade ส่งผลให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ความถี่สูงมีการลดทอนมาก

7. คำนวณค่าอัตราขยายที่ความถี่ของ Pole และ Zero ทั้งหมดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถบคุมโดยใช้ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4

$$K_C = 10^{\frac{|G_p(f_{cv})|}{20}} \frac{f_{cv}}{K_H} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{cv}}{f_{p1}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{cv}}{f_{p2}}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{cv}}{f_{z1}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{cv}}{f_{z2}}\right)^2}}$$

โดยที่

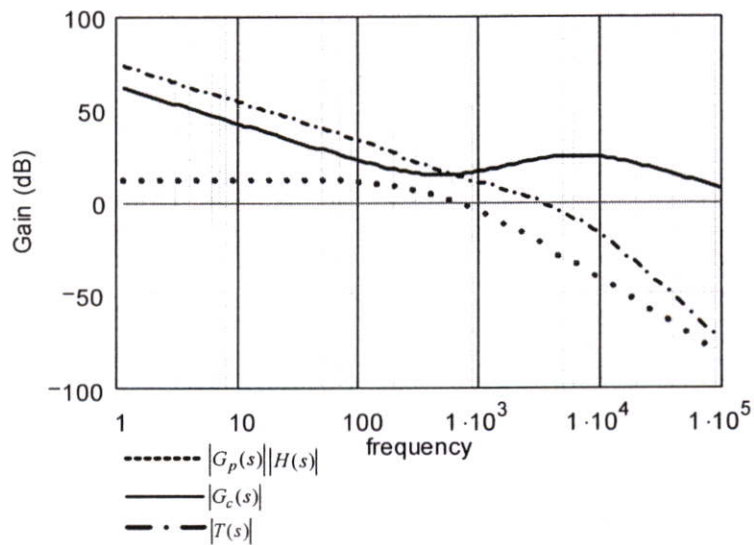
$$K_H = H(S) = \frac{5}{20} = 0.25$$

$$|G_p(f_{cv})| = 15 \text{ dB}$$

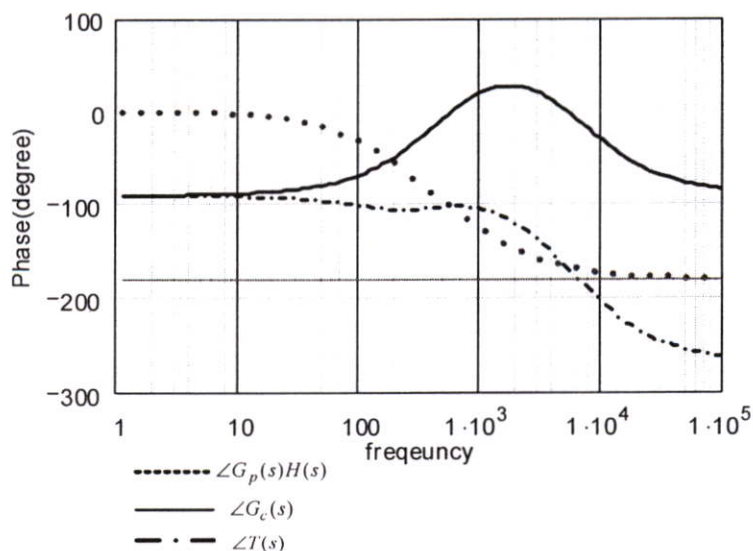
จะได้

$$K_C = 8145$$

นำฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรถวลุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถวลุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถวลุม $G_c(s)$ มาแสดงกราฟ ของขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามรูปที่ 6.16 และแสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามรูปที่ 6.17 ได้ Phase Margin และ Gain Margin มีค่าเป็น 47° และ 11 dB ตามลำดับ



รูปที่ 6.16 กราฟแสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรถวลุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถวลุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถวลุม $G_c(s)$

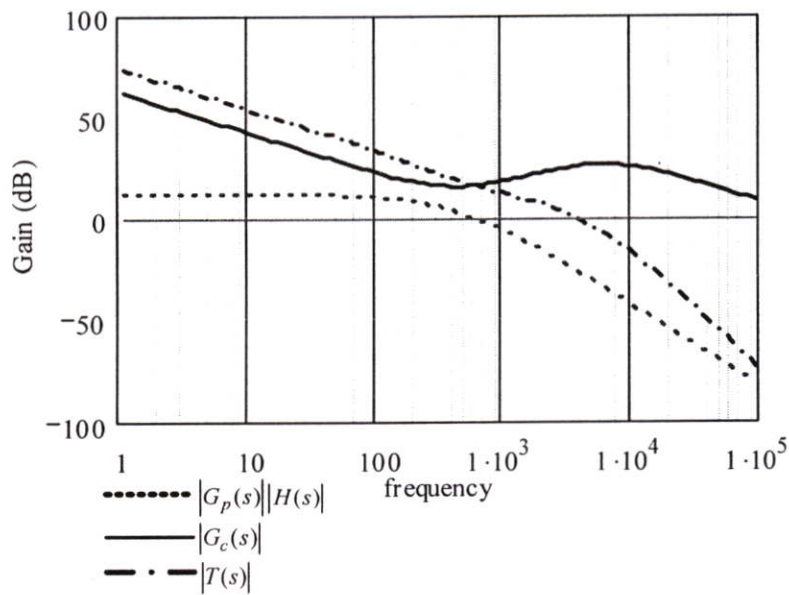


รูปที่ 6.17 กราฟแสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรถวลุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถวลุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถวลุม $G_c(s)$

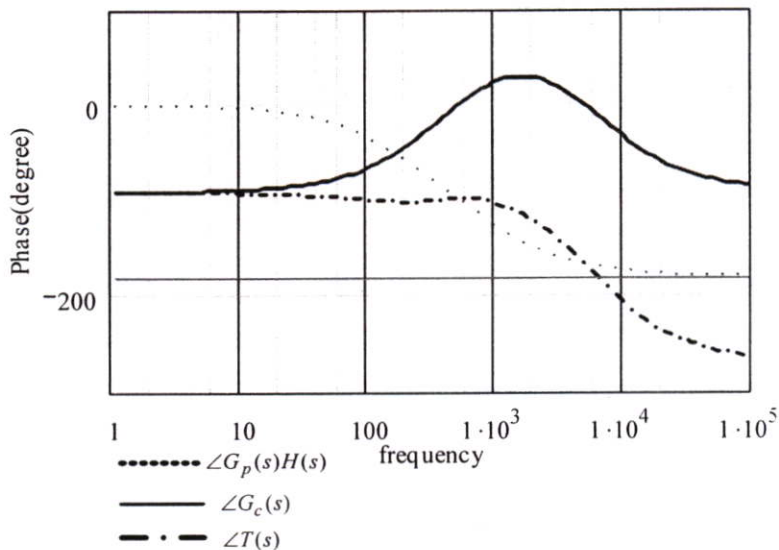
8. คำนวณค่าอุปกรณ์ของวงจรควบคุมที่ใช้ได้แก่ $R_1=1.2 \text{ k}\Omega$, $R_2=130 \text{ k}\Omega$, $R_3=30 \text{ k}\Omega$, $C_1=220 \text{ nF}$, $C_2=15 \text{ nF}$, และ $C_3=820 \text{ pF}$ นำค่าอุปกรณ์ของวงจรควบคุมไปแทนในสมการที่ (5.8) ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมดังสมการดังนี้

$$\frac{\hat{v}_c(s)}{\hat{v}_o(s)} = 8384 \frac{\left(1 + \frac{s}{2222}\right) \left(1 + \frac{s}{3418}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{3497}\right) \left(1 + \frac{s}{4287}\right)}$$

นำค่าอุปกรณ์ที่คำนวณได้มาทดสอบโดยแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรควบคุม, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถูกคุมที่ได้จากค่าอุปกรณ์ มาแสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามรูปที่ 6.18 และแสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามรูปที่ 6.19 ได้ Phase Margin และ Gain Margin มีค่าเป็น 45° และ 8 dB ตามลำดับ



รูปที่ 6.18 กราฟแสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรควบคุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถูกคุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถูกคุม $G_c(s)$ จากการคำนวณ



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรถวล, $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถวล $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถวล $G_c(s)$ จากการคำนวณ

6.5 สรุป

การออกแบบเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์วงจรต้นแบบออกแบบให้วงจรมีการทำงานที่ประสิทธิภาพสูง คือออกแบบให้ทำงานที่โหลดเหมาะสม และ ให้สวิตช์ทำงานแบบ ZVS ในการออกแบบวงจรถวลสำหรับวงจรเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบในส่วนของภาคกำลังฟังก์ชันถ่ายโอนมี Pole 2 ตัว เลือกใช้วงจรถวลแบบ 3 – Pole 2 – Zero วงจรถวลชนิดนี้จะส่งผลให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีอัตราขยายที่ความถี่ต่ำสูงและ ความถี่ Crossover frequency อยู่ที่ตำแหน่งความถี่สูง

บทที่ 7

การทดลองและผลการทดลอง

7.1 บทนำ

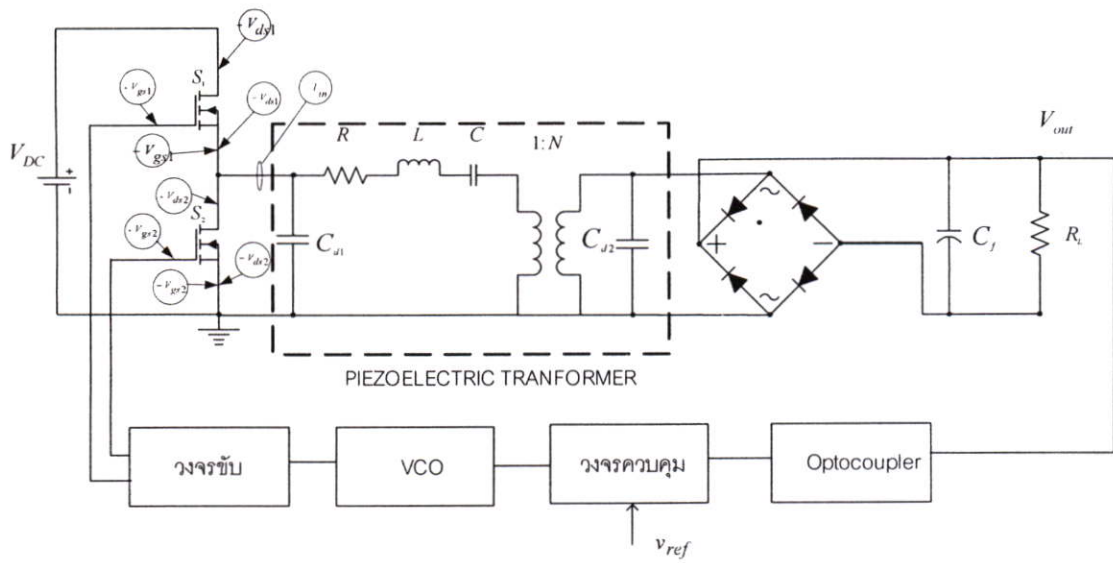
วงจรเบี่ยงโซอิลิกทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบที่ออกแบบในบทที่ผ่านมา ถูกนำมาทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการทำงานในรูปแบบที่ออกแบบไว้ การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกและการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ทางออกเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ซึ่งวิธีการทดลองและผลการทดลองที่ได้จะนำเสนอต่อไปในบทนี้ โดยอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ได้แก่

1. Digital Oscilloscope ของ Tektronix รุ่น TDS754D
2. Oscilloscope ของ Yokogawa รุ่น DL1520
3. High-Voltage Differential Probe ของ Tektronix รุ่น P5205
4. Current Probe ของ Tektronix รุ่น TCP202 (15A Max)
5. Digital Multimeter FLUKE179
6. Autotransformer ของ ISKRA รุ่น HSN0103K

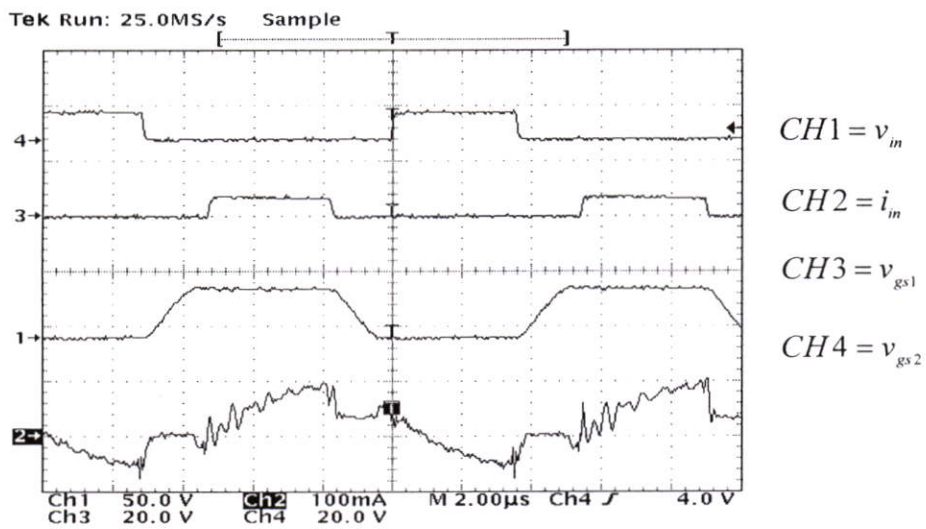
7.2 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรเบี่ยงโซอิลิกทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ

หัวข้อนี้นำเสนอผลการวัดคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรเบี่ยงโซอิลิกทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ เพื่อยืนยันว่าวงจรมีการทำงานในโหมดการทำงานที่ออกแบบไว้ และสวิตซ์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตซ์ เป็นศูนย์ (ZVS) โดยตำแหน่งการวัดคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 6.1

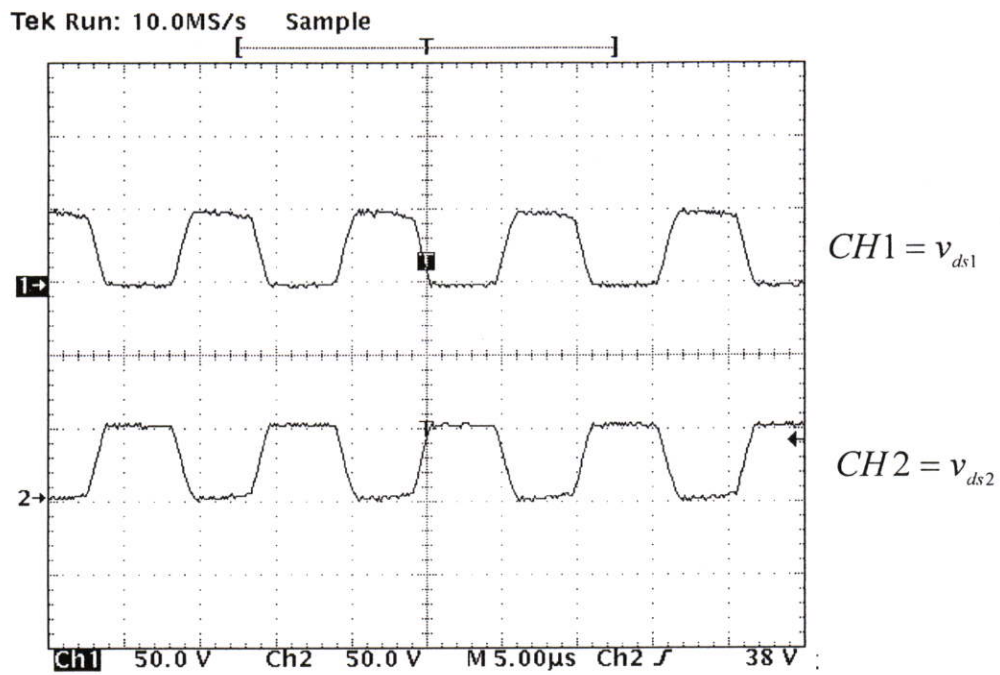
รูปที่ 7.2 แสดงคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจับมอสเฟต (V_{gs1}) ที่ช่องสัญญาณ CH4 คลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจับมอสเฟต (V_{gs2}) ที่ช่องสัญญาณ CH3 คลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจับมอสเฟต (V_{ds1}) ที่ช่องสัญญาณ CH1 และคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้า I_m ที่ช่องสัญญาณ CH2 รูปที่ 7.3 แสดงคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอสเฟต (V_{ds1}) ที่ช่องสัญญาณ CH1 และคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอสเฟต (V_{ds2}) ที่ช่องสัญญาณ CH2 รูปที่ 7.4 แสดงคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอสเฟต (V_{ds2}) ช่องสัญญาณ CH1 และคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ I_m ที่ช่องสัญญาณ CH2 จากรูปคลื่นสัญญาณวงจรมีการทำงานในโหมดที่ออกแบบไว้ และมีการทำงานที่สวิตซ์ทำงานแบบ ZVS



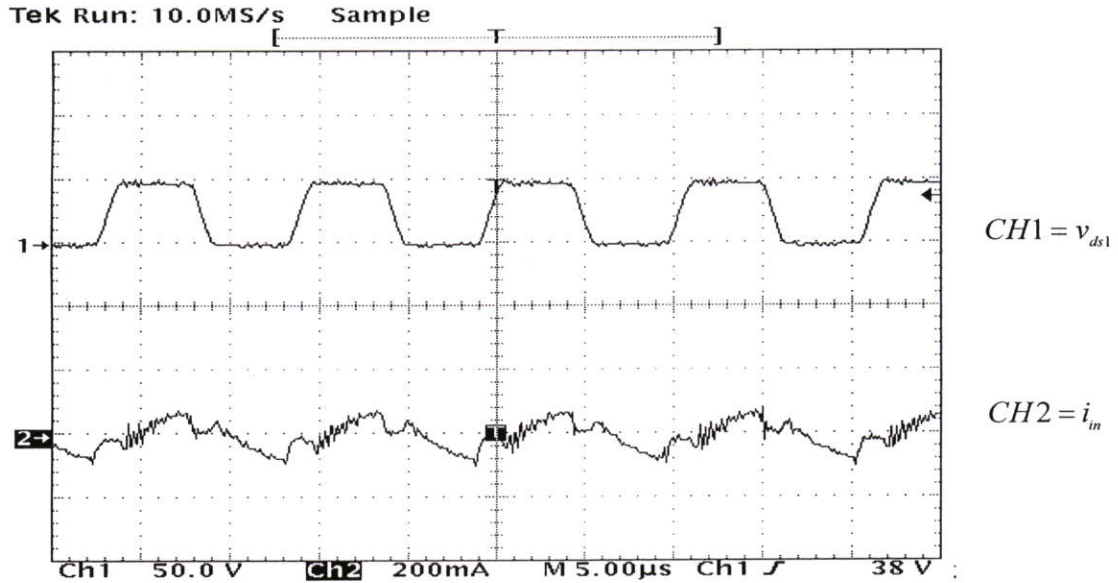
รูปที่ 7.1 ตำแหน่งของการวัดคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ



รูปที่ 7.2 คลื่นสัญญาณ v_{gs1} , v_{gs2} , v_{ds2} และ i_{in} ที่โหลด 500Ω , $V_{DC} = 50V$ และ $V_{out} = 20V$ ของวงจรจรวจกรคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ



รูปที่ 7.3 คลื่นสัญญาณ v_{ds2} และ v_{ds1} ที่โหลด 500Ω , $V_{DC} = 50V$ และ $V_{out} = 20V$ ของวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ



รูปที่ 7.4 คลื่นสัญญาณ v_{ds2} และ i_{in} ที่โหลด 500Ω , $V_{DC} = 50V$ และ $V_{out} = 20V$ ของวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ

7.3 การทดสอบวัดค่าประสิทธิภาพของวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

ขั้นตอนการทดลอง

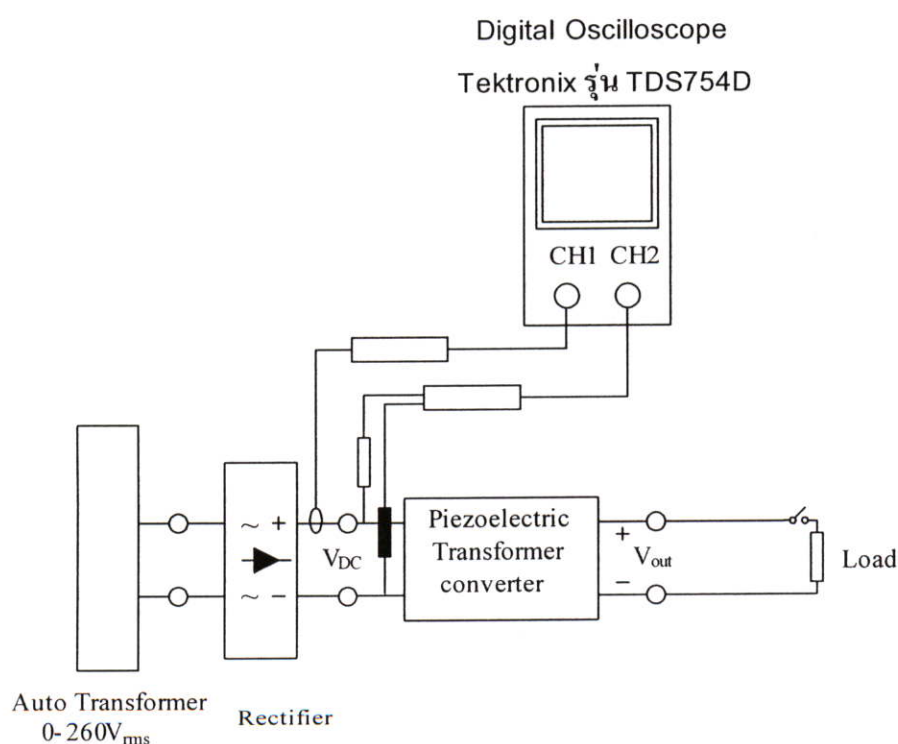
1. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 7.5 เพื่อวัดกำลังไฟฟ้าที่ทางเข้า (P_{in})
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า 50V ได้แรงดันไฟฟ้าที่ทางออก 20V ให้กับวงจรภาคกำลัง
3. บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่ทางเข้าที่ค่าความต้านทาน 500Ω, 600Ω, 700Ω, และ 800Ω

ตามลำดับ

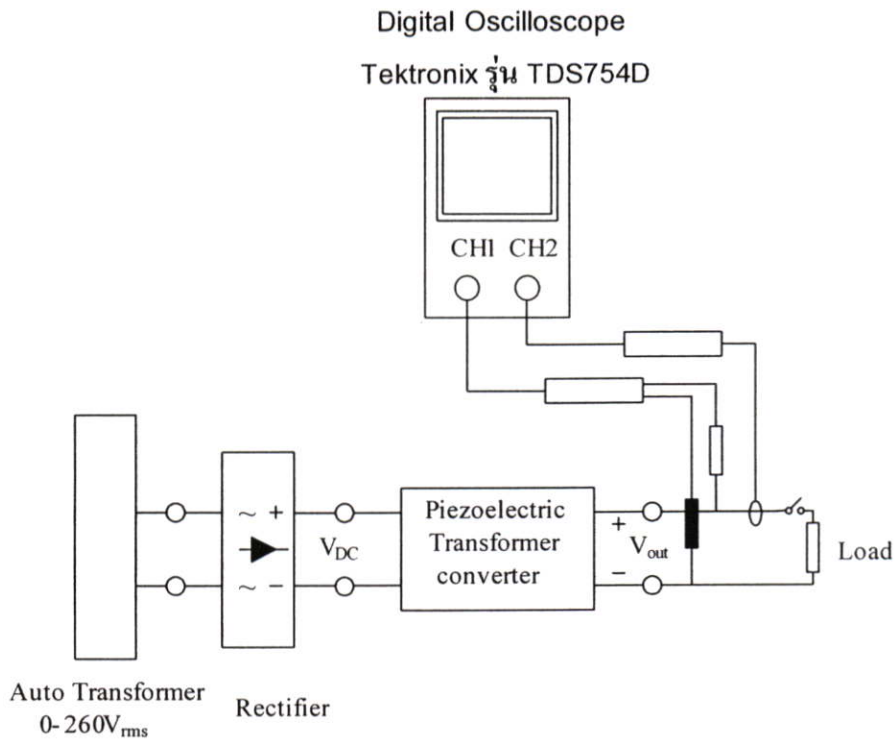
4. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 7.6 เพื่อวัดกำลังไฟฟ้าที่ทางออก (P_{out})
5. บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่ทางออกที่ค่าความต้านทาน 500Ω, 600Ω, 700Ω, และ 800Ω

ตามลำดับ

5. นำค่ากำลังไฟฟ้าที่ทางออกและทางเข้าที่ค่าความต้านทาน 500Ω, 600Ω, 700Ω, และ 800Ω มาคำนวณหาประสิทธิภาพ (η)



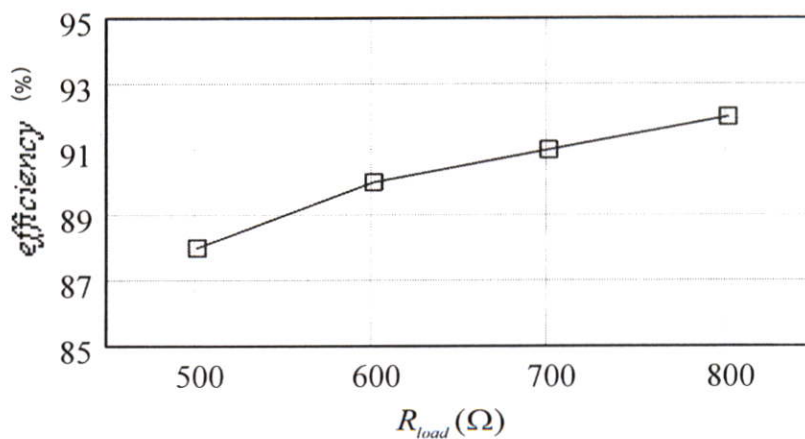
รูปที่ 7.5 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ทางเข้า



รูปที่ 7.6 การจับชุดทดลองสำหรับทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ทางออก

ผลการทดลอง

วงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบมีการทำงานที่ประสิทธิภาพสูงขึ้นถ้าโหลดมีขนาดที่มากขึ้นแสดงตามรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 ผลการวัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้น

แบบ

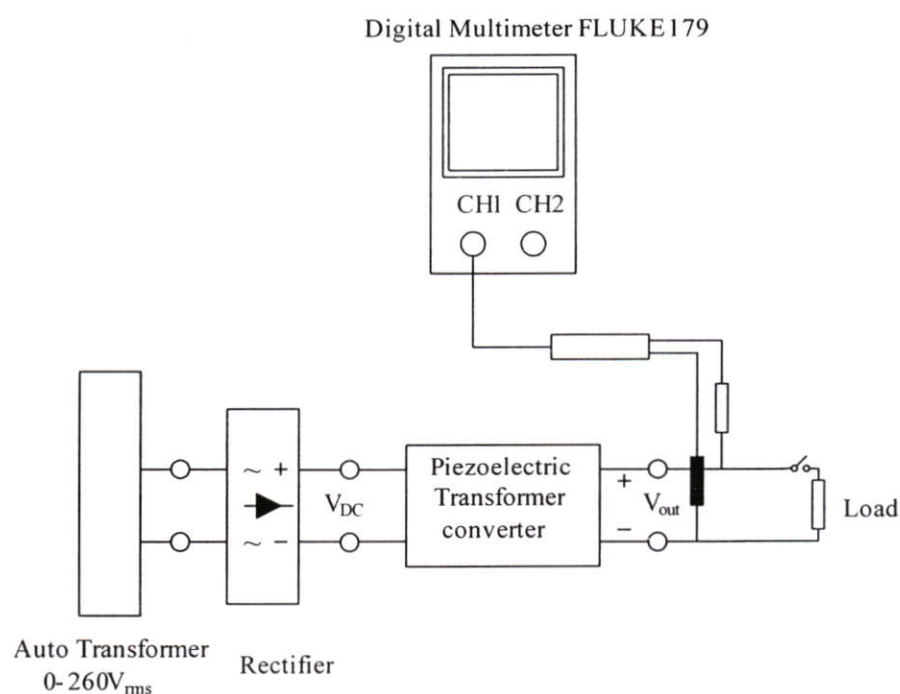
7.4 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเพียโซอิเล็กทริกคอนเวอร์เตอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ

ขั้นตอนการทดลอง

1. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 7.7
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า (V_{DC}) 40V ให้กับวงจรภาคกำลัง
3. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกที่ค่าความต้านทาน 500 Ω , 600 Ω และ 800 Ω ตามลำดับ

ลำดับ

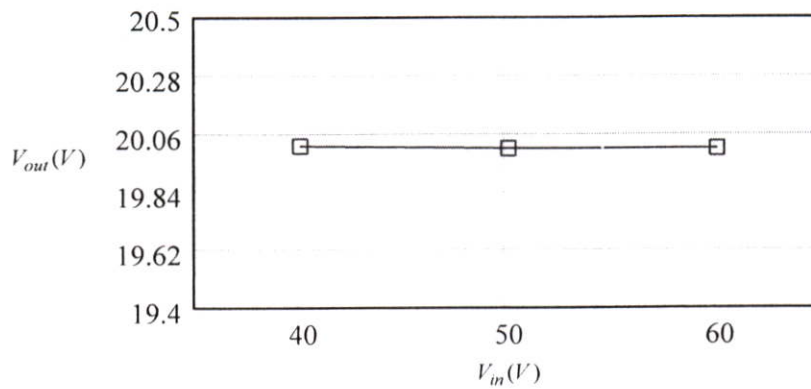
4. ทำการทดลองตามข้อ 2 และ 3 โดยเปลี่ยนการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าเป็น 50V และ 60V ตามลำดับ



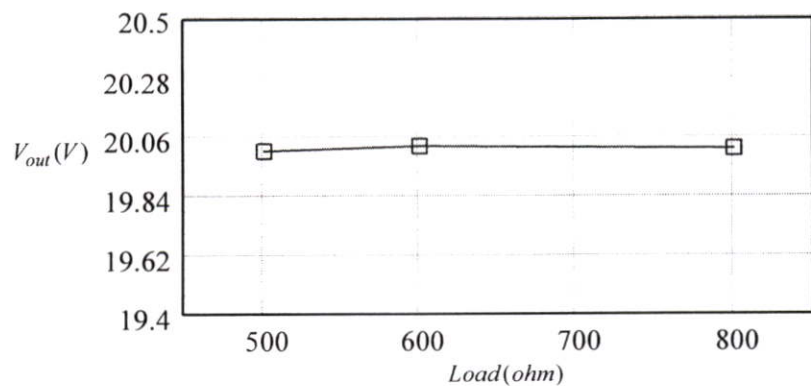
รูปที่ 7.8 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านทางออก

ผลการทดลอง

วงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานและมีผลการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อแรงดันทางไฟฟ้าที่ทางเข้าเปลี่ยนแปลงและเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงแสดงตามรูปที่ 7.9 และรูปที่ 7.10 ตามลำดับ



รูปที่ 7.9 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 7.10 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อโหลดที่ทางออกเปลี่ยนแปลง

จากผลการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกพบว่าวงจรเบี่ยโซอิล็กทริกทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด $G_p(s)G_c(s)H(s)$ ในรูปที่ (6.18) และ (6.19) ตามลำดับ นอกจากนี้วงจรยังมีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกที่ดีเนื่องจากการออกแบบให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำมีค่าสูง

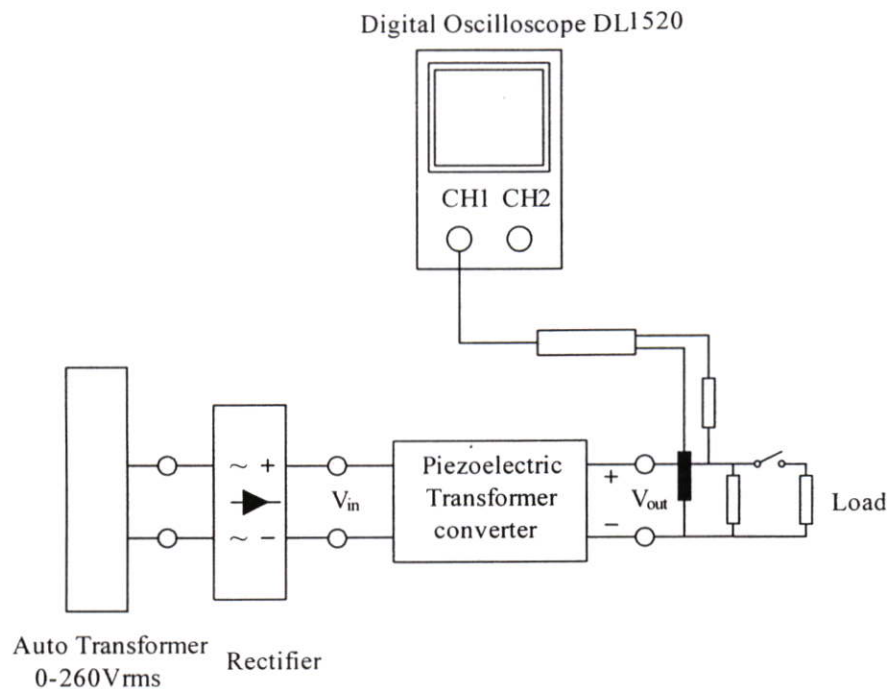
7.5 การทดสอบการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเบี่ยโซอิล็กทริกทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ

ขั้นตอนการทดลอง

1. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 7.8
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า (V_{DC}) 50V ให้กับวงจรเบี่ยโซอิล็กทริกทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ

3. บันทึกสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อค่าความต้านทานของโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจากค่าความต้านทาน 800Ω ไปเป็น 500Ω

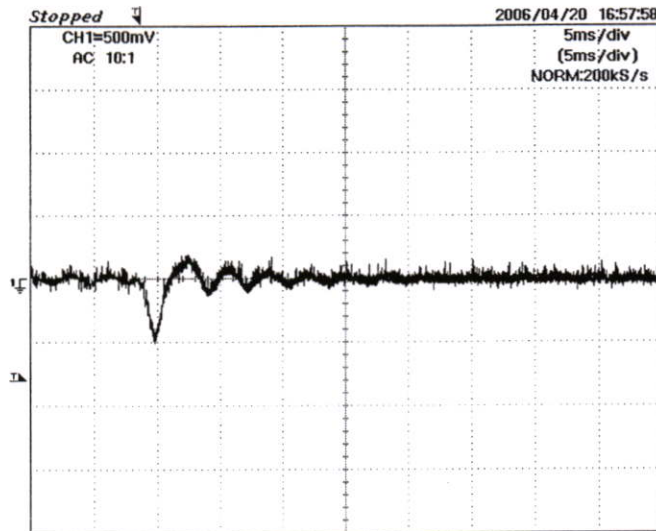
4. บันทึกสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อค่าความต้านทานของโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจากค่าความต้านทาน 500Ω ไปเป็น 800Ω



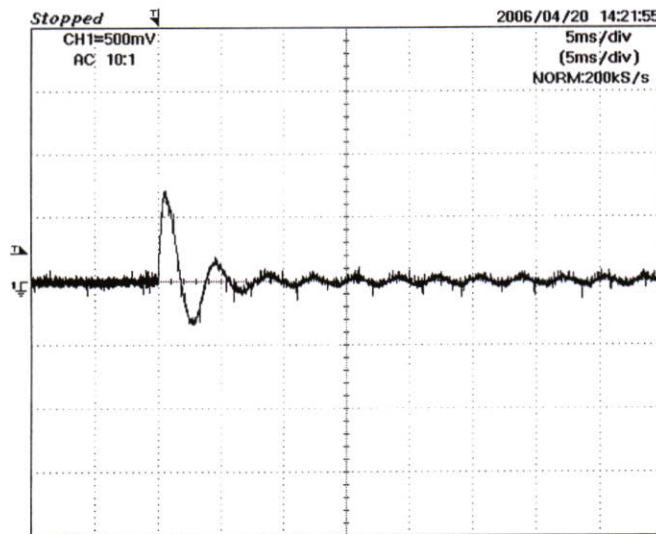
รูปที่ 7.11 การจับชุดทดลองสำหรับทดสอบการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออก

ผลการทดลอง

ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบเมื่อค่าความต้านทานของโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจากค่าความต้านทาน 800Ω ไปเป็น 500Ω และจากค่าความต้านทาน 500Ω ไปเป็น 800Ω แสดงในรูปที่ 7.12 และ 7.13 ตามลำดับ



รูปที่ 7.12 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเบี๊ยโซอิล็กทริกทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจาก 800Ω ไปเป็น 500Ω



รูปที่ 7.13 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเบี๊ยโซอิล็กทริกทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจาก 500Ω ไปเป็น 800Ω

จากผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกพบว่าวงจรเบี๊ยโซอิล็กทริกทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ มีผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเป็นที่น่าพึงพอใจ โดยมีระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling time) 15 ms และ 10 ms ตามลำดับ โดยวงจรเบี๊ยโซอิล็กทริก ทรานฟอ์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบมีการออกแบบความถี่ Crossover frequency ไว้ที่ 3 kHz ($f_c = 3 \text{ kHz}$)

บทที่ 8

วิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์เรื่องได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ การนำเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์มาทดแทนแมกเนติกทรานฟอเมอร์ในวงจร DC/DC คอนเวอร์เตอร์ ทั้งนี้เพราะเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการเช่น มีมิติของความสูงที่บางมาก, ทำงานในย่านความถี่สูง และไม่มีสนามแม่เหล็กรบกวนขณะทำงาน การศึกษาได้แบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

ศึกษาการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์, งานวิจัยนี้ศึกษาที่จะอธิบายการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า โดยไม่ได้ศึกษาจากสมการทาง Physics โดยตรง ทั้งนี้เพราะสมการทาง Physics มีความยุ่งยากมากแต่สามารถอธิบายได้ถึงพื้นฐานการทำงาน การอธิบายด้วยวงจรสมมูลจะง่ายกว่า การศึกษาทั้งสองแบบก็มีข้อจำกัดที่สำคัญคือเนื่องจากผู้ผลิตเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์มีอยู่จำนวนจำกัด การให้ข้อมูลของอุปกรณ์ไม่เป็นมาตรฐาน บางบริษัทให้เป็นข้อมูลทาง Physics บางบริษัทให้เป็นข้อมูลของวงจรสมมูลที่ได้จากการวัดที่มีเงื่อนไขการวัดกำหนดอยู่ ดังนั้นถ้าได้ข้อมูลทาง Physics ก็มีปัญหาในการอธิบายการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ หรือถ้าได้ข้อมูลแบบวงจรสมมูลก็มีเงื่อนไขการวัดบังคับอยู่ ดังนั้นการศึกษาด้วยวงจรสมมูลจึงมีความแม่นยำต่อการทำงานน้อยกว่า ในเรื่องการศึกษาการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ในระยะต่อไป จึงควรที่จะศึกษาแนวทาง Physics ด้วย

ศึกษาการวัดพารามิเตอร์ของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ ได้วัดโดยใช้เทคนิคที่เหมาะสมกับเครื่องมือวัดที่มีอยู่ โดยใช้เทคนิคคล้ายกับการวัดพารามิเตอร์ของทรานฟอเมอร์ทั่วไป ซึ่งต้องมีเงื่อนไขในการวัดบางอย่าง แต่เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์มีค่าของพารามิเตอร์ละเอียดมากดังนั้นการวัดแบบดังกล่าวอาจให้ผลไม่ถูกต้องนัก ซึ่งสามารถแก้ไขได้ถ้ามีเครื่องมือวัดที่วัดค่าของพารามิเตอร์ภายในเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ได้โดยตรง

ศึกษาวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ ZVS เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์สามารถทำงานที่ความถี่สูง ดังนั้นจะมีปัญหา Switching Loss งานวิจัยนี้จึงใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานแบบ ZVS เพื่อลด Switching Loss ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปการทำให้สวิตช์ทำงานแบบ ZVS ต้องมีอุปกรณ์ L และ C ประกอบอยู่ในงานวิจัยได้หลีกเลี่ยงที่จะใช้ L และ C ภายนอก โดยได้สังเกตว่าในช่วงความถี่สูงกว่าความถี่รีโซแนนซ์ของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ คุณสมบัติทางด้านเข้ามิลักษณะเป็น Inductance ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ทางเข้าตามหลังแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการของ ZVS ทำให้เทคนิค ZVS ใช้ได้กับเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์เมื่อเลือกความถี่ทำงานสูง

กว่าความถี่รีโซแนนท์ และสามารถออกแบบการทำงานโดยใช้ L และ C ภายในของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์เพื่อประกอบการทำงานแบบ ผลการทดลองที่ได้ให้ประสิทธิภาพ $\approx 92\%$

ศึกษาการควบคุมและวงจรถวลุม ได้ใช้เทคนิคการออกแบบระบบควบคุม โดยใช้เทคนิคของ Bode และใช้วงจรถวลุมแบบ 3 – Pole 2 –Zero ซึ่งผลการทดลองที่ได้ทั้งแบบ Static และ แบบ Dynamic ให้ผลที่ดีกล่าวคือ ผลการทดลองแบบ Static ทั้ง Load Regulation และ Line Regulation ให้ผลการทดลองที่ดีมาก ผลการทดลองแบบ Dynamic เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่โหลดอย่างทันทีทันใดทั้งเพิ่ม โหลดหรือลด โหลด การตอบสนองของระบบเร็วมากน้อยกว่า 2.5 ms

ปัญหาหลักของงานวิจัยนี้คือ เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ซึ่งจัดหาซื้อได้ยากและที่มีขายจะเป็นลักษณะ ผลิตตามใบสั่งและค่าพารามิเตอร์ภายใน ไม่ประกันว่าได้ตรงตามที่สั่งหรือไม่ ต่อมาจึงได้ให้ MTEC ช่วยในการผลิตแต่ก็มีปัญหาเช่นกันว่า ไม่ทราบจุดทำงานที่ถูกอยู่ที่ไหนทำให้ เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์เสียหายบ่อย แต่อย่างไรก็ตาม ได้มีความร่วมมือกับนักวิจัยของ MTEC ที่จะร่วมกันพัฒนาต่อไปเพื่อให้ได้ผลการประยุกต์ใช้งานเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ได้มากที่สุด

บรรณานุกรม

- [1] <http://www.americanpiezo.com>
- [2] นายมนทล นาวงษ์, “การศึกษาเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์สำหรับการประยุกต์ใช้งานในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ชิ่ง”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [3] Weixing Huang, “**Design of a Radial Mode Piezoelectric Transformer for a Charge Pump Electronic Ballast with High Power Factor and Zero Voltage Switching**”, Master of Science in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [4] Lin, R.L. et. al. , “**Piezoelectric Transformer Characterization and Application of Electronic Ballast**”, Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [5] Lin, C., “**Design and Analysis of Piezoelectric Transformer Converters**”, Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [6] R. Holland and E. P. Eernisse, “**Accurate measurement of coefficients in a ferroelectric ceramic**”, IEEE Trans. Sonic and Ultrasonics, Vol. SU-14, No. 4, pp. 173-181, Oct.1969.
- [7] Y. Tsuzuki and M. Toki, “**Precise determination of equivalent circuit parameters of quartz crystal resonators**”, Proc. of IEEE, pp. 1249-1250, Aug. 1976.
- [8] M. Toki, Y. Tsuzuki, and O. Kawano, “**A new equivalent circuit for piezoelectric disk resonators**” Proc. of IEEE, Vol. 68, No. 8, pp. 1032-1033, Aug. 1980.
- [9] E. Hanfner, “**The piezoelectric crystal unit -- definition and methods of measurement**” Proc. of IEEE, Vol. 57, No. 2, pp. 179-201, Feb. 1969.
- [10] T. Zaitzu, T. Inoue, O. Ohnishi and A. Iwamoto, “**2 - MHz Power Converter with Piezoelectric Ceramic Transformer**”, Proceedings of IEEE INTELEC.92, pp. 430-437.
- [11] Ray L. Lin, Fred C. Lee, Eric M. Bake and Dan Y. Chen, “**Inducter – less Piezoelectric Transformer Electronic Ballast for linear fluorescent lamp**”, Proceedings of IEEE INTELEC.92, pp. 664-669.

- [12] M. Sanz, P. Alou, A. Soto, RPrieto, J.A. Cobos and JUceda, “**Magnetic-less Converter based on Piezoelectric Transformers for step – down DC/DC and low power application**” Proceedings of IEEE INTELEC.92, pp. 615-621.
- [13] Svetlana Bronstein and Sam Ben-Yaakov, “**Design Considerations for Achieving ZVS in a Half Bridge Inverter that Drives a Piezoelectric Transformer with No Series Inductor**”, IEEE PESC’02, vol.02, pp. 585-590.
- [14] กัณฑ์ชกา กิตติพิริชช. “การออกแบบวงจรควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

**โปรแกรม MathCAD สำหรับการวิเคราะห์และการออกแบบ วงจรเป็ยโซ่อิเล็กทรอนิกส์
ทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์**

Programing Analysis Gain For Piezoelectric Trnsformers PT_01

$$m := 10^{-3} \quad n := 10^{-9} \quad p := 10^{-12} \quad k := 10^3$$

Parameters set

$$R := 15.24422 \quad L := 26.93489\text{m} \quad C := 114.258\text{p}$$

$$\text{Cd1} := 1.119211\text{n} \quad \text{Cd2} := 2.141935\text{n} \quad N := 1.216549539$$

Set Load

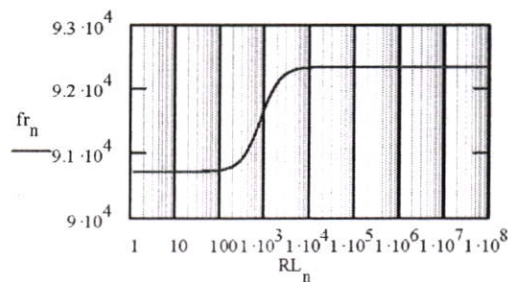
$$\text{RLmin} := 1 \quad \text{RLmax} := 100000\text{k} \quad \text{fmpt} := 100 \quad n := 1.. \text{fmpt}$$

$$\text{RL}_n := 10^{\frac{\log(\text{RLmax}) \cdot n}{\text{fmpt}}}$$

Resonant Frequency

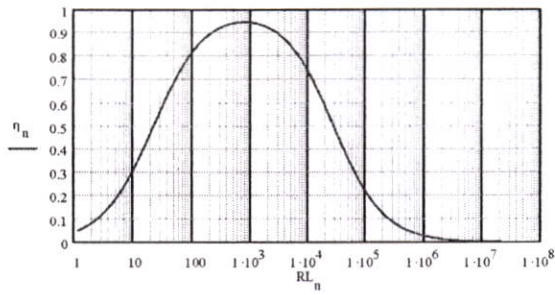
$$\Delta_n := L^2 \cdot C^2 \cdot N^4 + 2L \cdot C \cdot N^4 \cdot \text{Cd2}^2 \cdot (\text{RL}_n)^2 - 2L \cdot C^2 \cdot N^2 \cdot \text{Cd2} \cdot (\text{RL}_n)^2 + N^4 \cdot \text{Cd2}^4 \cdot (\text{RL}_n)^4 + 2\text{Cd2}^3 \cdot (\text{RL}_n)^4 \cdot C \cdot N^2 + \text{Cd2}^2 \cdot (\text{RL}_n)^4 \cdot C^2$$

$$f_{r_n} := \frac{\sqrt{2L \cdot C \cdot [-L \cdot C \cdot N^2 + N^2 \cdot \text{Cd2}^2 \cdot (\text{RL}_n)^2 + \text{Cd2} \cdot (\text{RL}_n)^2 \cdot C + \sqrt{\Delta_n}]}}{4\pi L \cdot C \cdot N \cdot \text{Cd2} \cdot \text{RL}_n}$$



Efficiency at Resonance Frequency

$$\eta_n := \frac{1}{1 + \left[1 + (2 \cdot \pi \cdot f_{r_n} \cdot \text{Cd2} \cdot \text{RL}_n)^2 \right] \cdot N^2 \cdot \frac{R}{\text{RL}_n}}$$



Frequency set

fmin := 80k fmax := 100k frpt := 500 h := 0. frpt

$$f_h := fmin + \frac{(fmax - fmin)}{frpt} \cdot h$$

Req = 100

$$Av01_h := N \cdot \frac{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{Req}{N^2} \right]}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} + \left(\frac{Req}{N^2} \right) \right]} \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right]$$

$$\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{Req}{N^2} \right] + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right]$$

Req = 300

$$Av02_h := N \cdot \frac{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{Req}{N^2} \right]}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} + \left(\frac{Req}{N^2} \right) \right]} \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right]$$

$$\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{Req}{N^2} \right] + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right]$$

Req := 800

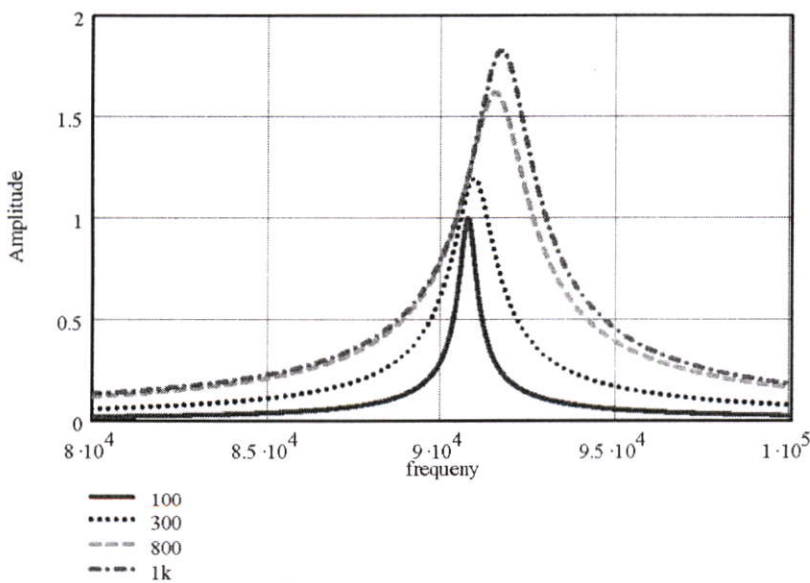
$$Av03_h := N \cdot \frac{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{Req}{N^2} \right]}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} + \left(\frac{Req}{N^2} \right) \right]} \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot Cd1)} \right]$$

$$\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{Req}{N^2} \right] + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot Cd1)} \right]$$

Req := 1k

$$Av04_h := N \cdot \frac{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{Req}{N^2} \right]}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} + \left(\frac{Req}{N^2} \right) \right]} \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot Cd1)} \right]$$

$$\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{Req}{N^2} \right] + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs_h \cdot Cd1)} \right]$$

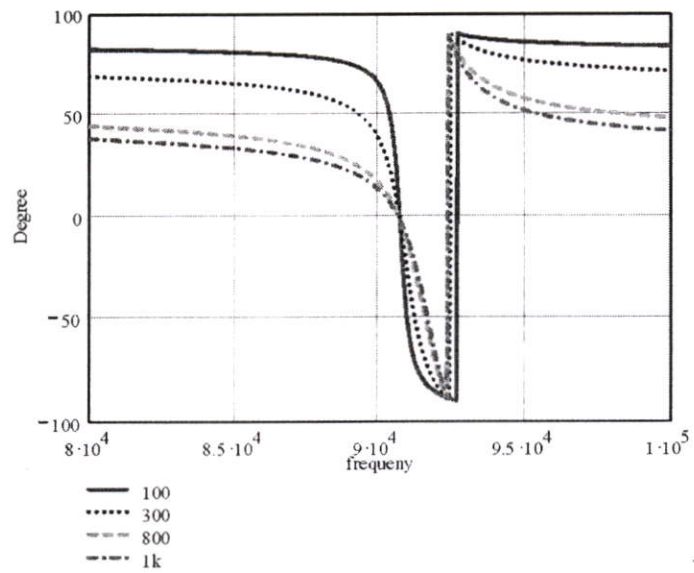


$$\theta_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Av01_h)}{\operatorname{Re}(Av01_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\theta1_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Av02_h)}{\operatorname{Re}(Av02_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\theta2_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Av03_h)}{\operatorname{Re}(Av03_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\theta3_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Av04_h)}{\operatorname{Re}(Av04_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$



Programing Impedence Analysis For Piezoelectric Tnsformers

$$m := 10^{-3} \quad n := 10^{-9} \quad p := 10^{-12} \quad k := 10^3$$

Parameters set

$$R := 15.24422 \quad L := 26.93489m \quad C := 114.258p$$

$$Cd1 := 1.119211n \quad Cd2 := 2.141935n \quad N := 1.216549539$$

Frequency set

$$fmin := 85k \quad fmax := 105k \quad fmpt := 100 \quad h := 1..fmpt$$

$$f_h := fmin + \frac{(fmax - fmin)}{fmpt} \cdot h$$

$$RL := 100$$

$$Zin_h := \frac{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2}}{\left(\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \right) + \left(\frac{RL}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right] \right]}{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2}}{\left(\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \right) + \left(\frac{RL}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right]}$$

$$RL := 300$$

$$Zin1_h := \frac{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2}}{\left(\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \right) + \left(\frac{RL}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right] \right]}{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2}}{\left(\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \right) + \left(\frac{RL}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right]}$$

$$RL := 800$$

$$Zin2_h := \frac{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2}}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \right] + \left(\frac{RL}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right] \right]}{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2}}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \right] + \left(\frac{RL}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right]}$$

$$RL := 1k$$

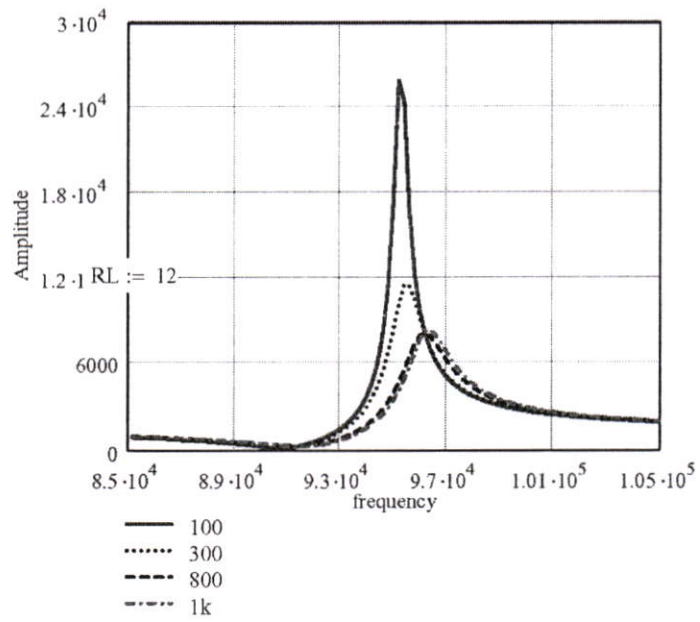
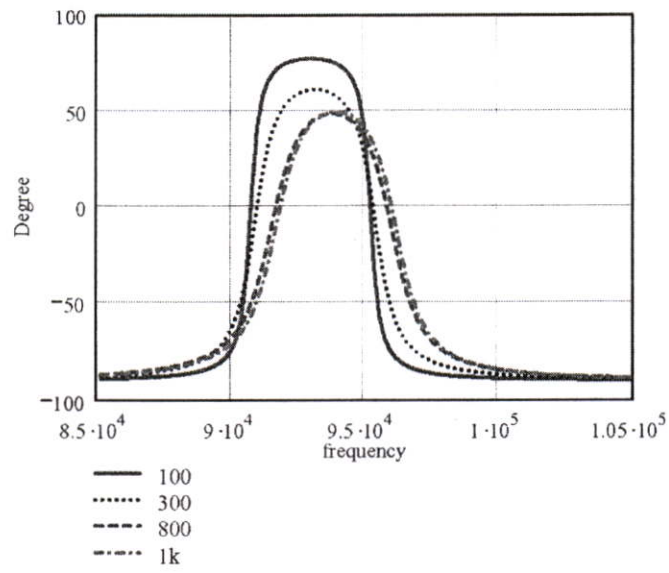
$$Zin3_h := \frac{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2}}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \right] + \left(\frac{RL}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right] \right]}{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2}}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \right] + \left(\frac{RL}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right]}$$

$$\psi_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Zin_h)}{\operatorname{Re}(Zin_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\psi1_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Zin1_h)}{\operatorname{Re}(Zin1_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\psi2_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Zin2_h)}{\operatorname{Re}(Zin2_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\psi3_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Zin3_h)}{\operatorname{Re}(Zin3_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$



Programing Analysis For Piezoelectric Trnsformers PT_01

$$m := 10^{-3} \quad n := 10^{-9} \quad p := 10^{-12} \quad k := 10^3$$

Parameters set

$$R := 15.24422 \quad L := 26.93489\text{m} \quad C := 114.258\text{p}$$

$$Cd1 := 1.119211\text{n} \quad Cd2 := 2.141935\text{n} \quad N := 1.216549539$$

Condition 1: Minimizing Dead Time for ZVS Condition

$$f_{\min} := 88\text{k} \quad f_{\max} := 100\text{k} \quad f_{\text{mpt}} := 100 \quad n := 1..f_{\text{mpt}}$$

$$f_{s_n} := f_{\min} + \frac{(f_{\max} - f_{\min})}{f_{\text{mpt}}} \cdot n$$

$$Rl := 800$$

$$V_{\text{in}} := 50 \quad R_{\text{eq}} := \frac{\pi}{8} Rl \quad V_m := \frac{2 \cdot V_{\text{in}}}{\pi}$$

$$R_{\text{in}_n} := R + \frac{R_{\text{eq}}}{N^2 \cdot \left[1 + (2\pi \cdot f_{s_n} \cdot Cd2 \cdot R_{\text{eq}})^2 \right]}$$

$$X_{\text{in}_n} := 2\pi \cdot f_{s_n} \cdot L - \frac{1}{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot C)} - \frac{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{\text{eq}} \cdot Cd2)^2}{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot N^2 \cdot Cd2) \cdot \left[1 + (2\pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{\text{eq}} \cdot Cd2)^2 \right]}$$

$$Z_n := \sqrt{(R_{\text{in}_n})^2 + (X_{\text{in}_n})^2} \quad \psi_{m_n} := \text{atan} \left(\frac{X_{\text{in}_n}}{R_{\text{in}_n}} \right)$$

$$I_{m_n} := \frac{V_m}{Z_n}$$

$$t_{\text{min}_n} := \frac{Cd1 \cdot V_{\text{in}}}{I_{m_n} \cdot \sin(\psi_{m_n})}$$

$$Rl := 500$$

$$R_{\text{eq}} := \frac{\pi}{8} Rl$$

$$R_{\text{in}_n} := R + \frac{R_{\text{eq}}}{N^2 \cdot \left[1 + (2\pi \cdot f_{s_n} \cdot Cd2 \cdot R_{\text{eq}})^2 \right]}$$

$$X_{\text{in}_n} := 2\pi \cdot f_{s_n} \cdot L - \frac{1}{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot C)} - \frac{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{\text{eq}} \cdot Cd2)^2}{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot N^2 \cdot Cd2) \cdot \left[1 + (2\pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{\text{eq}} \cdot Cd2)^2 \right]}$$

$$Z_n := \sqrt{(R_{in_n})^2 + (X_{in_n})^2} \quad \psi_{m_n} := \text{atan}\left(\frac{X_{in_n}}{R_{in_n}}\right)$$

$$I_{m_n} := \frac{V_m}{Z_n}$$

$$t_{min1_n} := \frac{C_d1 \cdot V_{in}}{I_{m_n} \sin(\psi_{m_n})}$$

Condition 2: Maximizing Dead Time for ZVS Condition

$$f_{min} := 88k \quad f_{max} := 100k \quad f_{mpt} := 100 \quad n := 1..f_{mpt}$$

$$f_{s_n} := f_{min} + \frac{(f_{max} - f_{min})}{f_{mpt}} \cdot n$$

$$R1 := 800$$

$$R_{eq} := \frac{\pi}{8} R1$$

$$R_{in_n} := R + \frac{R_{eq}}{N^2 \left[1 + (2\pi \cdot f_{s_n} \cdot C_d2 \cdot R_{eq})^2 \right]}$$

$$X_{in_n} := 2\pi \cdot f_{s_n} \cdot L - \frac{1}{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot C)} - \frac{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{eq} \cdot C_d2)^2}{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot N^2 \cdot C_d2) \left[1 + (2\pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{eq} \cdot C_d2)^2 \right]}$$

$$\psi_n := \text{atan}\left(\frac{X_{in_n}}{R_{in_n}}\right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$R1 := 500$$

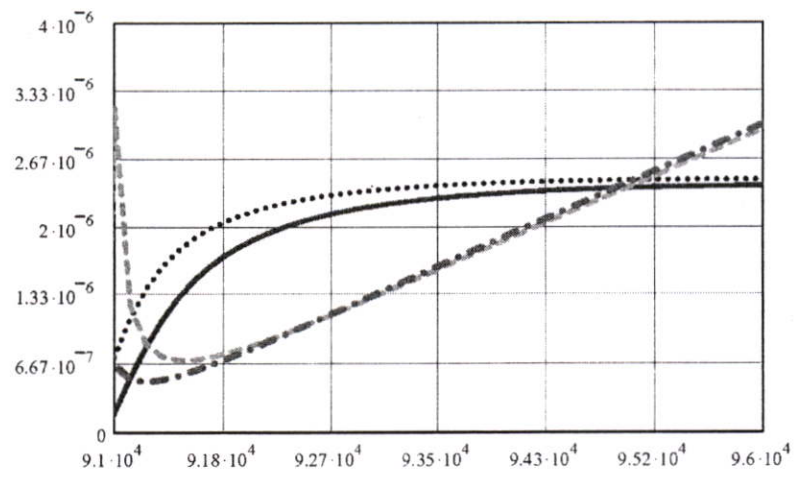
$$R_{eq} := \frac{\pi}{8} R1$$

$$R_{in1_n} := R + \frac{R_{eq}}{N^2 \left[1 + (2\pi \cdot f_{s_n} \cdot C_d2 \cdot R_{eq})^2 \right]}$$

$$X_{in1_n} := 2\pi \cdot f_{s_n} \cdot L - \frac{1}{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot C)} - \frac{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{eq} \cdot C_d2)^2}{(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot N^2 \cdot C_d2) \left[1 + (2\pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{eq} \cdot C_d2)^2 \right]}$$

$$\psi_n^1 := \arctan\left(\frac{X_{in1_n}}{R_{in1_n}}\right) \frac{180}{\pi}$$

$$t_{\max n} := \frac{\psi_n}{360} \cdot \frac{1}{f_s_n} \qquad t_{\max 1_n} := \frac{\psi_n^1}{360} \cdot \frac{1}{f_s_n}$$



ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27
 27th Electrical Engineering Conference

Volume I

สาขาทศควา

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

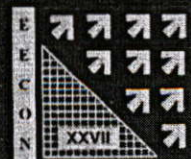
11-12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ขอนแก่น



ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาคีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์



การวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์
Measurement and Analysis Equivalent Circuit Parameters of Piezoelectric Transformers

ประสิทธิ์ พลหาญ นนทวัฒน์ จุลเดช

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสำนักวิจัยสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนจตุพล แขวงลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทร.(02) 3264221 Email s6067008@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอขั้นตอนการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ด้วยการวัดค่า Admittance ที่ทางเข้าและทางออก โดยใช้ Impedance Analyzer แล้วนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Admittance Circle Measurement ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ผลการคำนวณนี้ได้นำไปทดลองโดยเปรียบเทียบการตอบสนองของคอกความถี่ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์จริงกับของวงจรสมมูลที่ได้ซึ่งได้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน

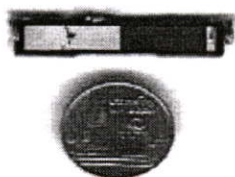
คำสำคัญ: เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ พารามิเตอร์

Abstract

This paper presents a method for deriving the equivalent circuit parameters of a piezoelectric transformer. Based on the measured input and output admittance of the device, the parameter are calculated by the admittance circle technique. The simulated frequency response of the equivalent circuit is found be corresponding with the measurement results confirming the validity of the calculation method.

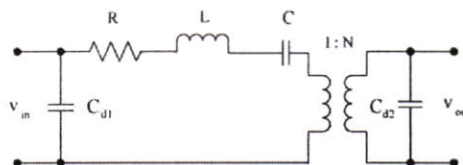
1. บทนำ

คุณสมบัติของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์รูปที่ 1.1 ได้จากการรวมเอาคุณสมบัติของเปียโซอิเล็กทริกที่เรียกว่า Conversion Piezoelectric Effect กับ Piezoelectric Effect รวมเข้าด้วยกัน



รูปที่ 1.1 เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูลตามรูปที่ 1.2 โดยที่ R, L, C, เป็นพารามิเตอร์ที่จำลองของการทำงานทางกล [1] C_{d1} , C_{d2} เป็น Capacitance ทางด้านเข้าและทางด้านออกตามลำดับ N คืออัตราการเปลี่ยนรูปของพลังงานรวมของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์



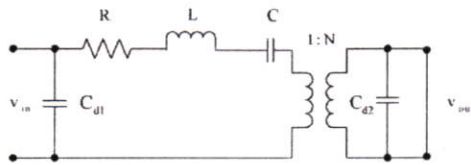
รูปที่ 1.2 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

การนำเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มาใช้งาน [2], [3] จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ แต่ในปัจจุบันนี้ผู้ผลิตเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ไม่ได้ให้ข้อมูลมาครบถ้วนดังนั้นจำเป็นต้องมีการหาเทคนิคเพื่อวัดและวิเคราะห์หาค่าวงจรสมมูลดังกล่าว

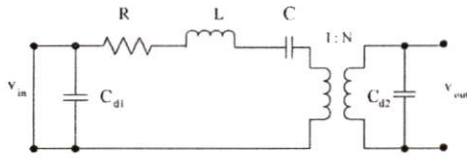
2. การวัดค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

2.1 หลักการวัด

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ สามารถวัดและวิเคราะห์ได้โดยคำนวณจากค่า Admittance ซึ่งประกอบด้วย Susceptance และ Conductance ที่ความถี่ต่างๆ โดยวัดค่า Admittance ด้านทางเข้าในขณะที่ด้านทางออกถูกัดวงจรตามรูปที่ 2.1 และวัด Admittance ด้านทางออกในขณะที่ด้านทางเข้าถูกัดวงจรตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 การวัด Admittance ทางเข้า

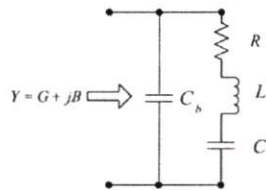


รูปที่ 2.2 การวัด Admittance ทางออก

ค่าของ Admittance (Susceptance, Conductance) ที่ได้จากการวัดดูผ่านวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Admittance Circle Measurement

2.2 สมการที่เกี่ยวข้อง

การวัดป้อนไอเดียลทรานส์ฟอร์มเมอร์ตามรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 สามารถเขียนวงจรสมมูลทั่วไปของป้อนไอเดียลทรานส์ฟอร์มเมอร์ได้ตามรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงสมการทั่วไปที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลทั่วไปของป้อนไอเดียลทรานส์ฟอร์มเมอร์ขณะสัดวงจรด้านทางเข้าหรือทางออก

$$Y = \frac{R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} + j \frac{R^2 + (X_L - X_C)^2 - X_{C_b}(X_L - X_C)}{X_{C_b}(R^2 + (X_L - X_C)^2)} \quad (1)$$

$$Y = G + jB \quad (2)$$

$$G = \frac{R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3)$$

$$B = \frac{R^2 + (X_L - X_C)^2 - X_{C_b}(X_L - X_C)}{X_{C_b}(R^2 + (X_L - X_C)^2)} \quad (4)$$

ถ้า Impedance ของ C_b มากกว่า Impedance ของ R, L, C และ กำหนดความถี่ที่ความถี่ Series Resonance $\omega = \omega_s \Rightarrow X_L = X_C$ ค่าของค่า G และ B ที่ความถี่ $\omega = \omega_s$ กำหนด $G(\omega_s) = G_{max}, B(\omega_s) = B_s$

$$G_{max} = \frac{R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (5)$$

$$R = \frac{1}{G_{max}} \quad (6)$$

$$B_s = \frac{R^2 + (X_L - X_C)^2 - X_{C_b}(X_L - X_C)}{X_{C_b}(R^2 + (X_L - X_C)^2)} \quad (7)$$

$$C_b = \frac{B_s}{\omega_s} \quad (8)$$

พิจารณาความถี่ที่ตำแหน่งสูงสุด (ω_s) และความถี่ที่ตำแหน่งต่ำสุด (ω_H) ของ Susceptance ตามรูปที่ 2.4

Q คือ Mechanical Quality Factor

$$Q = \frac{\omega_s}{\omega_H - \omega_L} \quad (9)$$

พิจารณาค่าพารามิเตอร์ L

$$Q = \omega_s \frac{L}{R} \quad (10)$$

$$L = R \frac{1}{\omega_H - \omega_L} \tag{11}$$

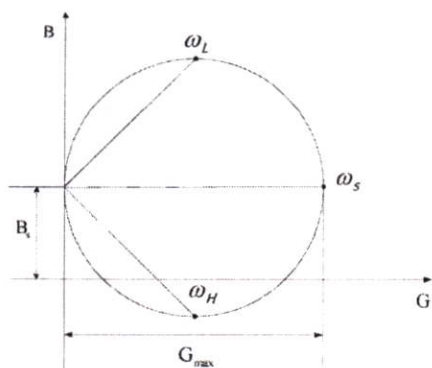
พิจารณาค่าพหามิเตอร์ C

$$Q = \frac{1}{RC \omega_s} \tag{12}$$

$$C = \frac{\omega_H - \omega_L}{R (\omega_s)^2} \tag{13}$$

2.3 การหาค่า Admittance Circle และวงจรมูลของเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานซ็อดเดอร์

ขั้นตอนที่หนึ่ง: วัดค่า G, B ตามรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 โดยวัดในย่านความถี่ครอบคลุมความถี่ Resonance ของเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานซ็อดเดอร์ด้วยเครื่อง Impedance Analyzer และนำมาเขียนกราฟตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Admittance Circle measurement

ขั้นตอนที่สอง: รูปที่ 2.4 ได้ค่า G_{max} , B_s ที่ความถี่ Resonance ($\omega = \omega_s$) และจากสมการ (6), (8), (11), (13) สามารถคำนวณค่า R, C, L และ C_s ของวงจรที่ทางเข้าและทางออกของวงจรมูลของเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานซ็อดเดอร์ในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2

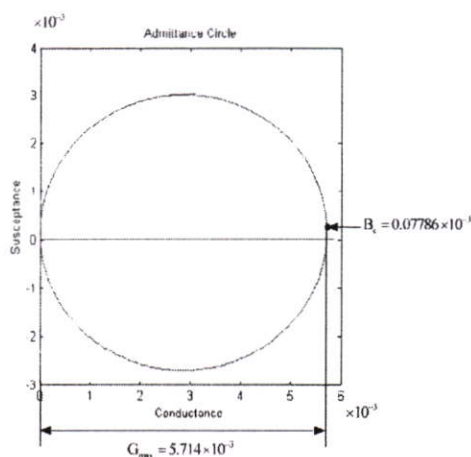
ขั้นตอนที่สาม: คำนวณหาค่า N ได้จากสมการ

$$L_{meas} = N^2 L_{airline}$$

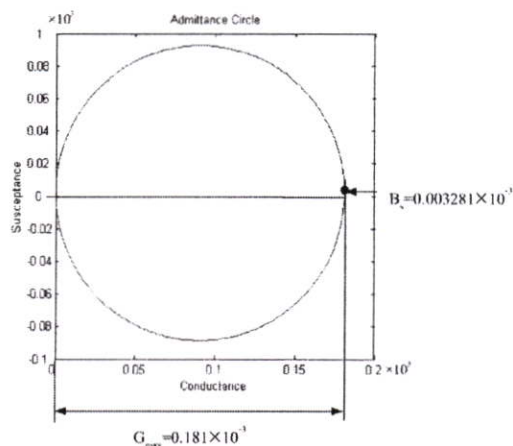
จากทั้งสามขั้นตอนจะได้วงจรมูลของเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานซ็อดเดอร์

3. ผลการทดลองวัดพหามิเตอร์ของวงจรมูลของเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานซ็อดเดอร์

การทดลองได้ทดลองวัดเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานซ็อดเดอร์ชนิด Rosen Type เบอร์ PT112R0 - 01 ได้ Admittance Circle ที่ทางเข้าตามรูปที่ 3.1 และที่ทางออกตามรูปที่ 3.2

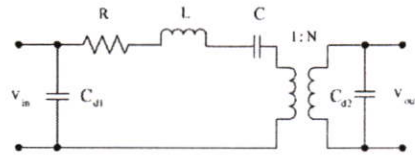


รูปที่ 3.1 Admittance Circle ทางเข้า



รูปที่ 3.2 Admittance Circle ทางออก

ซึ่งนำค่าที่ได้ไปคำนวณได้วงจรมูลรวมของเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานซ็อดเดอร์ตามรูปที่ 3.3

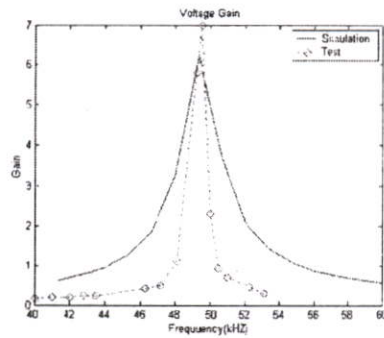


$R = 174.991 \Omega$ $C = 29.68\text{pF}$ $L = 0.353 \text{ H}$
 $C_{d1} = 251.9\text{pF}$ $C_{d2} = 10.62\text{pF}$ $N = 5.254$

รูปที่ 3.3 พารามิเตอร์ของวงจรจากการคำนวณ

4. ผลการทดลอง

พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ได้นำมาทดสอบความถูกต้องโดยทดสอบวัดอัตราขยายของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่รอบด้านความถี่ Resonance ของวงจรสมมูลเปรียบเทียบกับเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์จริงที่โหลด 120kΩ แสดงผลในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลการตอบสนองต่อความถี่

5. สรุป

การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ โดยใช้เทคนิค Admittance Circle Measurement ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ผลการทดลองนี้ได้นำมาทดลองเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์จริงกับของวงจรสมมูลที่ได้ซึ่งได้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้โดยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือด้านเครื่องมือวัดจากห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sam ben – Yaakov and Simon Lineykin, "Frequency Tracking to maximum power of piezoelectric transformer HV converters under load variation". IEEE Pisc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, Volume: 2, pp23-27 June 2002.
- [2] มนชล นาวงษ์ นนทวัฒน์ จุลละชะ, "การประยุกต์ใช้งานของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่ง". การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 25, 2545 หน้า 61-65.
- [3] มนชล นาวงษ์ นนทวัฒน์ จุลละชะ, "การออกแบบระบบควบคุมแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งที่ใช้เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์". การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 26, 2546.



นายประสิทธิ์ ทลหาญ การศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยราชธานี พ.ศ. 2545 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโทที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ดร. นนทวัฒน์ จุลละชะ การศึกษาระดับปริญญาเอกจาก INSA de Lyon, France พ.ศ. 2535 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28

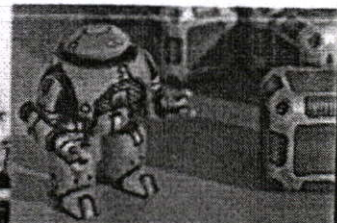
28th Electrical Engineering Conference



Volume I

ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
ไฟฟ้ากำลัง (PW)

Electrical Engineering
Electrical Engineering



Western Digital



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

20 - 21 ตุลาคม 2548

ณ โรงแรม เฟิร์ล วิลเลจ จ.ภูเก็ต

การวิเคราะห์ค่าโหลดที่เหมาะสมของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

Analysis Optimal Load of Piezoelectric Transformers

ประสิทธิ์ พลหาญ นนทวัฒน์ จุลเดช

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสำนักวิจัยสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทร. (02)3264221 Email s6067008@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าโหลดที่ทำให้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุด โดยคำนวณจากวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ และใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการวัดในงานวิจัยที่ได้นำเสนอไปแล้ว[1] การคำนวณค่าประสิทธิภาพของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ความถี่ Series Resonant (ω) ผลปรากฏว่าเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด (94.8%) ที่โหลดค่าเหมาะสมที่คำนวณได้ ($R_{c,opt} = 819\Omega$) และการทดลองได้ประสิทธิภาพ 93.1% เมื่อนำผลการทดลองค่าประสิทธิภาพจริงที่โหลดใดๆ ไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจะเห็นว่ามีผลใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์, DC/DC คอนเวอร์เตอร์

Abstract

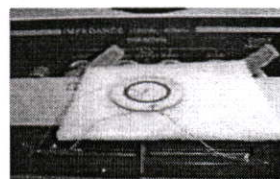
This paper presents the analysis of an optimal load for a piezoelectric transformer that gives maximum efficiency. The calculation is based on the equivalent circuit, whose parameters were determined from the technique in [1]. It is calculated that at the series resonant frequency the piezoelectric transformer exhibits the maximum efficiency (94.8%) when the load $R_{c,opt} = 819\Omega$. This corresponds well with the experimental result where the maximum efficiency is measured to be 93.1%. The calculated and measured efficiency also agree well at other load values.

Keywords: Piezoelectric Transformer DC/DC Converter

1. บทนำ

ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการขนาดพื้นที่จำกัดมีความจำเป็นต้องใช้คอนเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กและบาง เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ (รูปที่ 1.1) เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาทดแทนเมกนคติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ขนาดใหญ่กว่าและสร้างปัญหา EMC นอกจากนั้น เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ยังมีประสิทธิภาพสูง ไม่มี

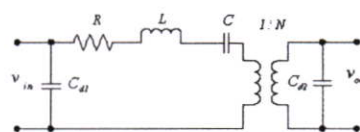
สนามแม่เหล็กออกมารบกวน ในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานร่วมกับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ให้มีประสิทธิภาพสูงต้องทราบว่าเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ทำงานที่โหลดที่เหมาะสมหรือไม่ ถ้าทำงานร่วมกับโหลดที่เหมาะสมก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของคอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพสูงไปด้วย



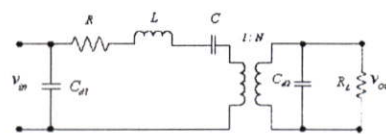
รูปที่ 1.1 เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

2. การวิเคราะห์โหลดที่เหมาะสมของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

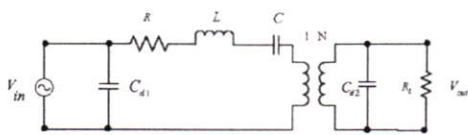
เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูล ตามรูปที่ 2.1 [2][3] โดยที่ R , L และ C เป็นพารามิเตอร์ที่จำลองผลการทำงานทางกล C_{in} , C_{out} เป็น Capacitance ทางด้านเข้าและทางด้านออกตามลำดับ N คืออัตราการเปลี่ยนรูปของพลังงานรวมของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์



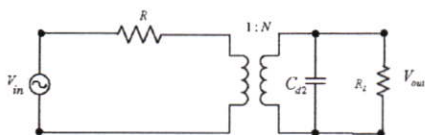
รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์



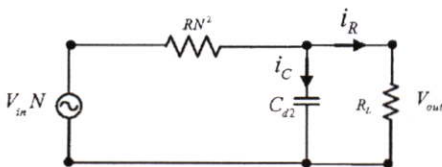
รูปที่ 2.2 เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คู่กับ R_L



รูปที่ 2.3 เป็โยไอเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ค่อกับ V_m



รูปที่ 2.4 เป็โยไอเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ที่ควมถี่ ω



รูปที่ 2.5 ยัช V_m และ R ด้านประมณภูมิทางด้านทุคยอมุมิ

วงจรมกรรูปที่ 2.3 สามารถคำนวณประสิทธิภาพของเป็โยไอเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์โดยใช้ควมถี่ Series Resonant (ω) ของกััง R, L และ C ที่อนุกรมกันอยู่ ซึ่งทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของพารามิเตอร์ L และ C มีค้ชท่กัน ($X_L = X_C$) ดังนั้นกััง R, L และ C ที่อนุกรมกัน จะเหลือแค่พารามิเตอร์ R เพียงพารามิเตอร์เดียว, C_{d2} มีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่า R มากทำให้ได้วงจรมกรรูปที่ 2.4 จากนั้นยัช V_m และ R ทางด้านประมณภูมิทางด้านทุคยอมุมิครมกรรูปที่ 2.5 ซึ่งสามารถเขียนสมการอัตราชยแรงดันไฟฟ้้าได้ดังค่อไปนั้ [4]

ที่ควมถี่ Series Resonant (ω)

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{1}$$

$$A = \frac{V_{out}}{V_m} = \frac{N}{\left(\frac{N^2 R}{R_L} + jN^2 R \omega C_{d1} + 1\right)} \tag{2}$$

$$|A| = \frac{N}{\sqrt{\left(\frac{N^2 R}{R_L} + 1\right)^2 + (N^2 R \omega C_{d1})^2}} \tag{3}$$

กำลังงานทางไฟฟ้้าด้านทางออกคำนวณได้ดังค่อไปนั้

$$P_{out} = \frac{|V_{out}|^2}{R_L} \tag{4}$$

$$|V_{out}| = V_m |A| \tag{5}$$

$$P_{out} = \frac{N^2 V_m^2}{R_L \left[\left(1 + \frac{N^2 R}{R_L}\right)^2 + (\omega C_{d1} N^2 R)^2 \right]} \tag{6}$$

สมการของกำลังงานทางไฟฟ้้าด้านทางออก(6) สามารถคำนวณกำลังงานทางไฟฟ้้าด้านทางออกสูงสุด ของวงจรมกรที่ โหลดใดๆ ได้จากการ Differentiation สมการที่ (6) เทียบกับ R_L และกำหนดให้เท่ากับศูนย์

$$\frac{d(P_{out})}{dR_L} = 0 \tag{7}$$

ได้โหลคที่ทำให้เกิดกำลังงานด้านทางออกสูงสุดของเป็โยไอเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ดังค่อไปนั้

$$R_{L(opt,max)} = \frac{N^2 R}{\sqrt{1 + (\omega C_{d1} N^2 R)^2}} \tag{8}$$

เมื่ $(\omega C_{d1} N^2 R)^2 \ll 1$

$$R_{L(opt,max)} = N^2 R \tag{9}$$

แทนสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (6) ได้กำลังงานด้านทางออกสูงสุดของเป็โยไอเล็ก ทริกทรานฟอร์เมอร์ดังค่อไปนั้

$$P_{out(max)} = \frac{N^2 V_m^2}{2R \left(1 + \sqrt{1 + (\omega C_{d1} N^2 R)^2}\right)} \tag{10}$$

เมื่ $(\omega C_{d1} N^2 R)^2 \ll 1$

$$P_{out(max)} = \frac{N^2 V_m^2}{4R} \tag{11}$$

กำลังงานด้านทางเข้ามีค่าดังค่อไปนั้

$$P_{in} = N^2 R |i_c + i_r|^2 + P_{out} \tag{12}$$

$$P_{in} = V_m^2 \left[\frac{N^2 R + R_L}{R_L^2} + (\omega C_{d1})^2 N^2 R \right] \tag{13}$$

สมการ (6) และ (13) สามารถคำนวณประสิทธิภาพของวงจรได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{14}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{N^2 R}{R_L} + (\omega C_{e1})^2 N^2 R R_L} \tag{15}$$

สมการสามารถคำนวณประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรที่โหลดใดๆ ได้จากการ Differentiation สมการที่ (15) และกำหนดให้เท่ากับศูนย์

$$\frac{d\eta}{dR_L} = 0 \tag{16}$$

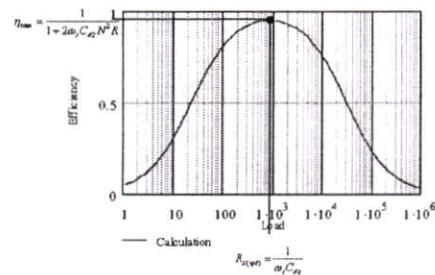
สมการของประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรคือต่อไปนี้

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + 2\omega C_{e1} N^2 R} \tag{17}$$

โดยที่

$$R_L = R_{L,opt} = \frac{1}{\omega C_{e1}} \tag{18}$$

จากสมการที่(15) นำมาแสดงกราฟได้ตามรูปที่ 2.6 โดยค่าแห่งที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (η_{max}) ได้จากโหลดที่เหมาะสม ($R_{L,opt}$) ตามสมการที่ (15) (17) (18)



รูปที่ 2.6 ประสิทธิภาพสูงสุด และ โหลดที่เหมาะสม

3. ผลการทดลองและการคำนวณ

การทดลองได้นำ piezoelectric transformer สองตัวอย่าง ที่มีพารามิเตอร์ต่างกันมาทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้อง มีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 1.1 การทดลองใช้ความถี่ที่ความถี่จุด Series Resonant

(ω) และให้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าด้านทางเข้าคงที่ โดยเปลี่ยนแปลงค่าของโหลด (R_L)

พารามิเตอร์	Piezoelectric Transformer	
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
R(Ω)	15.24422	26.08965
L(mH)	26.93489	21.1955
C(pF)	114.258	147.3455
C _{e1} (nF)	1.119211	1.031281
C _{e2} (nF)	2.141935	2.462234
N	1.21655	0.95583
ω_c (rad/sec)	570000	565900

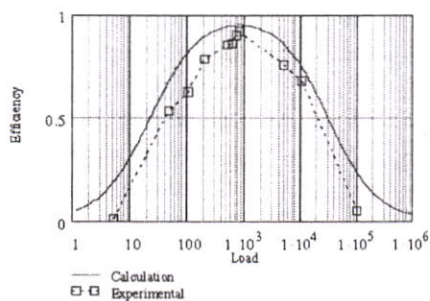
ตารางที่ 1.1 พารามิเตอร์ของ piezoelectric transformer

ตารางที่ 1.2 แสดงตารางของประสิทธิภาพเทียบกับโหลดใดๆตามลำดับ โดยที่มีผลของการคำนวณและการทดลองวัดจริงเปรียบเทียบกัน ทั้งสองตัวอย่าง

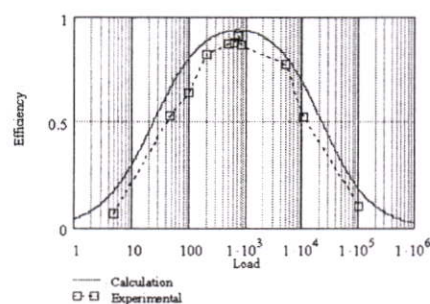
โหลด (Ω)	ประสิทธิภาพ			
	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2	
	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ
5	0.0123	0.18871	0.065155	0.17439
47	0.52852	0.67889	0.52847	0.66352
100	0.62145	0.81504	0.63821	0.8059
200	0.78014	0.89381	0.82268	0.88677
510	0.85496	0.94207	0.86883	0.93421
610	0.85586	0.94558	0.87521	0.93691
710	0.89583	0.94726	0.91133	0.93771
820	0.93102	0.94778	0.86699	0.93716
5k	0.75188	0.85191	0.77278	0.80897
10k	0.67253	0.74877	0.51924	0.6823
100k	0.046823	0.22755	0.099877	0.17737

ตารางที่ 1.2 ประสิทธิภาพของ piezoelectric transformer

รูปที่ 3.1 แสดงกราฟของประสิทธิภาพเทียบกับโหลดใดๆตามลำดับโดยที่กราฟมีผลของการคำนวณและการทดลองวัดจริงเปรียบเทียบกันทั้งสองตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 ประสิทธิภาพของวงจรกับโหลดใดๆ ตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 3.2 ประสิทธิภาพของวงจรกับโหลดใดๆ ตัวอย่างที่ 2

การคำนวณค่าโหลดที่เหมาะสม (R_{Load}) เฉพาะตัวอย่างที่ 1 ได้เท่ากับ 819 Ω ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด 94.8% และในการทดลองใช้โหลด 820 Ω ทำให้เกิดประสิทธิภาพ 93.1%

4. สรุป

ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์โดยการคำนวณจากวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์และการทดลองวัดจริง สังกัดได้ว่าผลของการทดลองวัดจริงกับการคำนวณจากวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ค่าของประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดที่โหลดเหมาะสมค่าหนึ่ง และผลการทดลองจริงกับการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองตัวอย่าง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือด้านเครื่องมือวัดและเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์จากห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า และของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ประสิทธิ์ พลหาญ นนทวัฒน์ จุลเดช, "การวัดและวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 27, 2547 หน้า 329-332.
- [2] มนชล นาวงษ์ นนทวัฒน์ จุลเดช, "การประยุกต์ใช้งานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตซ์จิ่ง", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 25, 2545 หน้า 61-65.
- [3] มนชล นาวงษ์ นนทวัฒน์ จุลเดช, "การออกแบบระบบควบคุมแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์จิ่งที่ใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 26, 2546 หน้า 812-816.
- [4] Toshiyuki Zaito, Takeshi Inoue, Osamu Ohnishi and Akio Iwamoto, "2 MHz Power Converter With piezoelectric Ceramic Transformer", Telecommunications Energy Conference, 1992. INTELEC '92, 14th International 4-8 Oct. 1992 Page(s):430 - 437



นายประสิทธิ์ พลหาญ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรม ไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยราชธานี พ.ศ.2545 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ดร. นนทวัฒน์ จุลเดช การศึกษาระดับปริญญาเอกจาก INSA de Lyon, France พ.ศ.2535 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29
29th Electrical Engineering Conference (EECON-29)
9 – 10 พฤศจิกายน 2549

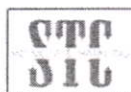
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



[View Proceeding](#)

[Install
Acrobat Reader](#)

[Exit](#)



การออกแบบวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์แบบที่สวิทซ์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเป็นศูนย์
 Design of Piezoelectric Transformer Converter using Zero-Voltage-Switch Technique

นนทวัฒน์ จุลตะระ* ประสิทธิ์ หล้าใหญ่**

ห้องวิจัยการควบคุมการแปลงรูปพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิจัยสื่อการและ เทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทร. (02) 3264221 Email : knontaw@kmitl.ac.th , s6067008@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิทซ์ที่ใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์แทนแมกเนติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ โดยออกแบบให้สวิทซ์ทำงานขณะที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิทซ์มีค่าเป็นศูนย์ และออกแบบให้วงจรทำงานในช่วงโหลดที่เหมาะสม เพื่อให้วงจรมีประสิทธิภาพสูง ผลการทดลองปรากฏว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์ทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้ คือสวิทซ์มีภาระที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิทซ์มีค่าเป็นศูนย์ และ วงจรมีประสิทธิภาพสูง (≈ 90 %)

คำสำคัญ: เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

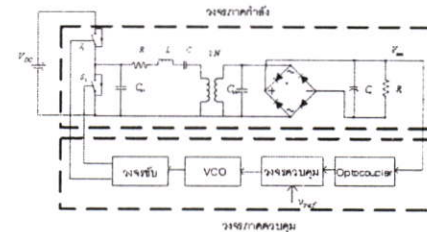
Abstract

This paper 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 experimental result is used to verify the proposed model.

1. บทนำ

ปัจจุบันแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิทซ์สำหรับอุปกรณ์บางชนิดต้องการให้มีขนาดกะทัดรัด ส่วนจ่ายกำลังให้กับจอของ Notebook หรือ TV จอแบน เป็นต้น โดยทั่วไปแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิทซ์ใช้แมกเนติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Magnetic Transformer) เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง ทำให้วงจรแหล่งจ่ายกำลังดังกล่าวมีขนาดใหญ่และมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน ไม่นานมานี้มีการคิดค้นอุปกรณ์ชนิดใหม่ เรียกว่าเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มาใช้แทนแมกเนติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ โดยนำมาสร้างเป็นเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มีคุณสมบัติที่หลากหลายประการเช่น มีขนาดเบา การทำงานที่ความถี่สูง และประสิทธิภาพสูง

เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ ความรูปที่ 1 ประกอบด้วยโครงสร้างสองโครงสร้างคือ ภาคกำลังและภาคควบคุม งานวิจัยนี้กล่าวถึงเฉพาะ การออกแบบในส่วนภาคกำลัง ซึ่งทำหน้าที่ในการส่งถ่ายพลังงานจากแรงดันไฟฟ้ากระแส เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสระดับหนึ่งที่มีค่าทางออก อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์สำหรับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คือ วงจรคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบวีโชนัทกล่าวคือ แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกถูกควบคุมด้วยความถี่ของกราทริช[1] นอกจากนี้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูง ซึ่งทำให้เกิดค่าดังสูญเสียดังสวิทซ์ ดังนั้นจึงต้องทำให้สวิทซ์ทำงานแบบที่สวิทซ์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเป็นศูนย์(ZVS) การออกแบบให้สวิทซ์ทำงานแบบนี้ต้องใช้ L, C ช่วยในการทำงาน แต่การใช้ L, C ที่ขนาดของวงจรใหญ่ขึ้น จึงได้มีงานวิจัยที่พัฒนาวงจรทำให้เกิด ZVS ที่สวิทซ์โดยใช้ L และ C แฉ่งที่อุปกรณ์อื่นๆ[2][3] งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวงจรทำให้เกิด ZVS ที่สวิทซ์โดยใช้ L และ C แฉ่งซึ่งอยู่ภายในเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ [4]

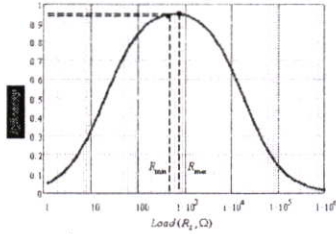


รูปที่ 1 โครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

2. การวิเคราะห์ค่าโหลดที่เหมาะสม

เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ สามารถทำงานให้ได้รับประสิทธิภาพสูงสุด จะต้องคำนวณหาค่าโหลดที่เหมาะสมตามสมการที่ (1) นำมาแสดงเป็นกราฟได้ความรูปที่ 2 [4]

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{N^2 R}{R_{eq}} + (\omega L C_{d1})^2 N^2 R R_{eq}} \quad (1)$$

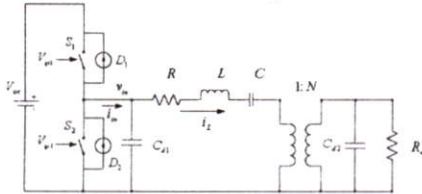


รูปที่ 2 ค่าโหลดที่เหมาะสมประสิทธิภาพสูงสุด

การกำหนดช่วงของโหลดที่เหมาะสมโดยกำหนดช่วงโหลดที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพมากกว่า 90% จากรูปที่ 2 ($R_{min} < R < R_{max}$)

3. หลักการทำงานของสวิตช์แบบที่สวิตช์ทำงานที่แรงดัน ไฟฟ้าเป็นศูนย์ (ZVS)

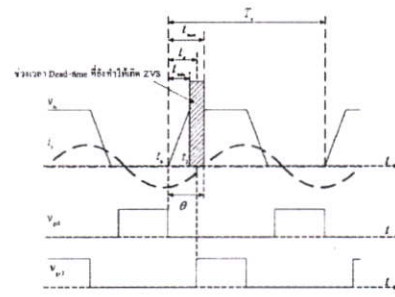
ผลจากงานวิจัยที่ผ่านมา[4] ทำให้ทราบว่าเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์มีคุณสมบัติของ L และ C_{d1} อยู่ภายใน ซึ่งงานวิจัยนี้จะมาใช้ประโยชน์เป็น L และ C ของการทำให้เกิด ZVS การทำงานแบบ ZVS คือต้องให้แรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีการปิดหรือเปิดสวิตช์ การออกแบบต้องกำหนด Dead-time (t_d) ที่จะทำให้เกิดแรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ ในการกำหนดค่าเวลา Dead-time (t_d) ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขสองประการคือ ค่าเวลา t_d ที่น้อยที่สุด $t_d = t_{min}$ และค่าเวลา t_d ที่มากที่สุด $t_d = t_{max}$ ที่จะทำให้เกิดแรงดันไฟแรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 3 วงจรการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์

3.1 เงื่อนไขค่าเวลา t_d ที่น้อยที่สุด $t_d = t_{min}$

ค่าเวลา t_d ที่น้อยที่สุด $t_d = t_{min}$ ได้จากการวิเคราะห์ที่สมการของช่วงเวลา C_{d1} กับประจุสแตจการวิเคราะห์ที่สมการและเงื่อนไขของกรวิเคราะห์นี้ได้ดังนี้



รูปที่ 4 ช่วงเวลาเมื่อเกิด ZVS ที่สวิตช์

เงื่อนไขของกรวิเคราะห์

ประการที่หนึ่ง: เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์มี Quality Factor (Q) สูงจึงสามารถประมาณกระแสไฟฟ้าที่ L เป็นสัญญาณ Sinusoidal ดังนี้

$$i(t) = I_L \sin(\omega t - \theta) \quad (2)$$

ประการที่สอง: การเก็บประจุของ C_{d1} ในช่วงเวลา $t_d < t < t_d$ ในรูปที่ 4 เป็นช่วงเวลาที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับหนึ่งคาบเวลาการทำงาน เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงประมาณกระแสไฟฟ้าที่โหลด C_{d1} เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดที่ $C_{d1}(t_d)$ ดังนี้

$$[S_1, S_2 = \text{OFF}] \Rightarrow i_{C_{d1}} = -i(t)$$

$$i_{C_{d1}}(t_d) = I_{C_{d1}} = -I_L \sin(-\theta) \quad (3)$$

$$I_{C_{d1}} = I_L \sin(\theta) \quad (4)$$

$$i_{C_{d1}} = C_{d1} \frac{dv_{in}}{dt} \quad (5)$$

$$dt = \frac{C_{d1} dv_{in}}{I_{C_{d1}}} \quad (6)$$

อินทิเกรตสมการทั้งสองข้าง

$$\int dt = \int \frac{C_{d1}}{I_{C_{d1}}} dv_{in} \quad (7)$$

$$t = \frac{C_{d1}}{I_{C_{d1}}} v_{in} \quad (8)$$

PE33

ที่ $t = t_{min} \Rightarrow v_a = V_{dc}$

$$I_{max} = \frac{C_{d1} V_{DC}}{I_L \sin(\theta)} \tag{9}$$

ประการที่สาม: แรงดันทางไฟฟ้าที่ v_a เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ทำให้ยากต่อการคำนวณจึงประมาณ v_a เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเพราะมีสัญญาณหลักมูล (fundamental) โดดเด่นกว่าโดยที่ v_a มีค่าสัญญาณหลักมูล (fundamental) สูงสุดคือ

$$V_{m,p.1} = \frac{2V_{DC}}{\pi} \tag{10}$$

Impedance ด้านทางเข้าโดยไม่รวม Impedance ของ C_{d1} (รูปที่ 3)

$$Z_m = R_m + X_m \tag{11}$$

$$R_m = R + \frac{R_{eq}}{N^2 (1 + (2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2)} \tag{12}$$

$$X_m = 2\pi f_s L - \frac{1}{2\pi f_s C} - \frac{(2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2}{(2\pi f_s C_{d2} N^2)(1 + (2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2)} \tag{13}$$

$$|Z_m| = \sqrt{R_m^2 + X_m^2} \tag{14}$$

$$\theta = a \tan \left[\frac{X_m}{R_m} \right] \tag{15}$$

คำนวณกระแสไฟฟ้าที่ L ได้

$$I_L = \frac{V_{m,p.1}}{|Z_m|} = \frac{2V_{DC}}{\pi |Z_m|} \tag{16}$$

แทนค่าสมการ(16) ลงในสมการที่ (9)

$$t_{min} = \frac{\pi C_{d1} |Z_m|}{2 \sin(\theta)} \tag{17}$$

3.2 เงื่อนไขค่าเวลา t_d ที่มากที่สุด $t_d = t_{max}$

รูปที่ 4 ถ้า $S_1 = ON$ หลังจากกระแสไฟฟ้า i_L เริ่มเป็นบวกทำให้ก่อนหน้านั้น ($i_L = 0$) < $t < t$ ($i_L > 0$ และ $S_1 = ON$) C_{d1} จะจ่ายกระแสไฟฟ้าแทน V_{dc} เพราะ $S_1, S_2 = OFF$ ดังนั้นเมื่อ $S_1 = ON$ ที่ $t(i_L > 0)$ จึงไม่เกิดการทำงานแบบ ZVS ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น สรุปได้ว่า $t_{max} = t$ ($i_L = 0$)

ถ้าหนดค่าเวลา (T) เท่ากับ 360° แล้วค่าเวลา t_{max} เท่ากับมุมของกระแส i_L ตามรูปที่

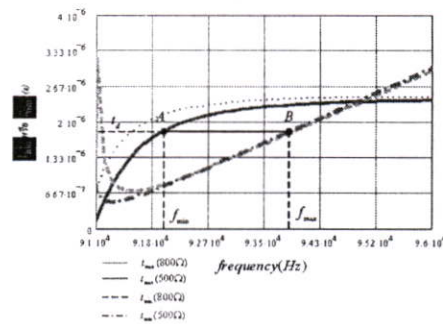
$$t_{max} = \frac{T \theta}{360^\circ} \tag{18}$$

โดยที่

$$T_s = \frac{1}{f_s} \tag{19}$$

$$t_{max} = \frac{\theta}{f_s 360^\circ} \tag{20}$$

การวิเคราะห์ Dead-time (t_d) ที่เหมาะสมตามเรตติวาระที่ได้ โดยเริ่มต้นพิจารณาจากโหลดที่เหมาะสมซึ่งทำให้เบี่ยงโวลต์เอกริกทรานฟอเมอร์ทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด ($500 \Omega < R_{load} < 800 \Omega$) รูปที่ 5 แสดงกราฟของ t_{min} และ t_{max} ที่โหลด 500 Ω และ 800 Ω ตามลำดับ การพิจารณา t_d ที่ทำให้สวิทช์อินเบี่ยงโวลต์เอกริกทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบ ZVS, t_d ต้องน้อยกว่า t_{min} ที่โหลด 500 Ω และ 800 Ω และ t_d ต้องมากกว่า t_{max} ที่โหลด 500 Ω และ 800 Ω รูปที่ 5 แสดงการเลือก t_d ซึ่งที่จุด A, $t_d < (t_{min,500\Omega})$ และ $t_{max,800\Omega}$ ที่จุด B, $t_d > (t_{min,500\Omega})$ และ $t_{max,800\Omega}$ จุด A,B เป็นตำแหน่งกำหนด f_{min} และ f_{max} ของ IC MC34067P (IC ใช้ควบคุมการทำงาน) ตามลำดับ

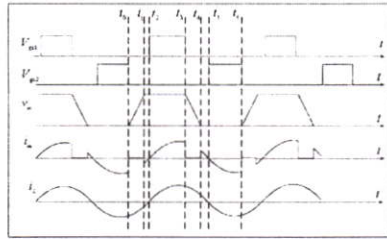


รูปที่ 5 ช่วงเวลา Dead-time ที่ทำให้เกิดเงื่อนไข ZVS

4. การทำงานของเบี่ยงโวลต์เอกริกทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ ภายใต้เงื่อนไข ZVS

การทำงานของ S_1 และ S_2 ตามรูปที่ 3 ภายใต้การทำงานที่สวิทช์ทำงานที่แรงดันสวิตช์เป็นศูนย์ (ZVS) สามารถจำลองการทำงานโดยกราฟในรูปที่ 6

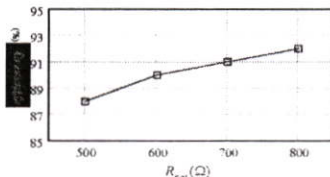




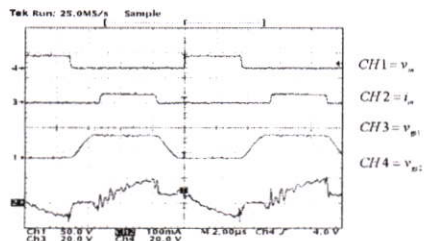
รูปที่ 6 การทำงานของปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

5. ผลการทดลอง

กำหนดพิกัดโพลต์ที่เหมาะสมได้ $R_{min}=500$ และ $R_{max}=800$ กำหนดค่าเวลา t_s ที่จะทำโพลต์การทำงานที่สวิตช์แบบ ZVS ได้ค่า $t_s = 1.34\mu s$ ค่าขนาดค่าความถี่ที่จุด $f_{min} = 9200Hz$ และ ค่าความถี่สูงสุด $f_{max} = 9300Hz$ กำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ด้านทางเข้า 50V และแรงดันไฟฟ้าที่ด้านทางออก 20V ให้กับวงจรภาคกำลัง



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพของวงจรปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์คัมแบบ



รูปที่ 8 รูปสัญญาณของวงจรวงจรปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์คัมแบบ

ผลการทดลองวงจรปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์แสดงประสิทธิภาพรูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงรูปสัญญาณของการทำงานของวงจร

5. สรุป

ผลการออกแบบด้วยวิธีการหาโพลต์ที่เหมาะสมและวิเคราะห์ข้างการทำงานที่ทำให้เรวิซทำงานแบบที่เรวิซทำงานที่แรงดันไฟฟ้าลวดล้อมสวิตช์เป็นศูนย์กลางใช้ L และ C_{pi} ภายในปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ประกอบวงจร ผลการทดลองปรากฏว่าวงจรปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์มีการทำงาน ตามที่ออกแบบ, ได้ประสิทธิภาพสูงและขนาดของวงจรลดลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือด้านเครื่องมือวัดจากห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] นนทชาติ นนทวัฒน์ จุลเดชะ, "การประยุกต์ใช้งานของปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ซิง", EECON-25, หน้า 106-110, 2545.
- [2] SANZ M., ALOU A., SOTO A., PRIETO R., COBOS J. A., UCEDA J., "Magnetic-less Converter based on Piezoelectric Transformer for Step-down DC/DC and Low Power Application", Proceeding of IEEE INTELE.92, pp. 615-621.
- [3] LIN R.L., LEE F. C., BAKE E. M., CHEN D. Y., "Inductor-less Piezoelectric Transformer Electronic Ballast for Linear Fluorescent Lamp", Proceeding of IEEE INTELE.92, pp. 664-669.
- [3] ประสิทธิ์ พลหาญ นนทวัฒน์ จุลเดชะ, "การวัดและวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของวงจรมูลของปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์", EECON-27, หน้า 329-332, 2547.
- [4] ประสิทธิ์ พลหาญ นนทวัฒน์ จุลเดชะ, "การวิเคราะห์โพลต์ที่เหมาะสมของปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์", EECON-28, หน้า 245-248, 2548.



นายประสิทธิ์ หกหาญ การศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยราชธานี ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโทที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ การศึกษาระดับปริญญาเอกจาก INSA de Lyon, France ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

PE33

การออกแบบวงจรควบคุมของ DC/DC เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์
 Controller Design of Piezoelectric Transformer based DC/DC Converter

นนทวัฒน์ จุลตะระ ประสิทธิ์ พลหาญ

ห้องวิจัยการควบคุมการแปลงรูปพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ สำนักวิจัยสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทร. (02) 3264221 Email : knontaw@kmitl.ac.th , s6067008@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ที่ใช้เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์แทนหมักนิติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ (เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์) โดยการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบโดยรวมด้วยวิธีการจำลองแบบการทำงานอย่างง่ายด้วยโปรแกรม PSpice แล้วออกแบบวงจรควบคุมแบบตามโพลตรงซิงโคร ผลการทดลองการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกพบว่าวงจรมีเสถียรภาพ มีผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกทั้งที่สถานะ Static และสถานะ Dynamic ได้ใกล้เคียงกับผลงานวิจัยที่ได้ทำมาแล้ว[1]

คำสำคัญ: เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์, DC/DC คอนเวอร์เตอร์, ระบบควบคุมแบบรีโซเนนซ์

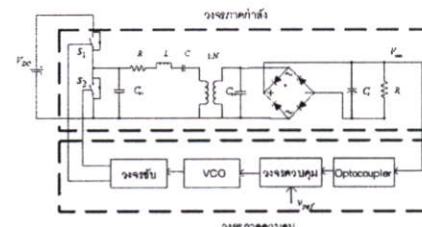
Abstract

This paper presents the controller designing of piezoelectric Transformer based DC/DC converter for switched-mode power supplies, where the magnetic transformer is replaced by piezoelectric transformer. The transfer function of power stage is defined by PSpice the controller circuit has 3 Poles, 2 Zeros. The experimental result is used to verify the proposed model.

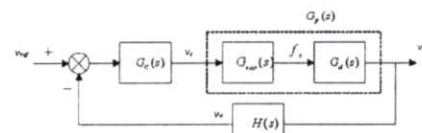
1. บทนำ

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ที่ดีจะต้องมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน มีการรบกวนระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกได้ตามต้องการ และมีผลตอบสนองที่รวดเร็วเมื่อเกิดการรบกวนการทำงาน (Disturbances) การทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว สามารถพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย วงจร VCO (Voltage Conversion Oscillator) วงจรขับ วงจรคอนเวอร์เตอร์ วงจร optocoupler แล้วใช้เทคนิคของ Bode เพื่อออกแบบวงจรควบคุม

เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิดรีโซเนนซ์ กล่าวคือแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกสามารถควบคุมได้ โดยการปรับความถี่ของการสวิตซ์[1] ซึ่งในการควบคุมจำเป็นต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนเวอร์เตอร์ จึงได้มีผู้ทำงานวิจัยในการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนเวอร์เตอร์ชนิดรีโซเนนซ์บ้างแล้ว [2][3] การวิเคราะห์ในงานวิจัยเหล่านี้มีความซับซ้อนมาก และใช้เวลานานในการวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอน โดยการจำลองการรบกวนการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ ด้วยสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก (Small Signal) ด้วยโปรแกรม PSpice แล้วผลที่ได้มาแสดงด้วยกราฟการตอบสนองทางความถี่ หลังจากนั้นก็ประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยการฟิตรวมด้วยกราฟ Curve Fitting ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ก็จะถูกนำไปออกแบบวงจรควบคุมต่อไป รูปที่ 2 แสดงบล็อกไดอะแกรมแบบสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุม เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 1 โครงสร้างเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมแบบสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุม เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

PE34

2. การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณของขนาดเล็ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณขนาดเล็ก ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ โดยไม่รวมวงจรควบคุม ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจำลองแบบด้วยโปรแกรม PSpice ตามรูปที่ 3 โดยการรวมกันด้วยสัญญาณขนาดเล็กที่จุดทำงานจุดหนึ่งซึ่งทางเข้าของ VCO ตามสมการที่ (1)(2) แล้ววัดสัญญาณที่ทางออกตามสมการที่ (3)(4) แล้วทำการเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณระหว่าง $|v_c| > A_c$ กับ $|v_c| > A_{out}$ ดังแสดงตามรูปที่ 4 การเปรียบเทียบกระทำโดยมีการเปลี่ยนความถี่ของ v_c ทำให้ได้ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนจากการจำลองดังกราฟตามรูปที่ 5 หลังจากนั้นนำกราฟที่ได้ไปหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร โดยการทำ Curve Fitting

สมการการรวมกันด้วยสัญญาณขนาดเล็ก

$$V_c = V_c + v_c \tag{1}$$

โดยที่

$$v_c = A_c \sin(2\pi f_c) \tag{2}$$

สมการของสัญญาณขนาดเล็กที่ทางออก

$$V_{out} = V_{out} + v_{out} \tag{3}$$

โดยที่

$$v_{out} = A_{out} \sin(2\pi f_c - \phi) \tag{4}$$

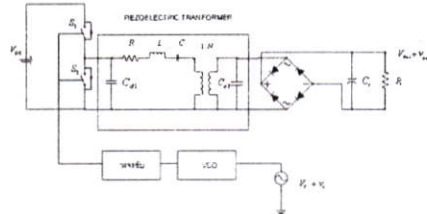
ขนาดของอัตราขยายของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ โดยไม่รวมวงจรควบคุม

$$|G_p(s)| = \frac{A_{out}}{A_c} \tag{5}$$

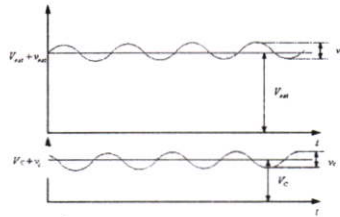
$$\angle G_p(s) = \phi \tag{6}$$

โดยที่

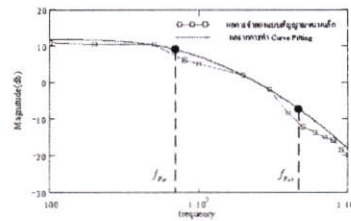
- A_c คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้รวมกัน
- f_c คือความถี่ของสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้รวมกัน
- A_{out} คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กที่ด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ โดยไม่รวมวงจรควบคุม
- ϕ คือมุมของสัญญาณขนาดเล็กที่ด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ โดยไม่รวมวงจรควบคุม



รูปที่ 3 วงจรจำลองสัญญาณขนาดเล็กของฟังก์ชันถ่ายโอนของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบขนาดของ v_c กับ v_{out}



รูปที่ 5 แสดงกราฟของฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรและผลของการทำ Curve Fitting

ผลจากการทำ Curve Fitting ทำให้ได้สมการและค่าแห่งของโพลตามสมการที่ (7)

$$G_p(S) = \frac{K_p}{\left(1 + \frac{S}{2\pi f_{pn}}\right) \left(1 + \frac{S}{2\pi f_{ps}}\right)} \tag{7}$$

โดยที่

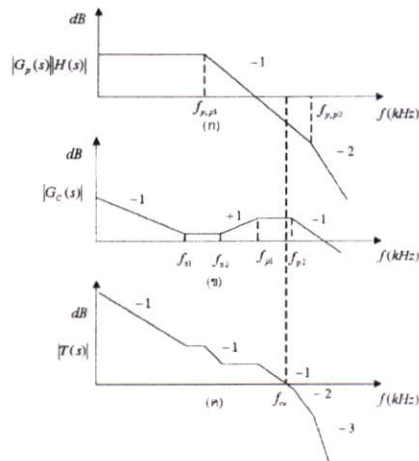
- K_p คืออัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอน
- f_{pn} คือความถี่ที่โพลตำแหน่งที่หนึ่ง
- f_{ps} คือความถี่ที่โพลตำแหน่งที่สอง

PE34

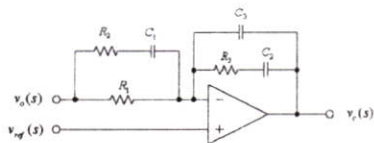
3. การออกแบบวงจรถวลควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของเพียโซอิเล็กทริกทรานซอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์โดยไม่รวมวงจรถวลควบคุมได้จากผลคูณระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถวลกำลัง และฟังก์ชันถ่ายโอนของ Optocoupler $(G_p(s)H(s))$ ในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงด้วยการตอบสนองต่อความถี่ตามรูปที่ 6 (ก) เทคนิคการออกแบบระบบควบคุมแบบ Bode [4] ทำให้ได้กราฟของการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรถวลควบคุมตามรูปที่ 6 (ข) และผลลัพธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของเพียโซอิเล็กทริกทรานซอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่หมด $(T(s))$ แสดงตามรูปที่ 6 (ค)

วงจรถวลควบคุมแบบสามโพลสองซีโรว์ (Three-pole Two-zero Controller Circuit) แสดงดังรูปที่ 7 และแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (8)



รูปที่ 6 กราฟการตอบสนองต่อความถี่ของ (ก) ขนาดของ $G_p(s)H(s)$, (ข) วงจรถวลควบคุม และ (ค) ผลลัพธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของเพียโซอิเล็กทริกทรานซอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ทั้งหมด



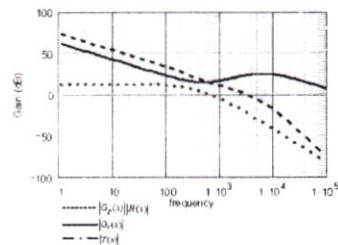
รูปที่ 7 วงจรถวลควบคุมแบบสามโพลสองซีโรว์

$$G_c(s) = \frac{v_o(s)}{v_w(s)} = K_c \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)} \quad (8)$$

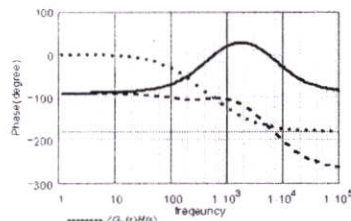
4. ผลการทดลอง

กำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าทางเข้า 50 V และแรงดันไฟฟ้าที่ทางออก 20 V พิสัยของโหลดที่ทดลอง $R_{min} = 500 \Omega \rightarrow R_{max} = 800 \Omega$ กำหนดเงื่อนไขการทำงานของ IC MC34067P (IC สำหรับควบคุมการทำงาน) ดังต่อไปนี้ ค่าเวลา Dead-time = 1.347 us ค่าความถี่ต่ำสุด $f_{min} = 9200$ Hz และ ค่าความถี่สูงสุด $f_{max} = 9300$ Hz [5] คำนวณค่าอุปกรณ์ของวงจรถวลควบคุมด้วยเทคนิคการออกแบบระบบควบคุมแบบ Bode [4] ได้ค่าต่างๆตามรูปที่ 7 คือ $R_1 = 1.2$ k Ω , $R_2 = 130$ k Ω , $C_1 = 220$ nF, $C_2 = 15$ nF, และ $C_3 = 820$ pF

รูปที่ 8 และ 9 แสดงกราฟของ Bode ของขนาดและมุมของ $G_p(s)H(s)$, $G_c(s)$ และ $(G_p(s)H(s)G_c(s))$ ซึ่งสังเกตได้ว่าวงจรถวลควบคุมทำให้ได้ ความถี่ Crossover = 3 kHz, ความชันของขนาดที่ความถี่ Crossover = 20dB/Dec, Phase Margin = 48°



รูปที่ 8 กราฟของ Bode ของขนาดของ $G_p(s)H(s)$, $G_c(s)$ และ $(G_p(s)H(s)G_c(s))$

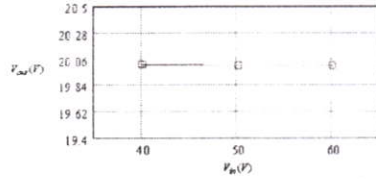


รูปที่ 9 แสดงกราฟของ Bode ของมุมของ $G_p(s)H(s)$, $G_c(s)$ และ $(G_p(s)H(s)G_c(s))$

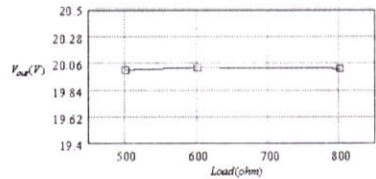
ผลการทดลองได้ทดลองเพียโซอิเล็กทริกทรานซอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ทั้งแบบ Static และแบบ Dynamic รูปที่ 10 และ 11 แสดงผลการทดลองแบบ Static ที่แสดงถึงความสามารถของการควบคุมเมื่อมีการ

PE34

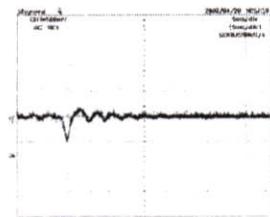
เปลี่ยนแปลงที่แรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าที่โหลด 500 Ω และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดตามลำดับ ส่วนรูปที่ 12 และ 13 แสดงผลการทดลองแบบ Dynamic ขณะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใดจาก 800 Ω → 500 Ω และ 500 Ω → 800 Ω ตามลำดับ



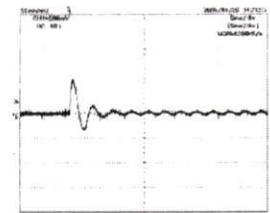
รูปที่ 10 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 11 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อ โหลดที่ทางออกเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 12 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเบิย ไซอเล็กทริกทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดจาก 800Ω → 500 Ω



รูปที่ 13 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเบิย ไซอเล็กทริกทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดจาก 500Ω → 800 Ω

5. สรุป

ผลจากการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณขนาดเล็กของเบิย ไซอเล็กทริกทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม PSpice ทำให้สามารถออกแบบวงจรควบคุมแบบสามโพลสองขีได้ และผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมการทำงานของเบิย ไซอเล็กทริกทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ได้ผลการควบคุมตามต้องการทั้ง Static (Line Regulation และ Load Regulation) และ Dynamic เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง โหลดอย่างทันทีทันใด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือด้านเครื่องมือวัดจากห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] มนพท นาวงษ์, "การประยุกต์ใช้งานของเบิย ไซอเล็กทริกทรานฟอเมอร์ในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิชชิง", EECON-25, p.106-110, 2545.
- [2] VORPERIAN V., "Approximate Small-Signal Analysis of the Series and the Parallel Resonant Converters", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 4, No.1, Jan. 1989.
- [3] FORSYTH A. J., HO Y. K. E., ONG H. M., "Comparison of Small-Signal Modelling Techniques for the Series-Parallel Resonant Converter", IEE Conference Pub. No. 399, Power Electronics and Variable-Speed Drives, 26-28 Oct. 1994.
- [4] กัมดิชา กิตติพิรัช, "การออกแบบวงจรควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิชชิง" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [5] นนทวัฒน์ จุลตะระ ประสิทธิ์ พลหาญ, "การออกแบบวงจรเบิย ไซอเล็กทริกทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิชชิงที่แรงดันไฟฟ้มีค่าเป็นศูนย์", EECON-29, 2549.



นายประสิทธิ์ พลหาญ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยราชธานี ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโทที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ดร. นนทวัฒน์ จุลตะระ การศึกษาระดับปริญญาเอก จาก INSA de Lyon, France ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

PE34

ประวัติผู้เขียน

นายประสิทธิ์ พลหาญ เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ.2523 ที่จังหวัดศรีสะเกษ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชธานี ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2546