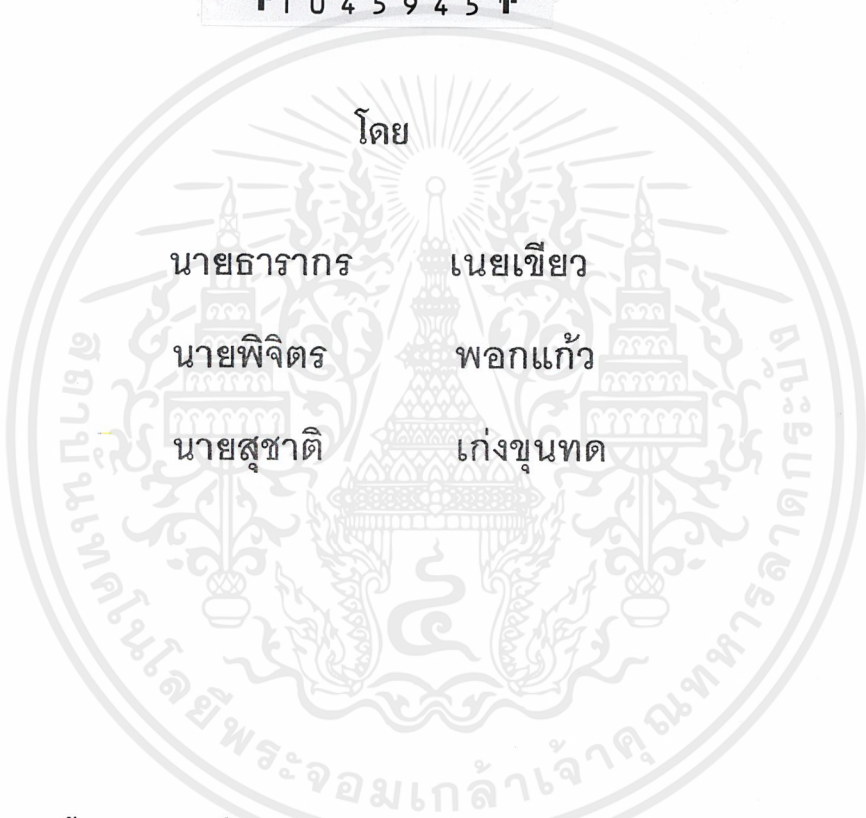


เตาหุงต้มโดยใช้ฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

High Frequency Induction Cooking Using Half – Bridge Series Resonant Inverter



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

๒๐๒
๖ ๖๖๖ ๖

ปีการศึกษา 2544

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 45945
วัน, เดือน, ปี..... 26 ก.พ. 2546

b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไป
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2544

เตาหุงต้มโดยใช้ฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

High Frequency Induction Cooking Using Half – Bridge Series

Resonant Inverter

โดย

นายธรากร

เนยเขียว

นายพิจิตร

พอกแก้ว

นายสุชาติ

เก่งขุนทด

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วิริยะ

พิเชฐจำเริญ

อ.สุรินทร์

คำฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยใช้ฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

ผู้จัดทำ

1. นายธรากร เนยเปีย
2. นายพิจิตร พอกแก้ว
3. นายสุชาติ เก่งขุนทด

..... อาจารย์ปรึกษา
(รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ)

.....
(อ.สุรินทร์ คำฝอย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญภาพประกอบ	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2
2.1. หลักการเรโซแนนซ์	2
2.1.1 เรโซแนนซ์อนุกรม	2
2.1.2 เรโซแนนซ์ขนาน	6
2.2 หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	10
2.2.1 วงจรเทียบเท่าและการวิเคราะห์คุณสมบัติของโหลด	11
2.2.2 การวิเคราะห์การทำงานของระบบ	12
บทที่ 3 โครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง	17
3.1 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองกระแสทางด้านอินพุต	17
3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์	19
3.3 ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์	20
3.3.1 วงจรควบคุม (Control Circuit)	20
3.3.2 วงจรขับเคลื่อน (Drive Circuit)	20
3.4 โหลดรีโซแนนซ์	21
บทที่ 4 ผลการทดลอง	22
4.1 ผลของการเปลี่ยนความถี่	22
4.2 ผลของการเปลี่ยนขดลวด	30
4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ	33
4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดหม้อ	40
4.5 การทดสอบเมื่อไม่มีโหลด	45
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	48
ข้อเสนอแนะในการปรับปรุง	48
ประโยชน์ที่ได้รับ	49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก
กิตติกรรมประกาศ
หนังสืออ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตาหุงต้มโดยใช้ฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

นายธารากร	เนยเขียว	
นายพิจิตร	พอกแก้ว	
นายสุชาติ	เก่งขุนทด	
รศ.ดร. วิริยะ	พิเชษฐจำเริญ	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.สุรินทร์	คำฝอย	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยใช้ฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม รายละเอียดจะประกอบด้วย หลักการให้ความร้อนของภาชนะเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง วงจรสมมูลของขดลวดที่มีภาชนะหุงต้มทำด้วยวัสดุต่าง ๆ กัน การวิเคราะห์วงจรขณะทำงานที่จุดเรโซแนนซ์อนุกรม RLC ของวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดจริง ขณะทำการเปลี่ยนแปลงขนาดและวัสดุของภาชนะที่ใช้เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 2.28 kW และสามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งได้ถึง 40 กิโลเฮิรตซ์

**High Frequency Induction Cooking Using Half – Bridge Series
Resonant Inverter**

Tharakorn , Noeykiaw

Pichit Pokkaew

Suchart Kengkoonthod

Assc.Prof.Dr.Viriya Pichetchumroen Advisor

Surin Khomfoi Advisor

2001

ABSTRACT

This paper presents analysis of high frequency induction cooking using half – bridge series resonant inverter. The detail consists of the principle of heat generation in high frequency induction cooking , equivalent circuit of the heating coil with cooking vessel of different material , circuit analysis under RLC series resonant operation of the half – bridge inverter circuit , various measured voltage and current under the variation of vessel sizes and material. A prototype of the test set is developed with a power level of 2.28 kW and can be operated successfully with switching frequency up to 40 kHz.

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
รูปที่ 1 การพล็อตค่า $+jX_L$ และ $-jX_C$ กับความถี่สำหรับวงจรอนุกรม RLC รีโซแนนซ์	2
รูปที่ 2 อิมพีแดนซ์ กระแสและมุมเฟสกับความถี่และกระแสที่ไหลเมื่อรีโซแนนซ์	3
รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_R V_C และ V_L กับความถี่	4
รูปที่ 4 รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในวงจร LCR รีโซแนนซ์	5
รูปที่ 5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปคลื่นของกระแสที่จุกรีโซแนนซ์ของวงจร LCR ขนาน	6
รูปที่ 6 วงจรปกติของการต่อแบบ LCR ขนาน	7
รูปที่ 7 ค่าอิมพีแดนซ์และกระแสต่อค่าความถี่	8
รูปที่ 8 หลักการทำงานของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ	10
รูปที่ 9 วงจรเทียบเท่าของหม้อแปลง	11
รูปที่ 10 โครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง	13
รูปที่ 11 รูปคลื่นแรงดันและกระแส เมื่อความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์	13
รูปที่ 12 โครงสร้างพื้นฐาน ของเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำ	17
รูปที่ 13 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองกระแส	18
รูปที่ 14 การทำงาน ของชุดอินเวอร์เตอร์	19
รูปที่ 15 การต่อวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์และวงจรขับเคลื่อนกับวงจรอินเวอร์เตอร์	20
รูปที่ 16 โหลดรีโซแนนซ์	21
รูปที่ 17 การต่อวงจรการทดลองที่ 4.1	23
รูปที่ 18 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 40 kHz	23
รูปที่ 19 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 42 kHz	24
รูปที่ 20 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 44 kHz	24
รูปที่ 21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 46 kHz	25
รูปที่ 22 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 48 kHz	25
รูปที่ 23 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 50 kHz	26
รูปที่ 24 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 52 kHz	26
รูปที่ 25 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 54 kHz	27
รูปที่ 26 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 56 kHz	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 27 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 58 kHz	28
รูปที่ 28 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 60 kHz	28
รูปที่ 29 การเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อเปลี่ยนความถี่	29
รูปที่ 30 การต่อวงจรการทดลองที่ 4.2	30
รูปที่ 31 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้ขดลวดขนาด 10 เส้น	31
รูปที่ 32 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้ขดลวดขนาด 15 เส้น	31
รูปที่ 33 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้ขดลวดขนาด 20 เส้น	32
รูปที่ 34 การเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อเปลี่ยนขนาดขดลวด	33
รูปที่ 35 การต่อวงจรการทดลองที่ 4.3	34
รูปที่ 36 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 1 มิลลิเมตร	34
รูปที่ 37 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 2 มิลลิเมตร	35
รูปที่ 38 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 3 มิลลิเมตร	35
รูปที่ 39 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 4 มิลลิเมตร	36
รูปที่ 40 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 5 มิลลิเมตร	36
รูปที่ 41 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 6 มิลลิเมตร	37
รูปที่ 42 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 7 มิลลิเมตร	37
รูปที่ 43 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 8 มิลลิเมตร	38
รูปที่ 44 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 9 มิลลิเมตร	38
รูปที่ 45 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 10 มิลลิเมตร	39
รูปที่ การเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ	40
รูปที่ 47 การต่อวงจรการทดลองที่ 4.4	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 48 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้หม้อเบอร์ 18	42
รูปที่ 49 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้หม้อเบอร์ 20	42
รูปที่ 50 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้หม้อเบอร์ 22	43
รูปที่ 51 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้หม้อเบอร์ 24	43
รูปที่ 52 การเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อเปลี่ยนขนาดหม้อ	44
รูปที่ 53 การต่อวงจรการทดลองที่ 4.5	45
รูปที่ 54 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อมีโหลด	46
รูปที่ 55 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อไม่มีโหลด	46
รูปที่ 56 รูปคลื่น กระแสและแรงดันขาเข้า ที่ใช้ในการทดลอง	47

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะ ($f = 20 \text{ kHz}$)	12
ตารางที่ 2 ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงความถี่	29
ตารางที่ 3 ผลการทดลองเปลี่ยนขนาดขดลวด	32
ตารางที่ 4 ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหม้อกับขดลวด	39
ตารางที่ 5 ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงขนาดหม้อ	44



บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบัน อุปกรณ์ที่ให้ความร้อนในการหุงต้มมีอยู่มากมายหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นการใช้หลอดเปล่งแสงให้ความร้อนหรือขดลวดให้ความร้อนก็ตาม ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ความก้าวหน้าทางด้านอุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ และระบบควบคุมได้พัฒนาไปมาก ซึ่งรวมถึงการวิจัยและพัฒนา วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ที่สามารถจ่ายโหลดความร้อนเหนี่ยวนำด้วยเพาเวอร์ในระดับสูง ๆ โดยจะเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ MOSFET และ IGBT ซึ่งมีความไวในการสวิตช์สูง ทำให้อุปกรณ์ LC ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งอาศัยหลักการเรโซแนนซ์มีขนาดเล็กลงนี้ น้ำหนักเบาและจ่ายกำลังไฟฟ้าในระดับสูงขึ้นได้ เป็นผลให้อินเวอร์เตอร์ที่พัฒนาในระยะหลังนี้มีประสิทธิภาพสูง

เตาหุงต้มเหนี่ยวนำเป็นอีกวิธีหนึ่ง ที่ใช้หลักการสร้างความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยใช้อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม ซึ่งจะใช้สถานะในการหุงต้มเป็นโหลด ถึงแม้ว่าเตาหุงต้มเหนี่ยวนำนี้จะมีการลงทุนเริ่มต้นสูง เมื่อเปรียบเทียบกับเตาที่ใช้อยู่ในปัจจุบันก็ตาม แต่มีข้อดีหลายประการคือ สะอาด ปลอดภัย น้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพสูง โดยทั่วไปแล้วเตาหุงต้มเหนี่ยวนำนี้จะใช้กับสถานะที่ทำด้วยสาร ferro – magnetic เช่น เหล็ก สแตนเลส ที่มีสภาพความนำและความซึมซาบแม่เหล็กสูง ส่วนสถานะที่ทำด้วยสาร non ferro – magnetic เช่น อลูมิเนียม จะต้องมีการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกันออกไป เพราะมีค่าสภาพความนำและความซึมซาบแม่เหล็กต่ำ เป็นผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน เมื่อใช้ขดลวดเหนี่ยวนำเดียวกัน ดังนั้น การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำในกรณีหลังจึงต้องมีลักษณะแตกต่างกันไปจากกรณีแรกโดยสิ้นเชิง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. หลักการรีโซแนนซ์

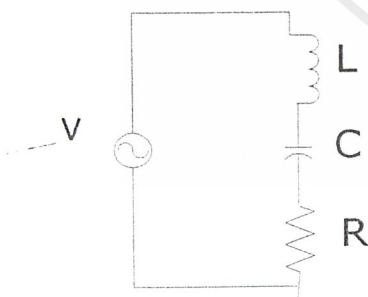
เมื่อเราปรับความถี่ที่ป้อนให้กับวงจรอนุกรม RLC จะพบว่าที่ความถี่ค่าหนึ่ง ค่า X_L จะเท่ากับ X_C เป็นผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวงจร RLC มีค่าต่ำที่สุด นั่นคือ $Z = R$ ในสถานะเช่นนี้ เราเรียกว่าอยู่ในสถานะรีโซแนนซ์ ค่าความถี่ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความถี่ รีโซแนนซ์ (Resonance Frequency) เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำสุด กระแสที่ไหลในวงจรจึงมีค่ามากที่สุดและเป็นผลให้แรงดันที่ตกคร่อม L และ C มีค่าเพิ่มขึ้น

วงจรขนาน LC ก็สามารถที่ทำให้อยู่ในสถานะรีโซแนนซ์ได้เช่นกัน และ X_L จะเท่ากับ X_C ในขณะที่ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่ามากที่สุด และส่งผลให้กระแสมีค่าน้อยที่สุด แต่กระแสที่ไหลวนในลูป (LOOP) ของ L และ C จะมีค่ามากขึ้น วงจรสามารถปรับให้ รีโซแนนซ์ ได้โดยการปรับค่า L และ C

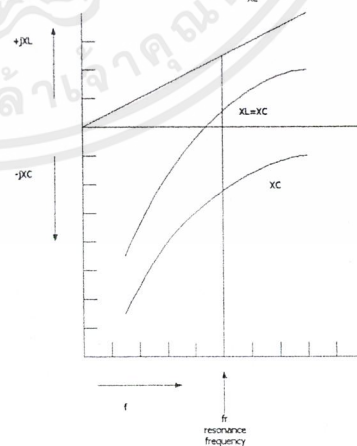
2.1.1 รีโซแนนซ์อนุกรม

ผลของความถี่ที่มีต่ออิมพีแดนซ์ของวงจรอนุกรม RLC จะแสดงค่าดังนี้

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.1)$$



ก) วงจรอนุกรม RLC



ข) X_L , X_C เมื่อพล็อตกับความถี่

รูปที่ 1 การพล็อตค่า $+jX_L$ และ $-jX_C$ กับความถี่สำหรับวงจรอนุกรม RLC รีโซแนนซ์

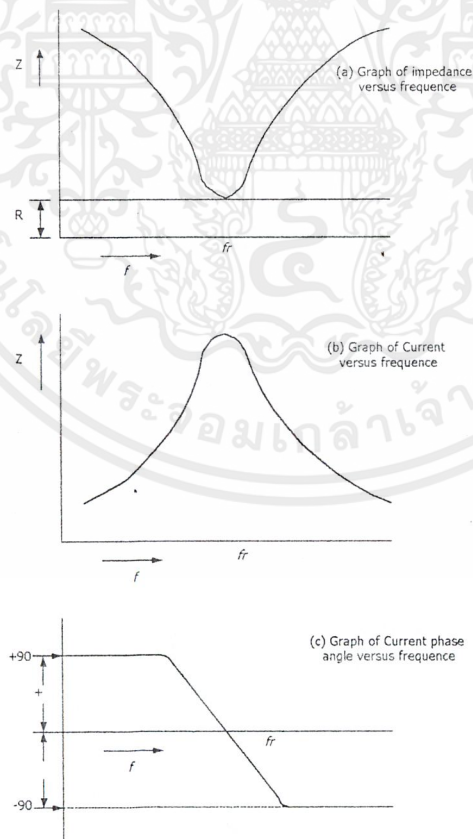
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่า $X_L = 2\pi fL$ และ $X_C = 1/(2\pi fc)$ ดังนั้นค่าของอิมพีแดนซ์จึงขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ ดังรูปที่ 1 ข.) จะพบว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า X_L เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น (Linear) ในทางกลับกัน X_C จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่ค่า X_C จะไม่มีทางเท่ากับศูนย์ ผลรวมของรีแอกแตนซ์คือ $X_L - X_C$ ดังแสดงไว้เป็นเส้นประในกราฟของรูปที่ 1 ข.) ที่ความถี่ต่ำ ค่า X_L จะมีค่าน้อยกว่าค่า X_C ดังนั้นผลรวมของรีแอกแตนซ์จะเป็นค่าของ X_C ที่ความถี่สูง $X_L = X_C$ คือค่าที่ความถี่รีโซแนนซ์

$$Z = R + j(0) \quad (2.2)$$

$$Z = R$$

เมื่อ $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ นำมาเขียนเป็นกราฟที่แปรผันตามความถี่ จะได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟอิมพีแดนซ์กระแสและมุมเฟสกับความถี่และกระแสที่ไหลเมื่อรีโซแนนซ์ ($X_L = X_C$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.3)$$

จากรูปที่ 2 จะพบว่ากราฟจะมีค่าต่ำเมื่อความถี่ในวงจรไม่อยู่ที่จุดรีโซแนนซ์
ที่ความถี่รีโซแนนซ์

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.4)$$

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.5)$$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.6)$$

ดังนั้น เมื่อ L มีหน่วยเป็นเฮนรี่ (henrys), C มีหน่วยเป็นฟารัด (farads)

F มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz)

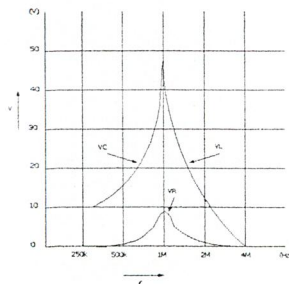
แรงดันที่จุดรีโซแนนซ์

แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานในวงจร LCR (รูปที่ 1 ก.) จะมีค่าเท่ากับ $I \times R$ และที่จุดรีโซแนนซ์ แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าดังนี้

$$V_C = I X_C \quad (2.7)$$

$$V_L = I X_L \quad (2.8)$$

เมื่อนำค่า V_R , V_C และ V_L มาพล็อตกราฟกับค่าความถี่ จะพบว่ามีลักษณะคล้ายกับกราฟของกระแสกับค่าความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_R , V_C และ V_L กับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่ส่งผ่านระหว่าง L และ C



ก) รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรม

ของวงจร LCR รีโซแนนซ์

ข) รูปคลื่นแรงดัน V_R , V_C และ V_L

ที่จตุรีโซแนนซ์

รูปที่ 4 รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในวงจร LCR รีโซแนนซ์

เมื่อเรานำรูปคลื่นของ V_R , V_C และ V_L ที่จตุรีโซแนนซ์มาพล็อต ดังรูปที่ 4 ก.) จะพบว่า V_L จะกลับเฟสกัน 180 องศา ส่วน V_R จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ V_C และ V_L มีค่าเท่ากับศูนย์ จากที่กล่าวมานี้ แสดงให้เห็นว่าจะมีการส่งผ่านพลังงานระหว่าง L กับ C กลับไปมา เมื่ออยู่ในสภาวะรีโซแนนซ์ อย่างไรก็ตาม ที่จตุรีโซแนนซ์จะไม่มีกระแสสมพลังงาน

Q แฟกเตอร์ของวงจรอนุกรม RLC

พิจารณาสมการ I , V_C , V_L ที่จตุรีโซแนนซ์

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.9)$$

$$V_L = IX_L \quad (2.10)$$

ดังนั้น

$$V_L = \frac{V \times X_L}{R} \quad (2.11)$$

$$\frac{V_L}{V} = \frac{X_L}{R} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

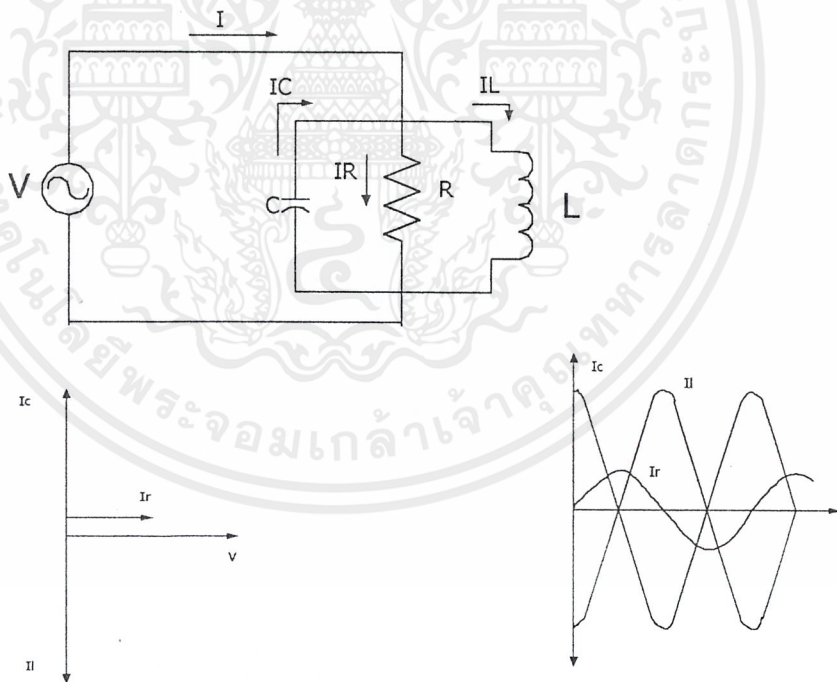
อัตราส่วน $\frac{V_L}{V}$ และ $\frac{V_C}{V}$ คือค่าควอลิตี้ (Quality) ของวงจรรีโซแนนซ์หรือค่า Q แฟกเตอร์นั่นเอง

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.13)$$

2.1.2 รีโซแนนซ์ขนาน

วงจรรีโซแนนซ์ขนานแสดงไว้ดังรูป ค่าแอดมิตแตนซ์ (admittance) ของวงจรมีค่า

$$Y = \frac{1}{R} - j\frac{1}{X_L} + j\frac{1}{X_C} \quad (2.14)$$



Phase diagram for parallel

Waveform of I_c I_r and I_l

รูปที่ 5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปคลื่นของกระแส

ที่จตุรีโซแนนซ์ของวงจร LCR ขนาน

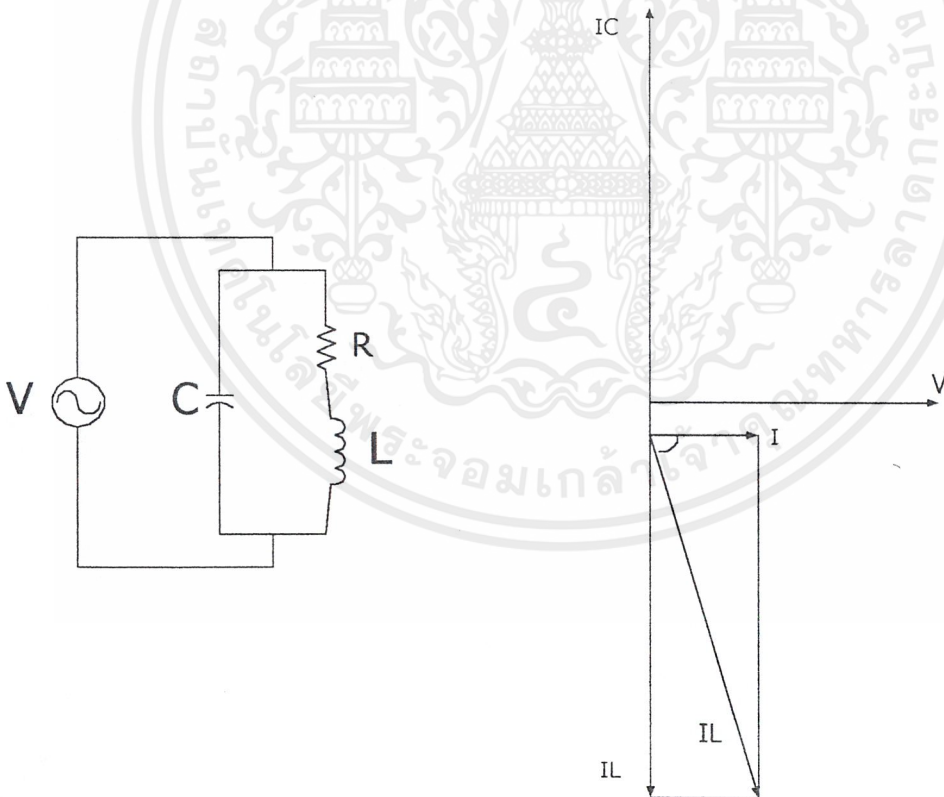
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าปรับความถี่ของแหล่งจ่ายไปจนกระทั่ง X_L และ X_C มีค่าเท่ากัน ค่าแอดมิตแตนซ์ จะมีค่า

$$Y = \frac{1}{R_p} \quad (2.15)$$

และค่าอิมพีแดนซ์มีค่า $Z = R_p$ กระแสจากแหล่งจ่ายมีค่า

$$I = \frac{V}{R_p} \quad (2.16)$$



รูปที่ 6 วงจรปกติของการต่อแบบ LCR ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสที่ไหลผ่าน R จะมีมูอินเฟสกับแรงดันของแหล่งจ่าย กระแสที่ไหลผ่าน L จะล้าหลังแรงดันไป 90 องศา ส่วนกระแสที่ไหลผ่าน C จะนำหน้าแรงดันอยู่ 90 องศา ดังแสดงไว้ในรูป คือมีการส่งผ่านพลังงานกลับไปมาระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

เนื่องจากในความเป็นจริงในตัวเหนี่ยวนำ จะมีค่าความต้านทานรวมอยู่ด้วย โดยทั่วไปที่ตัวเก็บประจุมีความต้านทานอยู่น้อยมาก จึงเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 6

ค่าแอดมิตแตนซ์ของวงจรสมมูลมีค่า

$$Y = \frac{1}{R_L + jX_L} + \frac{1}{jX_C} \quad (2.17)$$

ที่จุกรีโซแนนซ์

$$X_C = \frac{R_L^2 + X_L^2}{X_L} \quad (2.18)$$

$$Z = \frac{L}{CR_L} \quad (2.19)$$



ก) ค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่

ข) ค่ากระแสกับความถี่

รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และกระแสต่อค่าความถี่

จากกราฟรูปที่ 7 จะพบว่าวงจรขนาน LC จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดที่ความถี่รีโซแนนซ์

Q แฟกเตอร์ของวงจรขนาน RLC

จากรูปที่ 5 จะพบว่าผลความของกระแสที่ไหลในวงจร (I) จากแหล่งจ่ายที่ความถี่รีโซแนนซ์นั้น จะอินเฟสกับแรงดันของแหล่งจ่าย (V) I จะมีค่าน้อยกว่า IC และ IL หลายเท่า ดังนั้นในวงจรขนานรีโซแนนซ์ LC จะมีค่าการขยายกระแส ค่า Q แฟกเตอร์คือค่าอัตราส่วนของ IL หรือ IC ต่อค่ากระแสจากแหล่งจ่าย (I)

ความถี่ที่จตุรีโซแนนซ์ จากค่า

$$X_C = \frac{R_L^2 + X_L^2}{X_L} \quad (2.20)$$

ดังนั้น

$$X_C \approx X_L \quad (2.21)$$

$$fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.22)$$

ซึ่งค่าความถี่ที่จตุรีโซแนนซ์ สำหรับวงจรขนาน LC เมื่อ $Q > 10$ คือในกรณีที่ $Q < 10$ ความถี่ที่จตุรีโซแนนซ์จะมีค่า

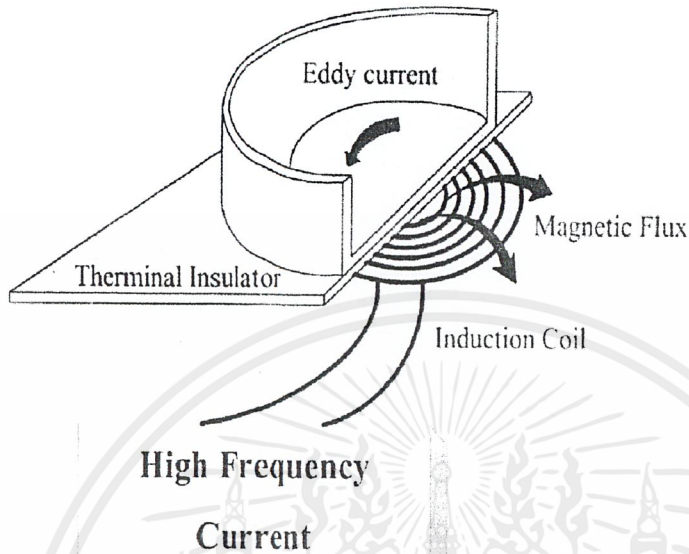
$$fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{CR_L^2}{L}} \quad (2.23)$$

จากรูปที่ 7 จะพบว่าวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานทางปฏิบัติ นั้น จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงสุด และกระแสมีค่าสูงสุดที่ความถี่รีโซแนนซ์

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่า การทำงานที่จตุรีโซแนนซ์จะให้ค่ากำลังที่สูงที่สุด (Pmax) เนื่องจากจะให้ค่ากระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำได้สูงสุด ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนในที่บริเวณกันหุ้ม เพื่อทำให้เกิดความร้อนให้ได้มากที่สุด จนสามารถต้มน้ำโดยใช้เวลาในการต้มให้น้อยที่สุด ซึ่งสามารถทำได้โดยการทำให้ความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์ และความถี่ของวงจรตรงส่วนโหลดมีค่าตรงกัน โดยที่ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำในวงจร จะมาจากผลของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก และกันหุ้ม ส่วนตัวเก็บประจุที่ใส่เพิ่มเข้าไปก็เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวงจรให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 8 หลักการทำงานของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ

หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำก็คือ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนในภาชนะหุงต้ม ซึ่งจะเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อน ดังรูปที่ 8 ความร้อนส่วนมากจะเกิดขึ้นในชั้นความลึกผิวที่มีความหนาเท่ากับ δ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของภาชนะหุงต้มดังสมการ (24)

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \times 10^{-7}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.24)$$

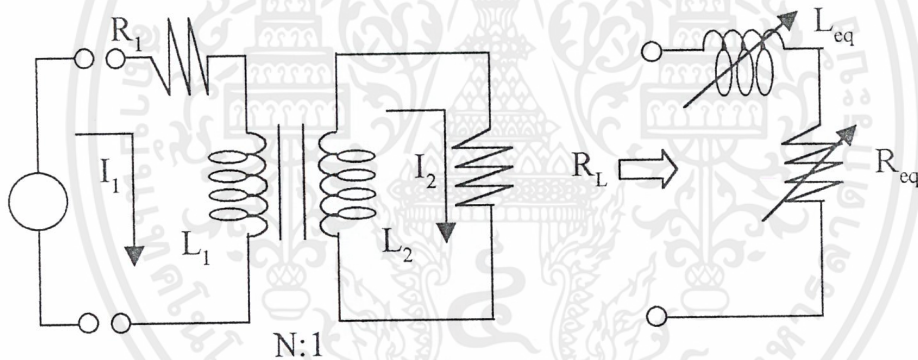
โดยที่ μ_r = ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก
 ρ = สภาพความต้านทานของภาชนะ
 f = เป็นความถี่กระแสไฟฟ้าสลับที่ป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1. วงจรเทียบเท่าและการวิเคราะห์คุณสมบัติของโหลด

โครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำจะคล้ายกับกรณีหม้อแปลง ซึ่งมีขดลวดทางด้านปฐมภูมิเท่ากับขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในรูปที่ 8 ส่วนขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะเป็นขดลวดเพียงรอบเดียว ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งเป็นวงจรเทียบเท่าของหม้อแปลงที่สามารถเขียนแทนด้วยอินดักแตนซ์เทียบเท่า (L_{eq}) และความต้านทานเทียบเท่า (R_{eq}) พารามิเตอร์ของอินดักแตนซ์ และความต้านทานเทียบเท่าของโหลดจะขึ้นกับหลายตัวแปรด้วยกัน เช่น รูปร่างของภาชนะ ช่องว่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะ ความซึมซาบแม่เหล็กและสภาพความต้านทานของภาชนะ และความถี่กระแสไฟฟ้าที่ป้อน

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของโหลดของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำนี้ ขดลวดเหนี่ยวนำและภาชนะหุงต้ม สามารถเขียนแทนด้วยวงจรรอนุกรมเทียบเท่าซึ่งประกอบด้วย อินดักแตนซ์เทียบเท่า (L_{eq}) และความต้านทานเทียบเท่า (R_{eq}) ดังสมการ



รูปที่ 9 วงจรเทียบเท่าของหม้อแปลง

$$L_{eq} = L_1 + N^2 \cdot L_2 \quad (2.25)$$

$$R_{eq} = R_1 + N^2 \cdot R_L \quad (2.26)$$

โดยที่ N = จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

R_1, R_L = ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

L_1, L_2 = อินดักแตนซ์ของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะ ($f = 20 \text{ kHz}$)

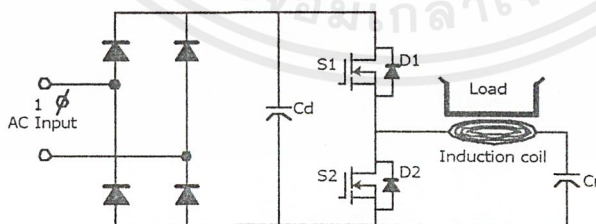
Parameter	Stainless	Aluminum
Resistivity ($\Omega\text{-m}$) : ρ	60×10^{-8}	2.8×10^{-8}
Relative permeability : μ_r	100	1
Skin depth (mm) : δ	0.28	0.60
Surface resistivity ($\Omega\text{-m}$) : R_L	22×10^{-4}	0.47×10^{-4}

ความต้านทานทางค้ำทุติยภูมิ (R_L) สามารถหาได้จากความลึกผิวหน้าของกระแสไหลวนในภาชนะหุ้มค้ำ ดังสมการ (27) ส่วนเพาเวอร์เอ๊าท์พุทสามารถเขียนแทนได้ด้วยความสัมพันธ์ของความต้านทานและกระแสดังสมการ (28)

$$R_L = \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}} \sqrt{\rho\mu_r f} \cdot \text{และ} \cdot I_2 = NI_1 \quad (2.27)$$

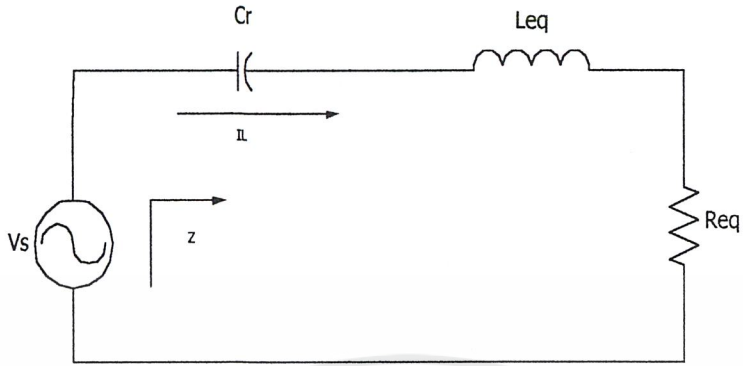
$$P = \sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}} \cdot (NI_1)^2 \cdot \sqrt{\rho\mu_r f} \quad (2.28)$$

2.2.2. การวิเคราะห์การทำงานของระบบ



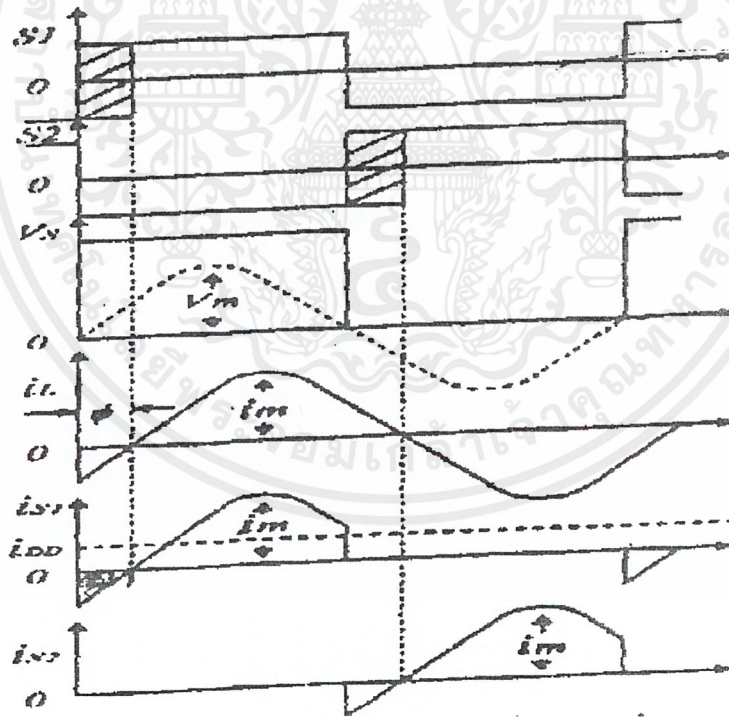
ก) ระบบการทำงานของฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) วงจรเทียบเท่า

รูปที่ 10 โครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง



รูปที่ 11 รูปคลื่นแรงดันและกระแส เมื่อความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง ที่ใช้ฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม สามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 10 ซึ่งใช้ MOSFET เป็นสวิตช์ S1 และ S2 ทำงานสลับกัน ฟรีวีลไดโอด D1 และ D2 จะอยู่ภายในมอสเฟสและต่อขนานกลับทิศทางกับ S1 และ S2 $C_r/2$ เป็นเรโซแนนซ์คาปาซิเตอร์ ส่วนอินดักแตนซ์เทียบเท่า (L_{eq}) และความต้านทานเทียบเท่า (R_{eq}) จะใช้เขียนแทนขดลวดเหนี่ยวนำและภาชนะหุงต้ม เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหา Reverse Recovery ของไดโอดขณะทำงานที่ความถี่สูง จุดการทำงานจะเลือกให้มีความถี่สวิตช์ซึ่งสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ กระแสไหล (i_L) จะล่าหลังแรงดันคร่อมสวิตช์ (V_s) ดังรูปที่ 11 การสลับเปลี่ยนการทำงานของสวิตช์ S1 และ S2 จะใช้หลักการให้สวิตช์ที่นำกระแสอยู่ก่อนหน้านั้น หยุดทำงานก่อนแล้วจึงให้สวิตช์ตัวใหม่เริ่มนำกระแส เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจรที่ DC-Link เนื่องจากวงจรที่ออกแบบนี้ ตำแหน่งการสวิตช์ซึ่งของสวิตช์ทั้งสองจะกระทำที่ Zero Voltage (ZVS) จึงทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสมีค่าต่ำ

หลักการทำงานของฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม สามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะคลื่นต่าง ๆ ดังรูปที่ 11 แรงดันอินพุทของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเป็น รูปคลื่นสี่เหลี่ยม (V_s) และมี quality factor Q ของวงจรเรโซแนนซ์สูง ($Q \geq 2.5$) ทำให้กระแสไหลเป็นรูปคลื่นซายน์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ห้วงจรทั้งระบบได้ดังต่อไปนี้

อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ (Z)

$$Z = R_{eq} + j \left[\omega_s \cdot L_{eq} - \frac{1}{\omega_s \cdot C_r} \right]$$

$$= R_{eq} \cdot \sqrt{1 + Q^2 \cdot \left[\omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right]^2} \angle \phi \quad (2.30)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[Q \cdot \left[\omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right] \right]$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} \cdot C_r}} \quad : \text{ resonant frequency}$$

$$\omega_n = \frac{\omega_s}{\omega_r} \quad : \text{ normalized switching frequency}$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_{eq}}{C_r}} \quad : \text{ characteristic impedance}$$

$$Q = \frac{\omega_r \cdot L_{eq}}{R_{eq}} \quad : \text{ quality factor}$$

รูปคลื่น fundamental ของแรงดันคร่อมสวิตช์ (V_s) สามารถวิเคราะห์ได้โดยการแตกอนุกรม Fourier จะได้ดังสมการ

$$V_s = V_m \cdot \sin \omega_s t \quad \text{เมื่อ } 0 < \omega_s t < 2\pi \quad (2.31)$$

$$\text{โดยที่ } V_m = \frac{2 \cdot V_d}{\pi} \approx 0.637 \cdot V_d$$

กระแสไหลค (i_L)

$$i_L = I_m \cdot \sin(\omega_s t - \phi) \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$I_m = \frac{V_m}{|Z|}$$

ดังนั้นจะได้ เอาท์พุทที่จ่ายให้โหลดคือ

$$P_{out} = \frac{I_m^2 \cdot R_{eq}}{2} \quad (2.33)$$

$$= \frac{2 \cdot V_d^2}{\pi^2 \cdot R_{eq} \cdot \left(1 + Q^2 \cdot \left[\omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right]^2 \right)}$$

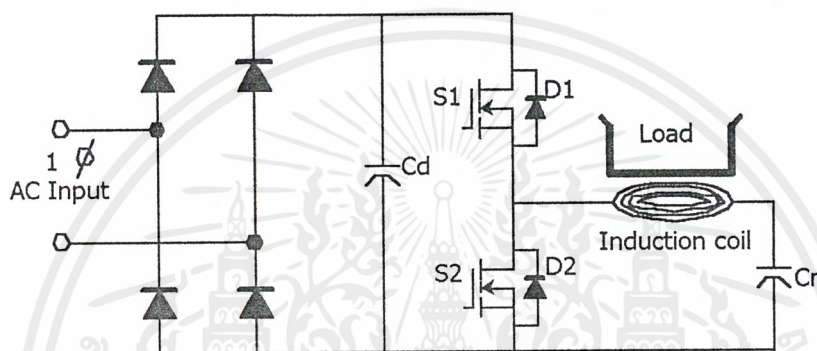
$$= \frac{2 \cdot V_d}{\pi \cdot R_{eq} \cdot \sqrt{1 + Q^2 \cdot \left[\omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right]^2}} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

โครงสร้างของเตาหุงต้มความถี่สูงแบบเหนี่ยวนำ

โครงสร้างพื้นฐานของวงจรให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแสดงดังรูป



รูปที่ 12 โครงสร้างพื้นฐาน ของเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำ

จากรูปของวงจรประกอบด้วยส่วนประกอบ 5 ส่วนคือ

1. วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองกระแสทางด้านอินพุต (Rectifier and Filter)
2. วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)
3. วงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์
4. โทลครีโซแนนซ์

3.1 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองกระแสทางด้านอินพุต

วงจรเรียงกระแส (Rectifier) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ไดโอดเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier) ส่วนวงจรกรองแรงดันทางด้านอินพุต จะใช้ตัวเก็บประจุกรองไฟตรงให้เรียบ และช่วยให้กระแสมีค่าเพียงพอดตามที่อินเวอร์เตอร์ต้องการ โดยการลดแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage) ซึ่งอาศัยการชาร์จและการคายประจุ ดังนั้น สามารถหาค่าของตัวเก็บประจุได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

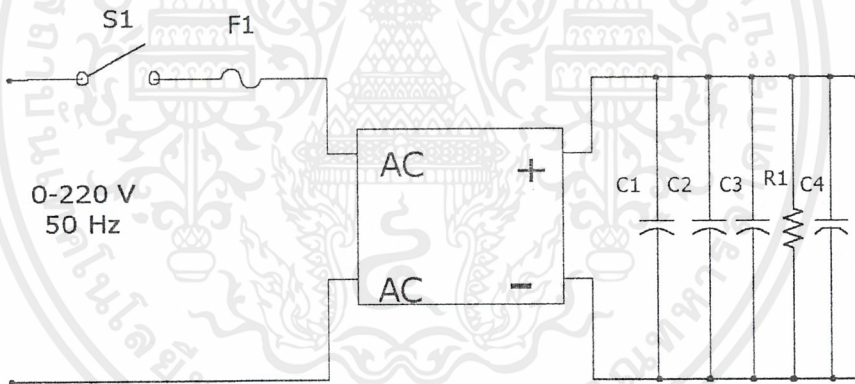
$$C_{filter} = \frac{I_{o_{ton(max)}}}{V_r} \quad (3.1)$$

โดย I_o คือ กระแสประสิทธิผลของวงจรเรียงกระแส (แอมแปร์)

$ton(max)$ คือ ช่วงเวลาที่ C คายประจุ (วินาที)

V_r คือ ค่ายอดถึงยอดของแรงดันกระเพื่อมที่เอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส (V_{pp})

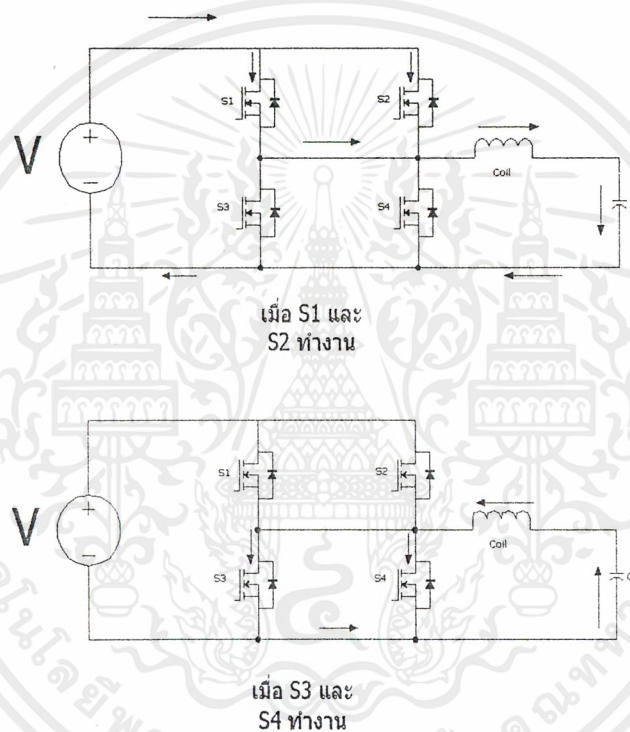
จากสมการที่ 3.1 เมื่อค่า C มีค่ามากขึ้น ทำให้แรงดันกระเพื่อมมีค่าน้อยลง ดังนั้น ชนิดและขนาดของตัวเก็บประจุจึงมีผลกับการกระเพื่อม (Ripple Voltage) ของแรงดันไฟตรงได้ โดยปกติการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย ยอมให้วงจรเรียงกระแสมีค่าแรงดันกระเพื่อมไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 13 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองกระแส

3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแบบฮาฟบริดจ์ (Half-bridge) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง โดยใช้เพาเวอร์มอสเฟต (Power MOSFET) โดยการทำงานของมอสเฟตจะทำงานสลับกันทีละชุด ซึ่งชุดแรก Q_1 และ Q_2 จะทำงานพร้อมกัน และ Q_3 และ Q_4 จะทำงานพร้อมกัน ซึ่งมอสเฟตทั้ง 2 ชุดจะทำงานพร้อมกันไม่ได้ จะต้องทำงานสลับกันไปเรื่อย ๆ



รูปที่ 14 การทำงาน ของชุดอินเวอร์เตอร์

ไดโอดที่คร่อมเพาเวอร์มอสเฟต ทำหน้าที่ฟรีวีลิ่ง (Free Wheeling) คือขณะที่เพาเวอร์มอสเฟต Q_1 และ Q_2 เริ่มหยุดนำกระแส แรงดันจะมีการกลับขั้ว ทำให้ไดโอด D_1 และ D_2 อยู่ในลักษณะไบอัสตรง และมีกระแสส่วนหนึ่งไหลออกจากขดลวด เพื่อป้องกันกระแสส่วนนี้ไหลย้อนกลับเข้ามอสเฟต อาจทำให้มอสเฟตเสียหาย จึงต้องมีไดโอดเป็นทางผ่านของกระแส ซึ่งมอสเฟตเบอร์ IRFP460 ที่ใช้มีไดโอดต่ออยู่ภายในแล้ว

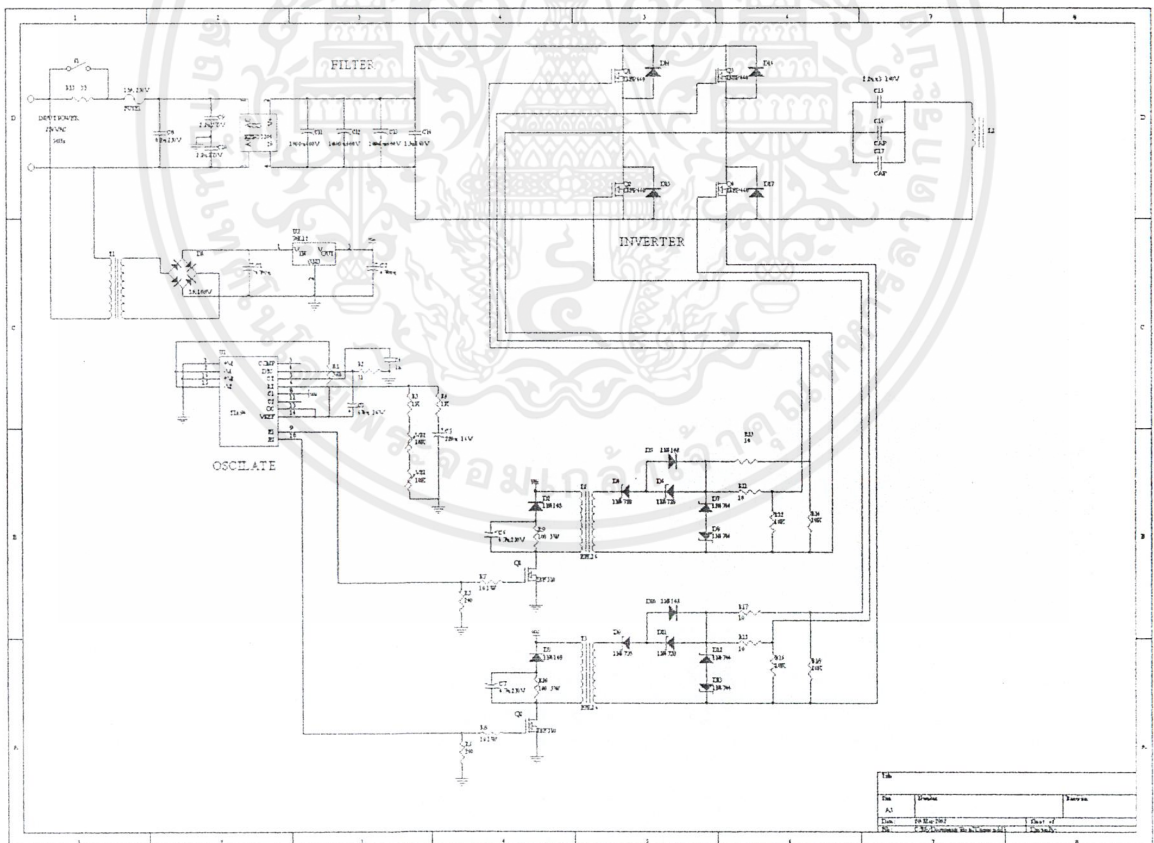
3.3 ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์

3.3.1 วงจรควบคุม (Control Circuit)

วงจรควบคุมจะทำหน้าที่ในการกำเนิดสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยม (Square wave) ซึ่งสัญญาณนี้จะนำไปใช้ในการขับขาเบคของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยเราใช้ไอซีเบอร์ TL494 เป็นไอซีสร้างสัญญาณ 16 ขา ซึ่งสามารถควบคุมได้ทั้งความถี่และเฟส-ชิฟ

3.3.2 วงจรขับเบค (Drive Circuit)

สัญญาณพัลส์ที่ได้จากชุดควบคุมจะนำมาต่อเข้ากับวงจรชุดขับเบค โดยวงจรชุดขับเบคที่เราจะใช้หม้อแปลงแยกกราวน์ เมื่อแยกกราวน์ของสัญญาณทั้ง 2 สัญญาณ จากชุดควบคุมให้เป็นอิสระต่อกัน และมีชุดสแน็บเบอร์เพื่อป้องกันแรงดันสไปร์ของแรงดัน วงจรชุดควบคุมแรงดันและวงจรชุดขับเบคสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 15

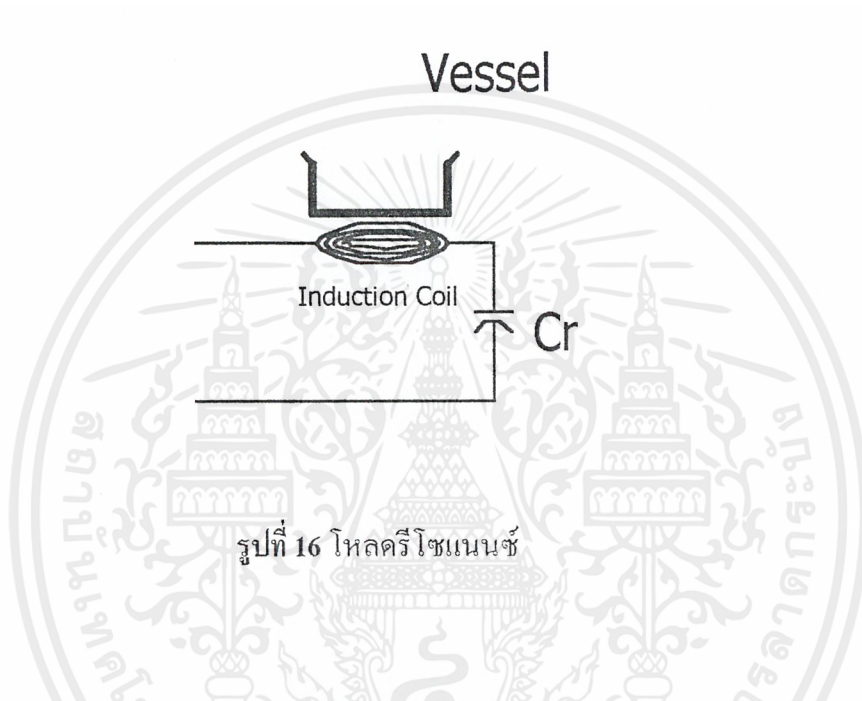


รูปที่ 15 แสดงการต่อวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์และวงจรขับเข้ากับวงจรอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 โหลดรีโซแนนซ์

โหลดรีโซแนนซ์ประกอบด้วย ขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุคเซตตัวประกอบกำลัง Cr ขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้เราใช้ลวดทองแดงเบอร์ 30 จำนวน 20 เส้น มาพันให้เป็นเส้นเดี่ยว แล้วนำมาขดวงกลมให้เป็นแผ่นขดลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 24 นิ้ว ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้กับหม้อเบออร์ขนาดใหญ่



ตัวเก็บประจุคเซตตัวประกอบกำลัง Cr จะต้องเลือกใช้งานได้ที่ความถี่สูง ทนแรงดันได้สูง และจะต้องมีความต้านทานอนุกรมสมมูลต่ำด้วย โดยในการต่อตัวเก็บประจุเราจะต้องอนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีข้อดีคือวงจรที่ขั้วออกของแหล่งจ่ายกำลังจะเป็นวงจร RLC อนุกรม ซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์ห้วงจรและกระแสต้านออกของแหล่งจ่ายกำลังมีค่าสูงกว่าการต่อ RLC แบบขนาน ทำให้กำลังวัตต์ที่ได้มีค่าสูง แต่มีข้อเสียคือกรณีที่ไม่มีโหลดอิมพีแดนซ์ของวงจร RLC อนุกรมจะมีค่าต่ำ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลของการเปลี่ยนความถี่

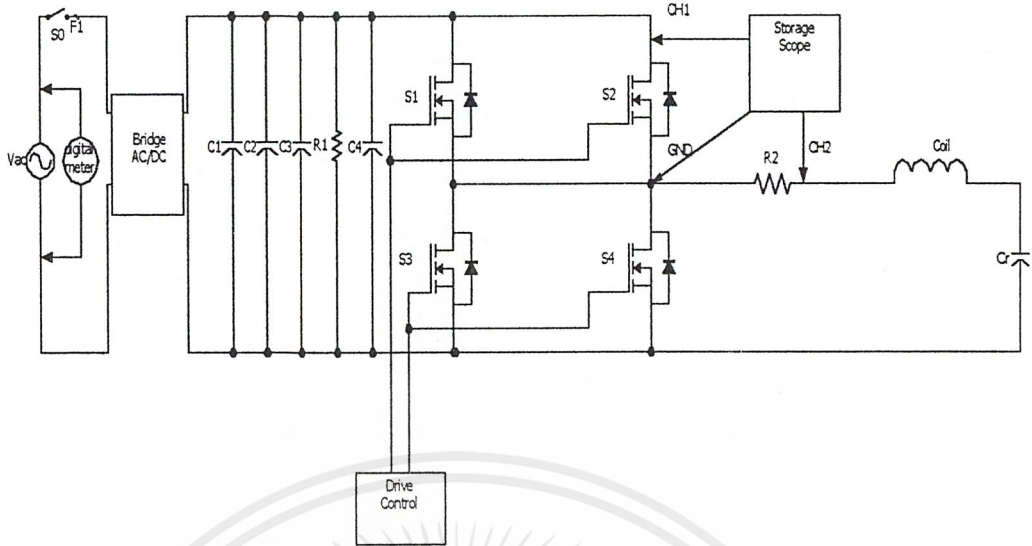
วัตถุประสงค์

-เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ ที่เกิดกับค่าต่างๆ ที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพของเตาหุงต้มความถี่สูง เช่น กระแส โหลด และกำลังไฟฟ้า เพื่อหาขั้นตอนการทำงานที่เหมาะสม อุปกรณ์การทดลอง

1. เตาหุงต้มความถี่สูง
2. Variac
3. Digital Meter
4. Storage Scope
5. หม้อ Stainless เบอร์ 24 บรรจุน้ำ 1.5 ลิตร

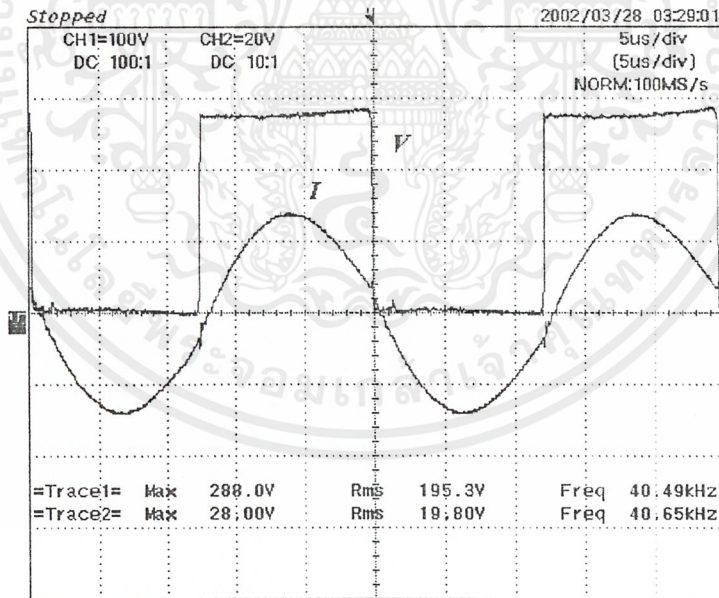
ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อบริเวณและเครื่องวัดต่างๆ ตามรูป
2. นำหม้อที่บรรจุน้ำ 1.5 ลิตร ตั้งบนขดลวด
3. เปิดเครื่องให้แรงดันคงที่
4. ปรับความถี่ที่ 40 kHz
5. บันทึกผลการทดลอง
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-5 โดยเพิ่มความถี่ครั้งละ 2 kHz



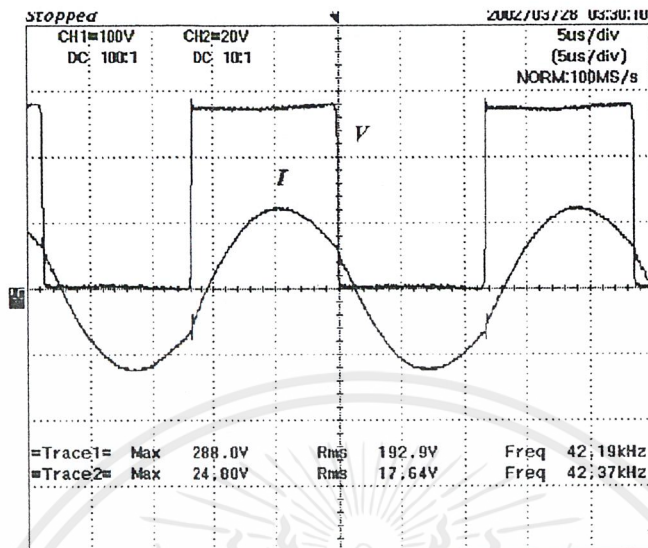
รูปที่ 17 การต่อวงจรการทดลองที่ 4.1

ผลการทดลอง

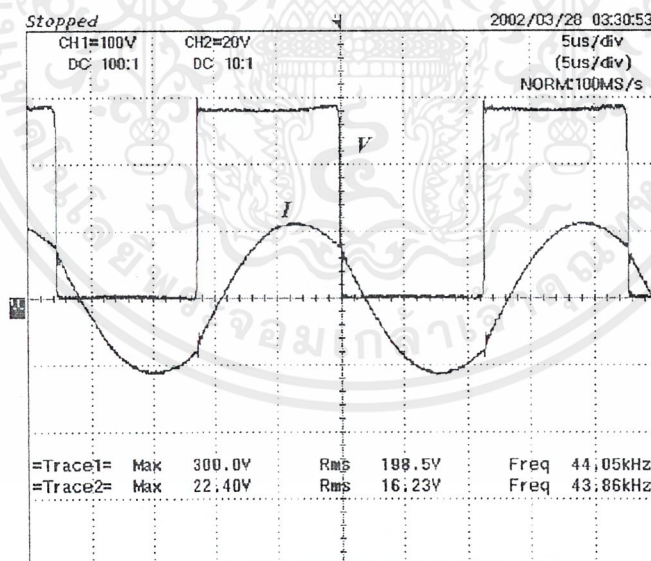


รูป18 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 40 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

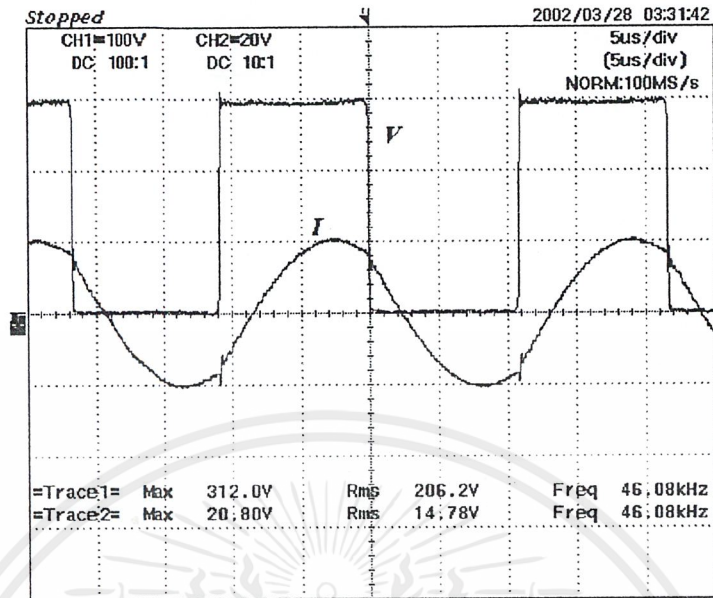


รูปที่ 19 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 42 kHz

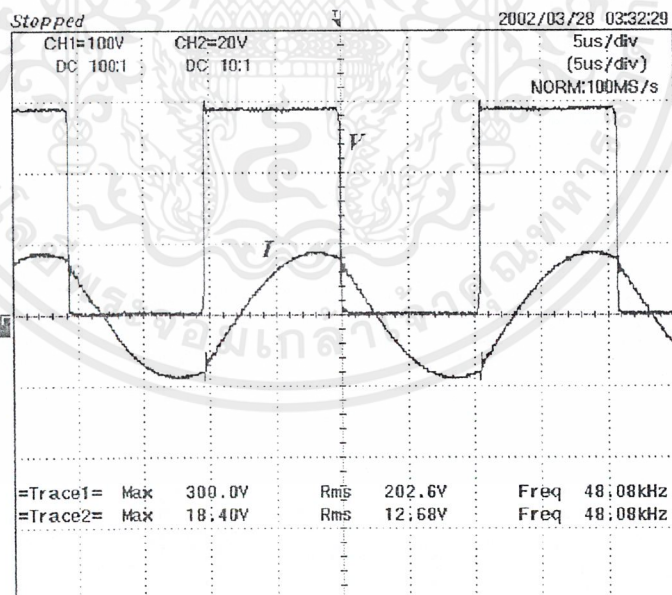


รูปที่ 20 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 44 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

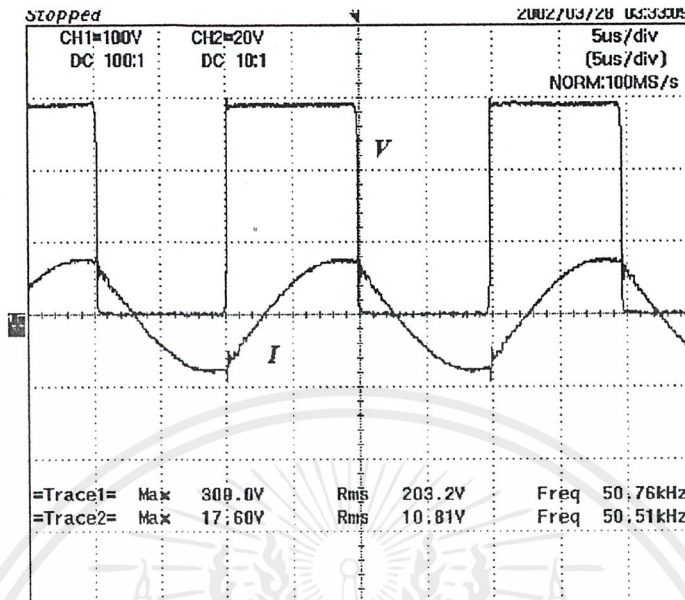


รูปที่ 21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 46 kHz

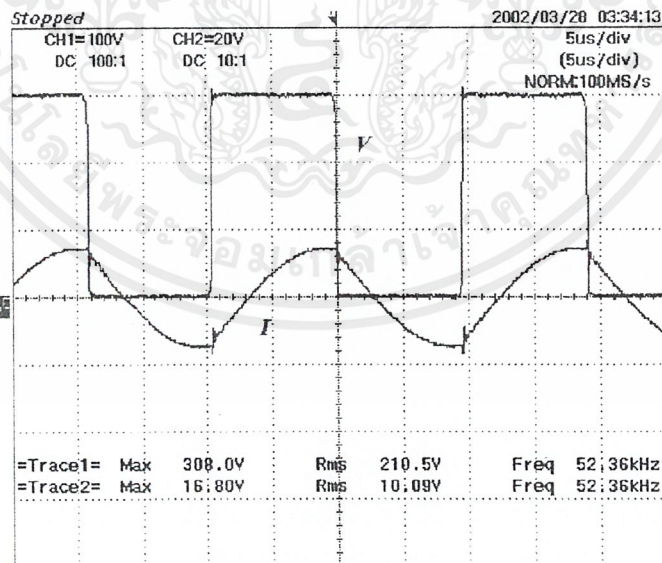


รูปที่ 22 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 48 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

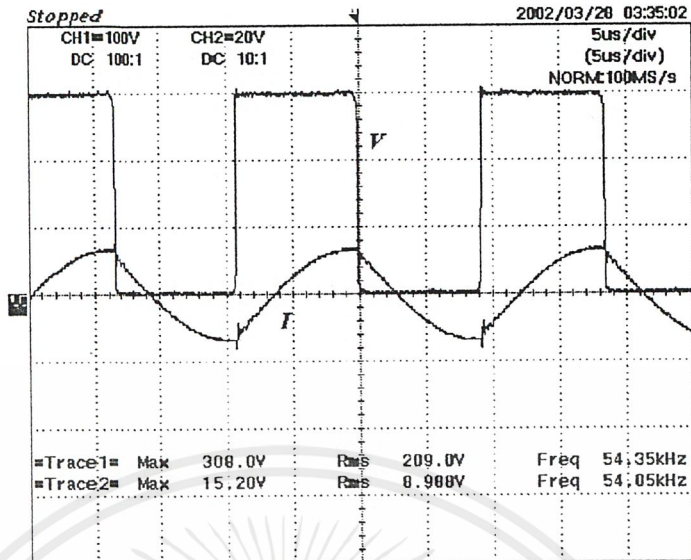


รูปที่ 23 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 50 kHz

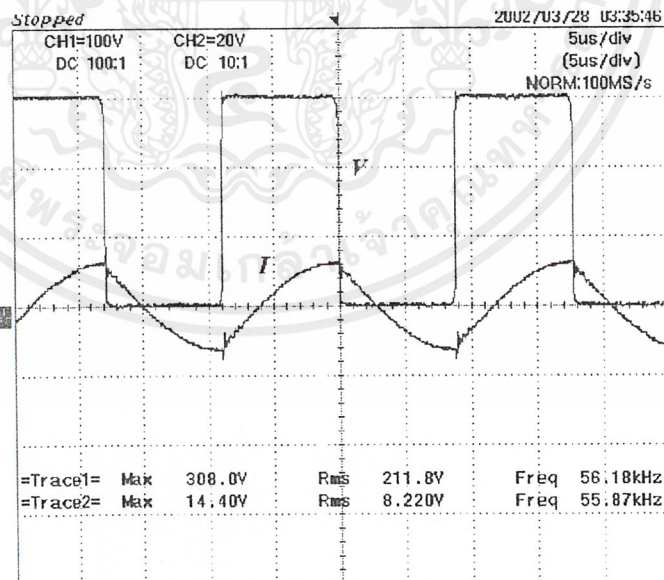


รูปที่ 24 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 52 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

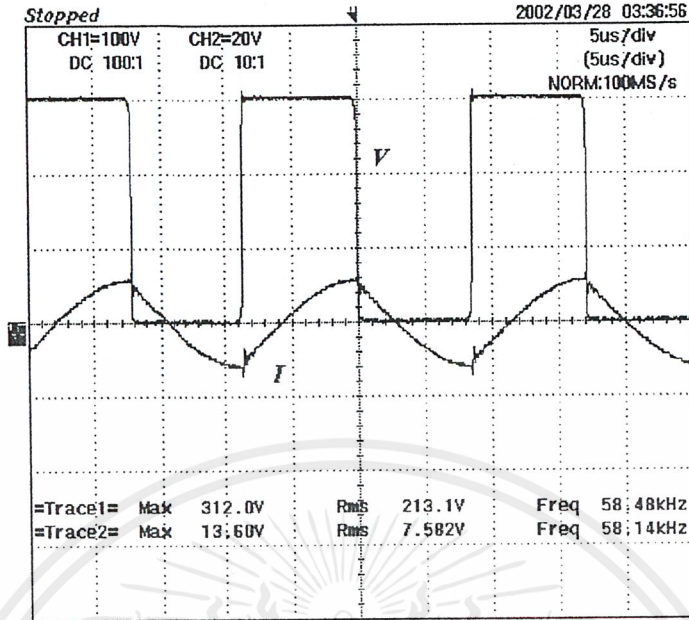


รูปที่ 25 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 54 kHz

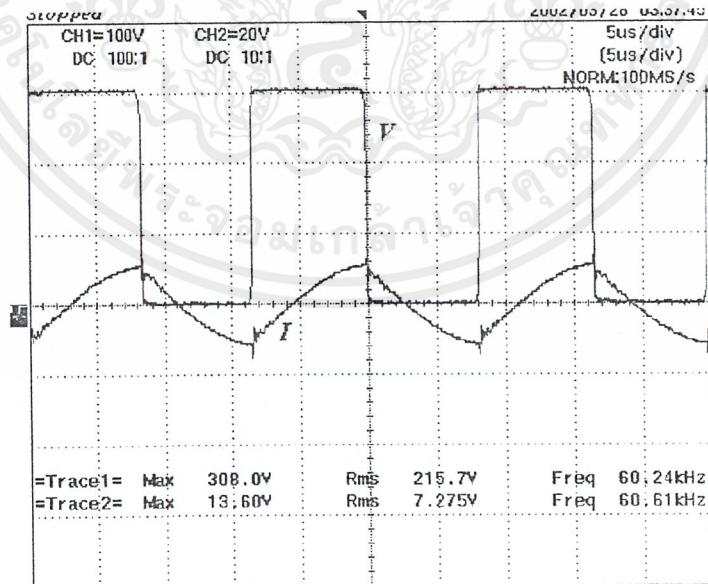


รูปที่ 26 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 56 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 27 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 58 kHz



รูปที่ 28 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 60 kHz

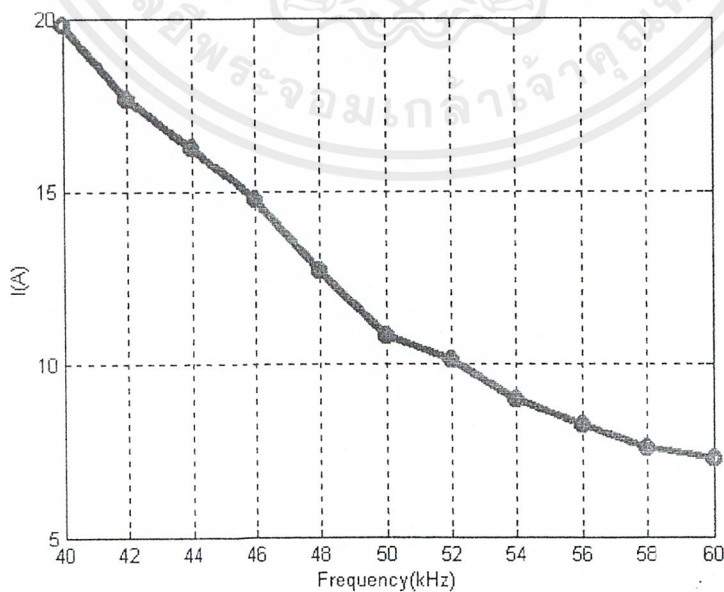
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่(kHz)	Vmax(V.)	Vrms(V.)	Irms(A.)
40	288.0	195.3	19.80
42	288.0	192.9	17.64
44	300.0	198.5	16.23
46	321.0	206.2	14.78
48	300.0	202.6	12.68
50	300.0	203.2	10.81
52	308.0	210.5	10.09
54	308.0	209.0	8.98
56	308.0	211.8	8.22
58	312.0	213.1	7.57
60	308.0	215.7	7.25

ตารางที่ 2 ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงความถี่

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเราจะพบว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น กระแสไหลจะค่อยๆลดลง ซึ่งเมื่อกระแสไหลลดลง กำลังไฟฟ้าที่จะได้จากเตาหุงต้มความถี่สูง ก็จะลดต่ำลงด้วย นั่นคือเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ขนาดของกำลังไฟฟ้าที่ได้ต่ำลง



รูปที่ 29 การเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อเปลี่ยนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลของการเปลี่ยนขนาดขดลวด

วัตถุประสงค์

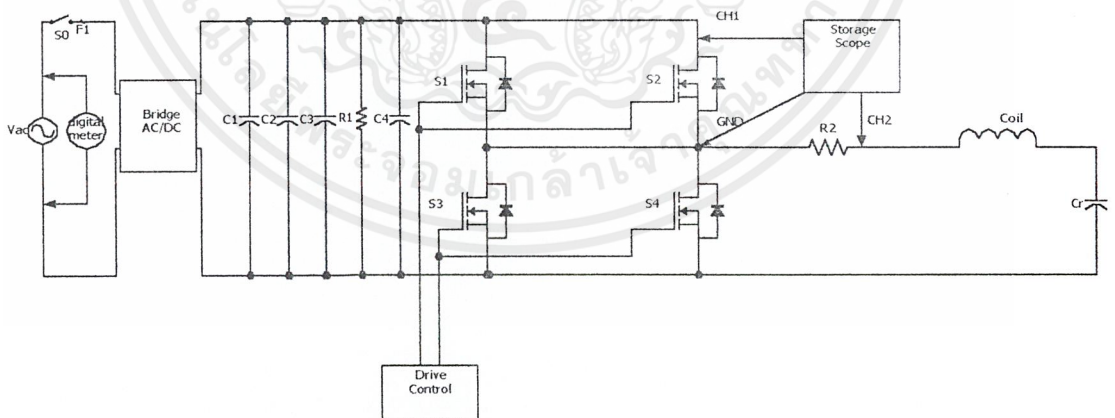
-เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของขดลวด ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่จะได้จากเตา
หุงต้มความถี่สูง เพื่อหาขนาดของขดลวดที่เหมาะสมในการใช้งาน

อุปกรณ์การทดลอง

1. เตาหุงต้มความถี่สูง
2. Variac
3. Digital Meter
4. Storage Scope
5. หม้อ Stainless เบอร์ 24 บรรจุน้ำ 1.5 ลิตร
6. ขดลวดทองแดงขนาด 10 เส้น, 15 เส้น และ 20 เส้น

ขั้นตอนการทดลอง

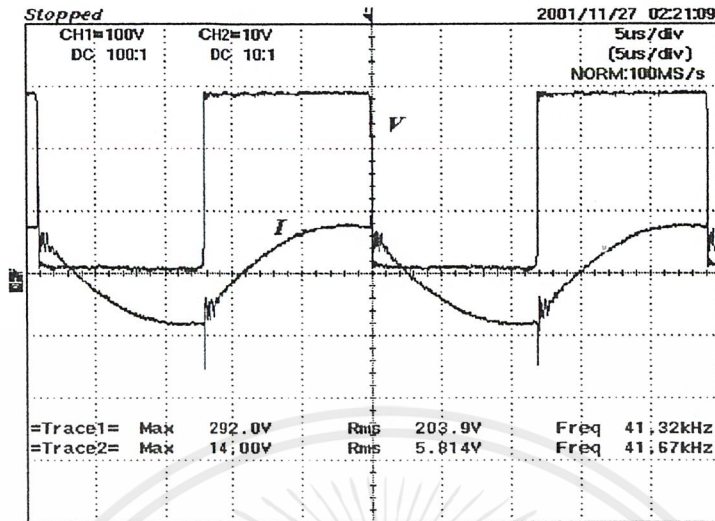
1. ต่อวงจรและเครื่องวัดต่างๆ ตามรูป
2. ใช้ขดลวดขนาด 10 เส้น
3. นำหม้อที่บรรจุน้ำ 1.5 ลิตร ตั้งบนขดลวด
4. เปิดเครื่องให้แรงดันคงที่
5. บันทึกผลการทดลอง
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนขดลวดเป็น 15 และ 20 เส้น



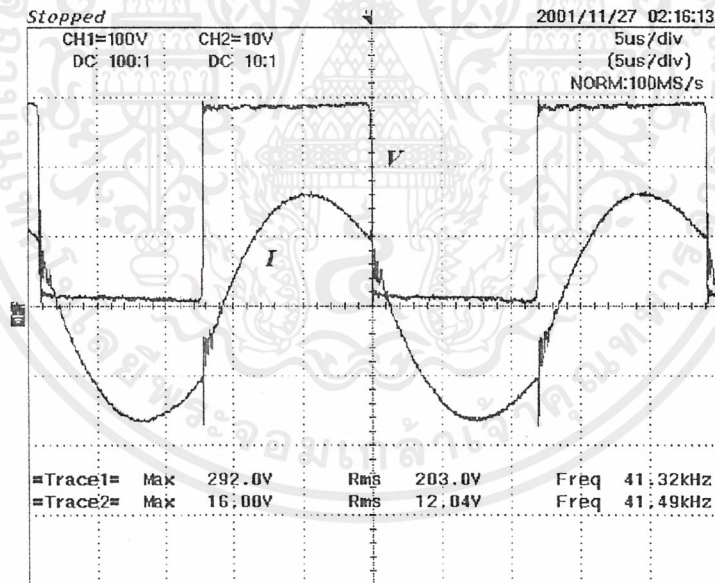
รูปที่ 30 การต่อวงจรการทดลองที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

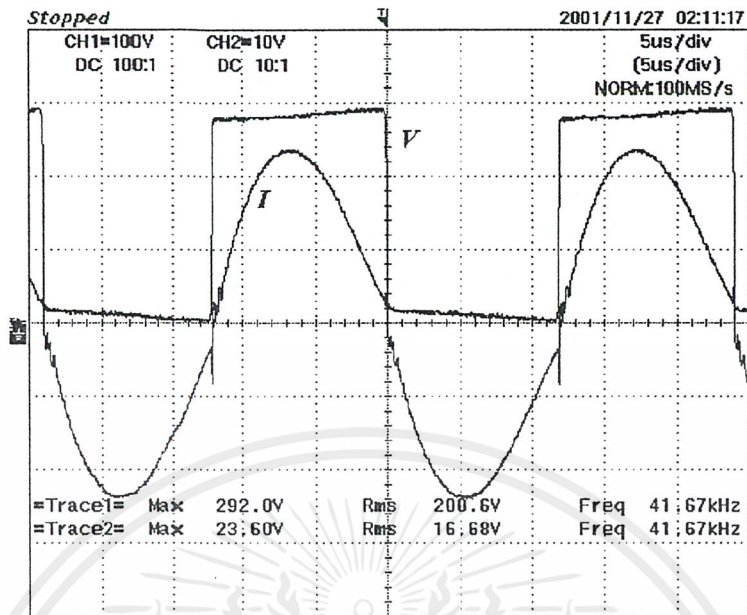


รูปที่ 31 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้ขดลวดขนาด 10 เส้น



รูปที่ 32 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้ขดลวดขนาด 15 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



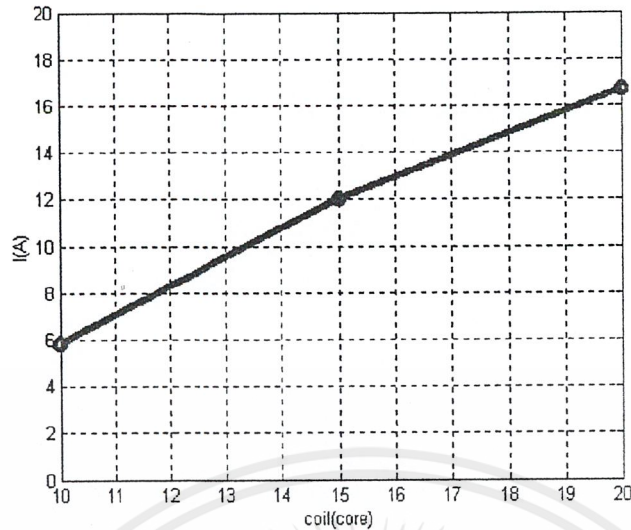
รูปที่ 33 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้ขดลวดขนาด 20 เส้น

coil	Vm(V.)	Vrms(V.)	f(kHz)	Irms(A.)
10	292.0	203.9	41.67	5.81
15	292.0	203.0	41.49	12.04
20	292.0	200.6	41.67	16.68

ตารางที่ 3 ผลการทดลองเปลี่ยนขนาดขดลวด

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทำให้เราได้ทราบว่า เมื่อเราใช้ขดลวดที่มีจำนวนของเส้นลวดมากขึ้น จะทำให้กระแสไหลมีค่ามากขึ้น และจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นด้วย เนื่องจากว่า เส้นลวดมีจำนวนมากขึ้น พื้นที่ในการนำกระแสมีมากขึ้น ทำกระแสไหลได้มาก กำลังไฟฟ้าที่ได้จึงมีค่าสูงด้วย จากผลการทดลอง ขดลวดขนาด 20 เส้น ให้กระแสไหล และกำลังไฟฟ้ามากที่สุด



รูปที่ 34 การเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อเปลี่ยนขนาดขดลวด

4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ วัตถุปะสงค์

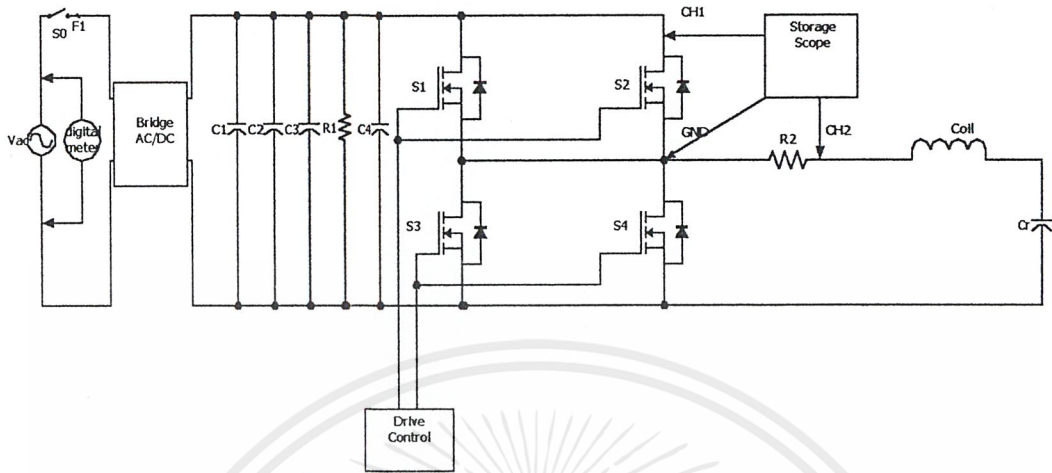
-เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ ว่ามีผลอย่างไรกับ
กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเตาหุงต้มความถี่สูง เพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมในการใช้งาน
อุปกรณ์การทดลอง

1. เตาหุงต้มความถี่สูง
2. Variac
3. Digital Meter
4. Storage Scope
5. หม้อ Stainless เบอร์ 24 บรรจุน้ำ 1.5 ลิตร
6. แผ่นรองหม้อขนาดความหนาแผ่นละ 1 มิลลิเมตร

ขั้นตอนการทดลอง

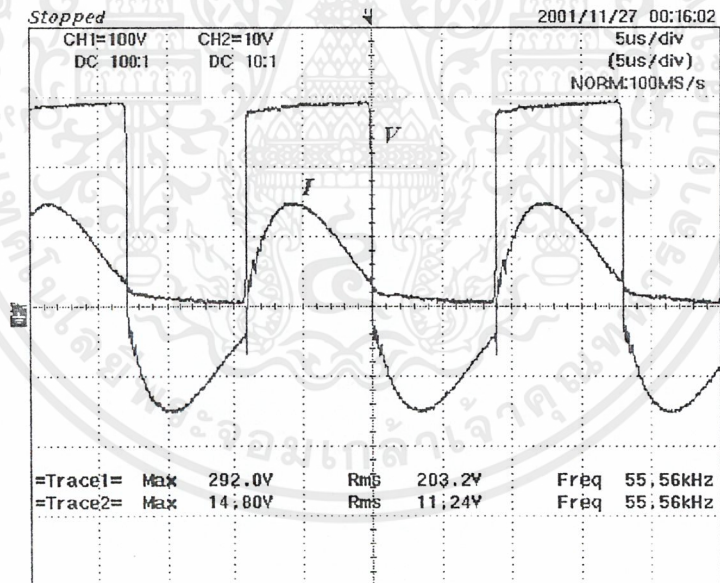
1. ต่อวงจรและเครื่องวัดต่างๆ ตามรูป
2. ใช้แผ่นรองหม้อจำนวน 1 แผ่น
3. นำหม้อที่บรรจุน้ำ 1.5 ลิตร ตั้งบนขดลวด
4. เปิดเครื่องให้แรงดันคงที่
5. บันทึกผลการทดลอง
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-5 โดยเพิ่มจำนวนแผ่นรองครั้งละ 1 แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



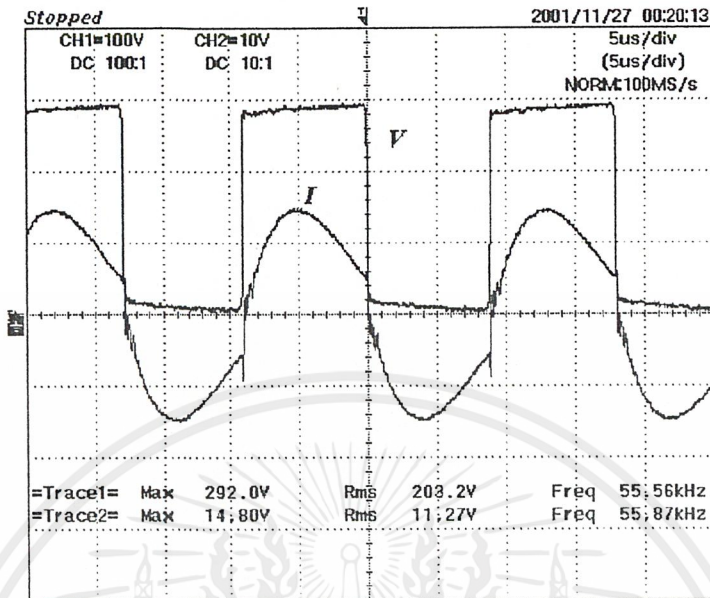
รูปที่ 35 การต่อวงจรการทดลองที่ 4.3

ผลการทดลอง

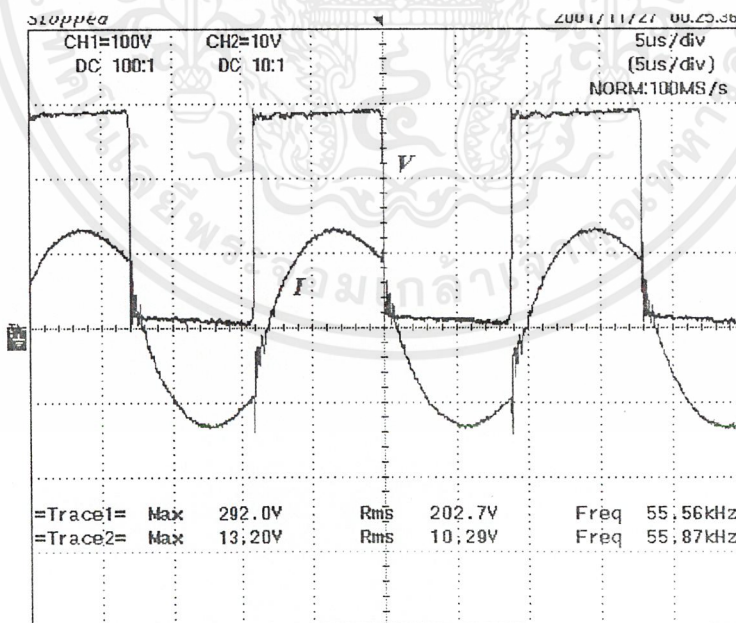


รูปที่ 36 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

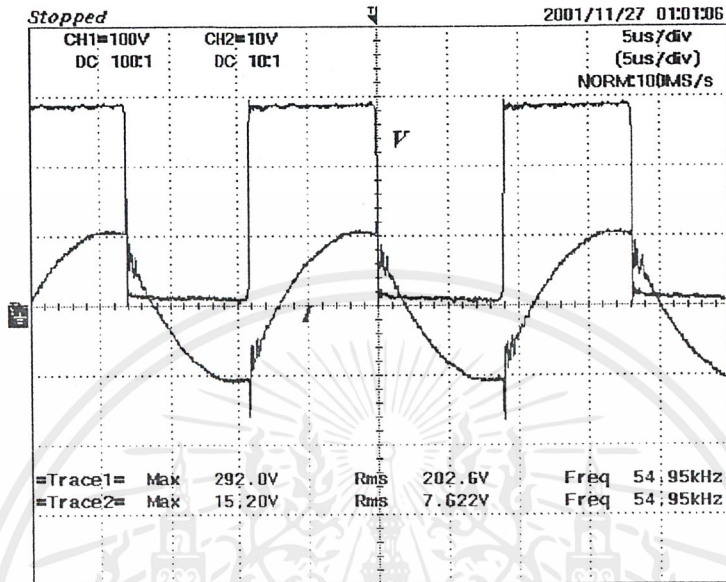


รูปที่ 37 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 2 มิลลิเมตร

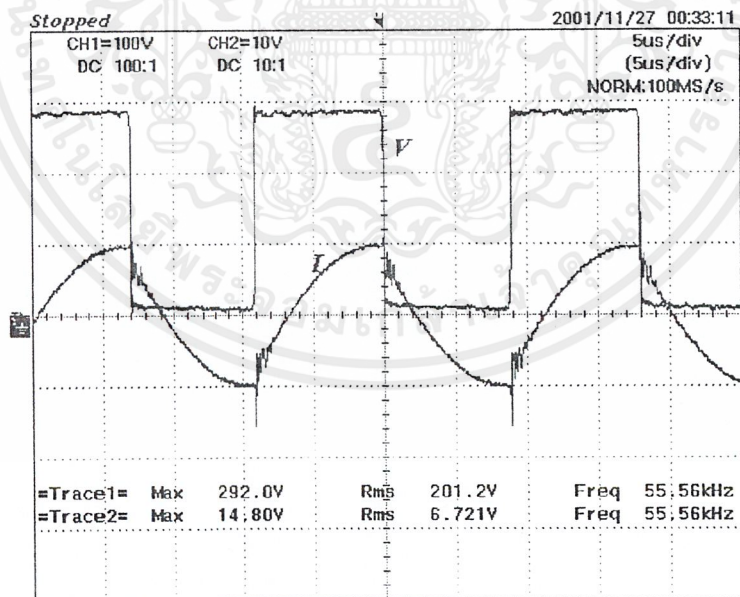


รูปที่ 38 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 3 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

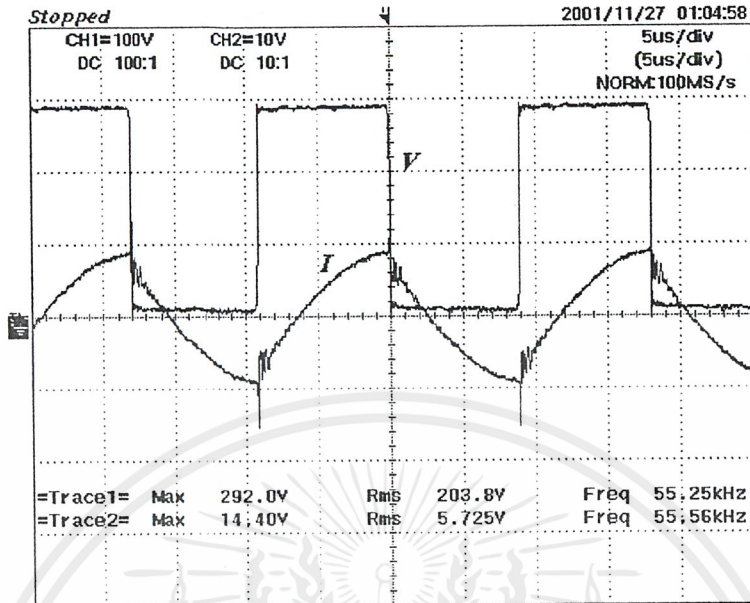


รูปที่ 39 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหัวอ 4 มิลลิเมตร

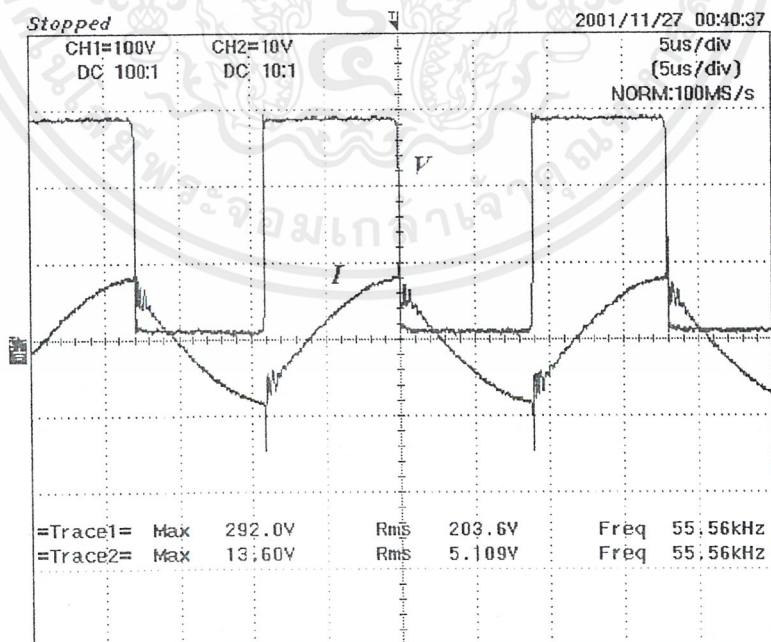


รูปที่ 40 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหัวอ 5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

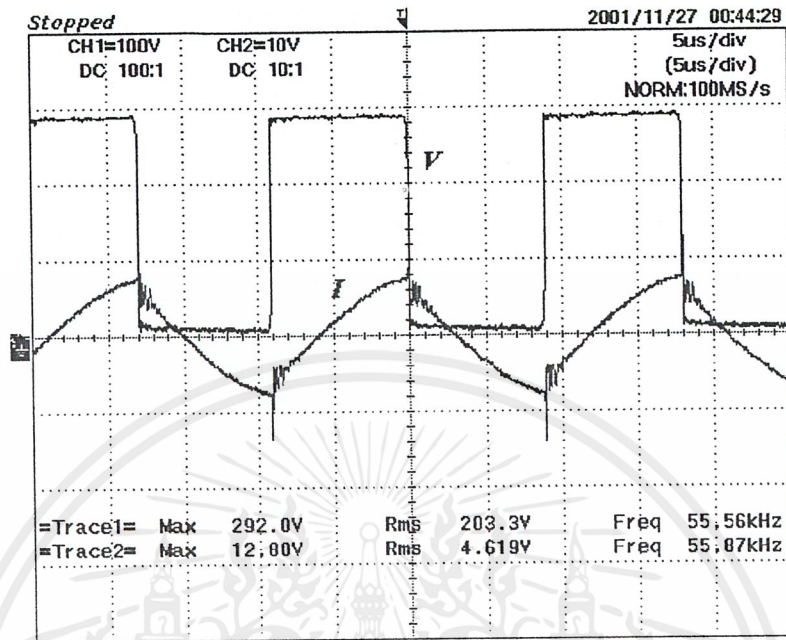


รูปที่ 41 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 6 มิลลิเมตร

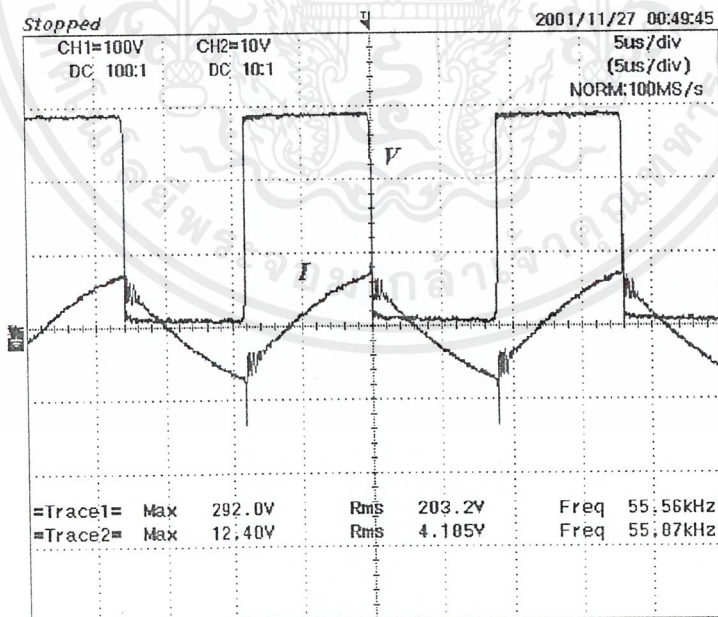


รูปที่ 42 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 7 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

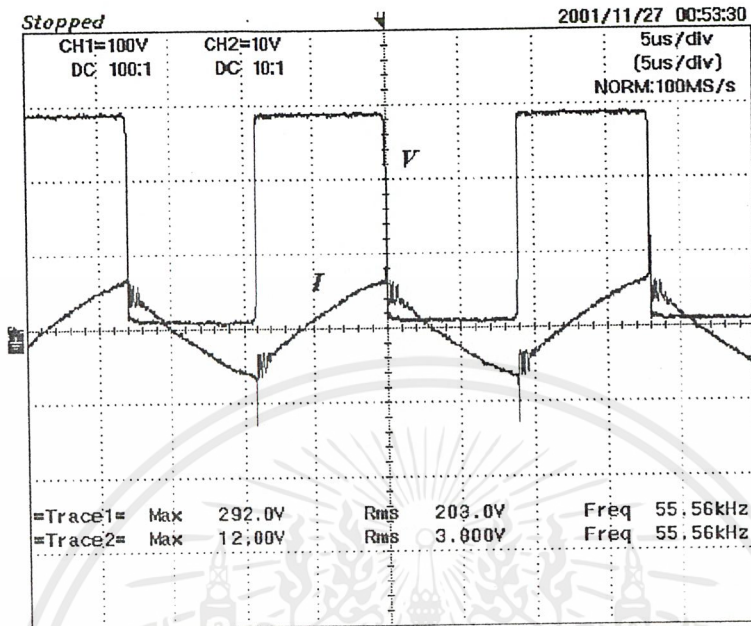


รูปที่ 43 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 44 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 9 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 45 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ 10 มิลลิเมตร

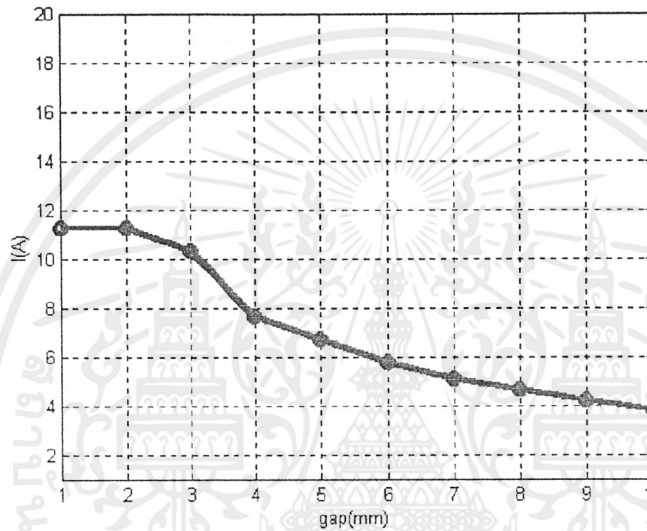
gap	Vmax(V.)	Vrms(V.)	Irms(A.)	f(kHz)
1	292.0	203.2	11.240	55.56
2	292.0	203.2	11.270	55.56
3	292.0	202.7	10.290	55.56
4	292.0	202.6	7.622	54.95
5	292.0	201.2	6.721	55.56
6	292.0	203.8	5.725	55.25
7	292.0	203.6	5.109	55.56
8	292.0	203.3	4.619	55.56
9	292.0	203.2	4.185	55.56
10	292.0	203	3.800	55.56

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหม้อกับขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเราจะพบว่าเมื่อเราเพิ่มจำนวนแผ่นรองหม้อเข้าไปครั้งละ 1 แผ่น จะทำให้ระยะห่างระหว่างหม้อกับขดลวดเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 มิลลิเมตร ซึ่งจากผลการทดลองเราจะเห็นว่า ยิ่งระยะห่างมีค่าเพิ่มขึ้นเท่าใด กระแสของไหลจะยิ่งลดต่ำลง และกำลังไฟฟ้าก็จะลดต่ำลงด้วย นั่นคือ หากเราต้องการให้ เตาหุงต้มความถี่สูง ให้กำลังไฟฟ้ามก เราต้องทำให้ระยะระหว่างขดลวดกับหม้อมีค่าน้อย



รูปที่ 46 การเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างขดลวดกับหม้อ

4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดหม้อ

วัตถุประสงค์

-เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของหม้อ ว่ามีผลอย่างไรกับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเตาหุงต้มความถี่สูง เพื่อหาขนาดของหม้อที่เหมาะสมในการใช้งาน

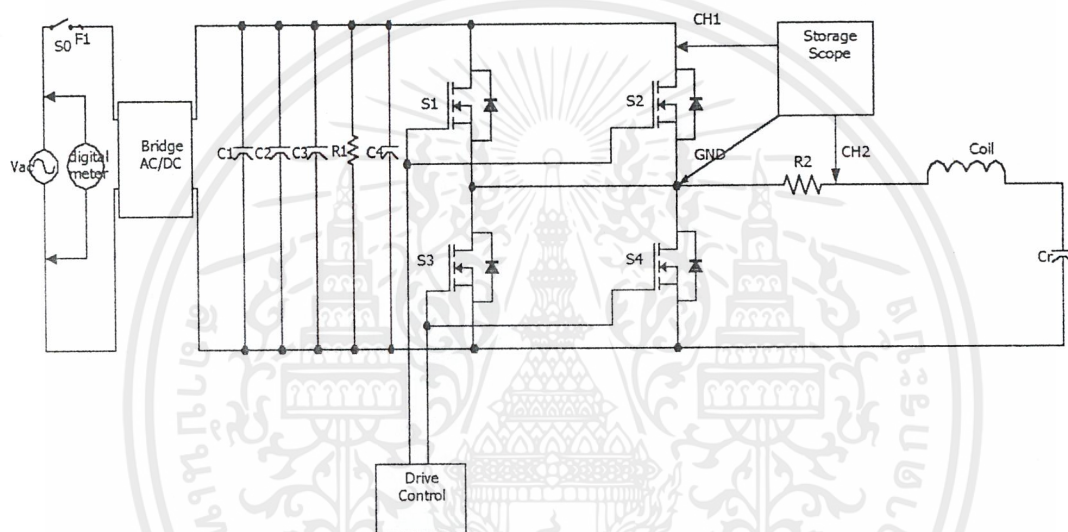
อุปกรณ์การทดลอง

1. เตาหุงต้มความถี่สูง
2. Variac
3. Digital Meter
4. Storage Scope
5. น้ำ 1.5 ลิตร
6. หม้อเบอร์ 18,20,22 และเบอร์ 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลอง

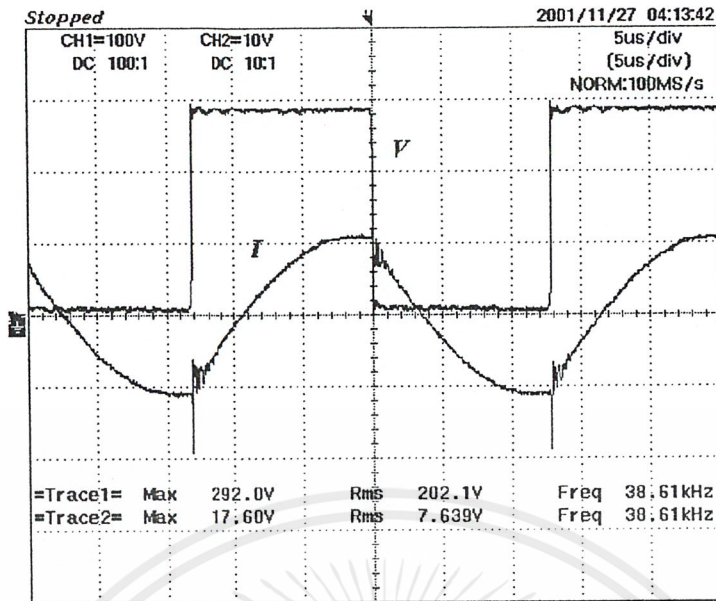
1. ต่อดวงจรและเครื่องวัดต่างๆ ตามรูป
2. ใช้หม้อเบอร์ 18
3. นำหม้อที่บรรจุน้ำ 1.5 ลิตร ตั้งบนขดลวด
4. เปิดเครื่องให้แรงดันคงที่
5. บันทึกผลการทดลอง
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนขนาดของหม้อเป็น 20, 22 และ 24



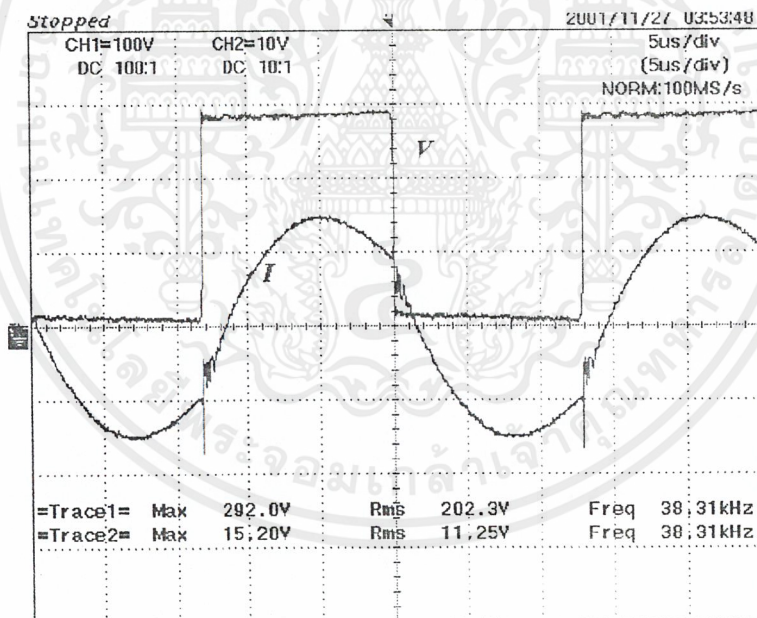
รูปที่ 47 การต่อดวงจรการทดลองที่ 4.4

ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

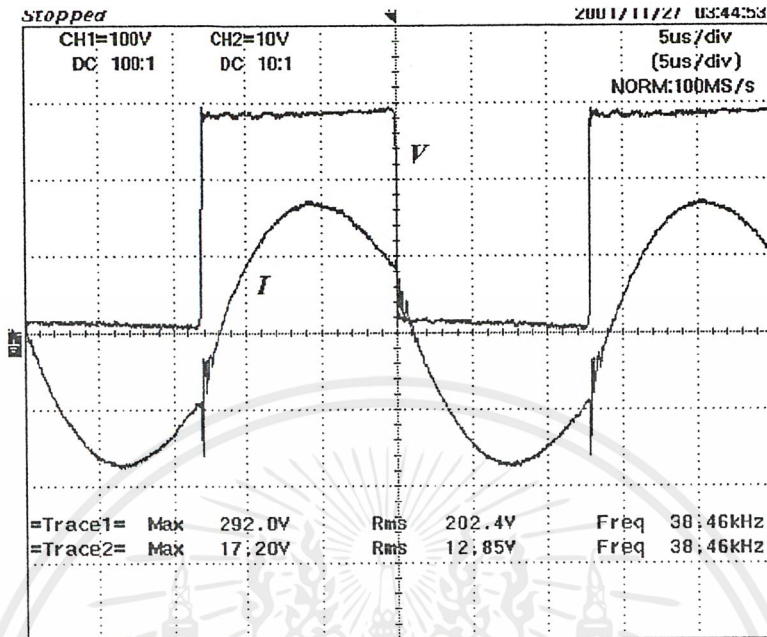


รูปที่ 48 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้หม้อเบอร์ 18

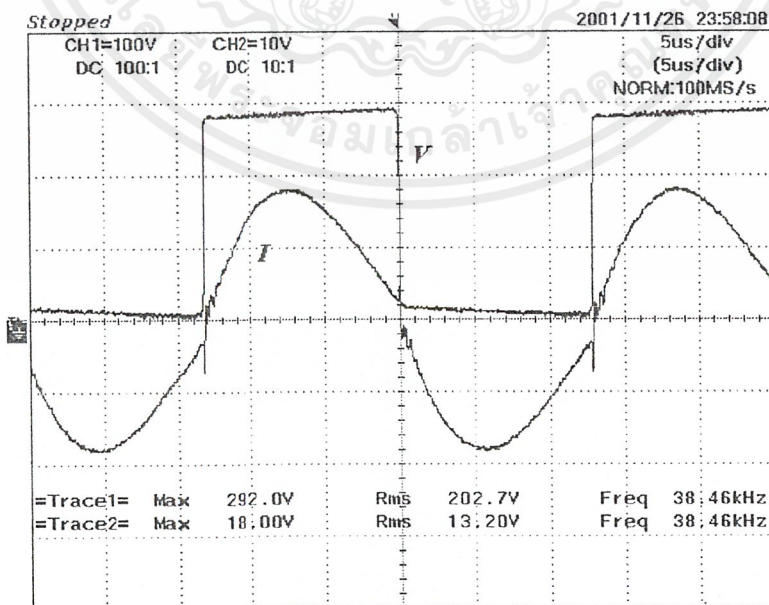


รูปที่ 49 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้หม้อเบอร์ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 50 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้หม้อเบอร์ 22



รูปที่ 51 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้หม้อเบอร์ 24

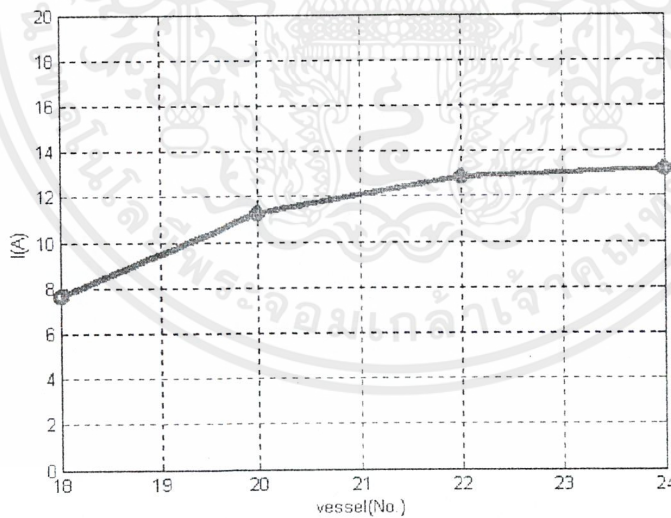
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vessel	Vm(V.)	Vrms(V.)	f(kHz)	Irms(A.)
18	292.0	202.1	38.61	7.64
20	292.0	202.3	38.31	11.25
22	292.0	202.4	38.46	12.85
24	292.0	202.7	38.46	13.2

ตารางที่ 5 ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงขนาดหม้อ

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเราจะพบว่า เมื่อขนาดของหม้อใหญ่ขึ้น ก็จะมีพื้นที่ในการรับเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น นั่นคือกระแสไหลจะเพิ่มสูงขึ้น และกำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงขึ้นด้วย เพราะฉะนั้น หากใช้หม้อที่มีลักษณะพื้นที่ก้นหม้อใหญ่ ก็จะทำให้ น้ำเดือด ได้เร็วขึ้น



รูปที่ 52 การเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อเปลี่ยนขนาดหม้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบเมื่อไม่มี โหลด

วัตถุประสงค์

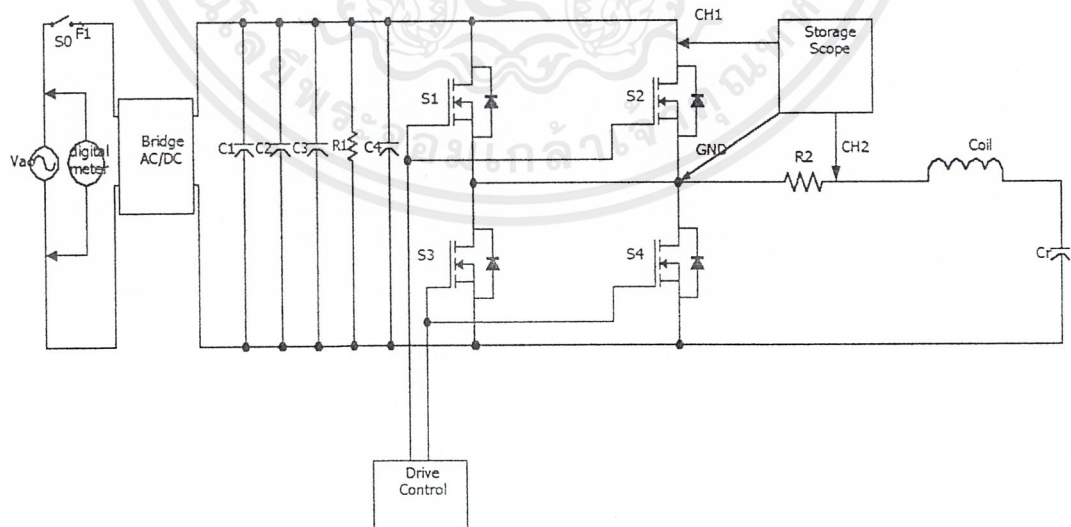
-เพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดกับกระแสเมื่อ ไม่มีโหลดกับเมื่อมีโหลด

อุปกรณ์การทดลอง

1. เตาหุงต้มความถี่สูง
2. Variac
3. Digital Meter
4. Storage Scope
5. หม้อ Stainless เบอร์ 24 บรรจุน้ำ 1.5 ลิตร

ขั้นตอนการทดลอง

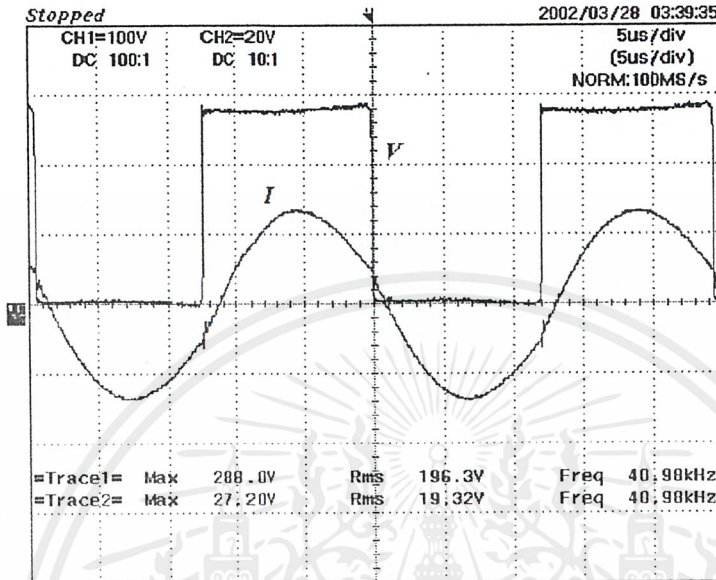
1. ต่อวงจรและเครื่องวัดต่างๆ ตามรูป
2. นำหม้อที่บรรจุน้ำ 1.5 ลิตร ตั้งบนขดลวด
3. เปิดเครื่องให้แรงดันคงที่
4. ปรับความถี่ที่ 40 kHz
5. บันทึกผลการทดลอง
6. ยกหม้อออกแล้วบันทึกผล



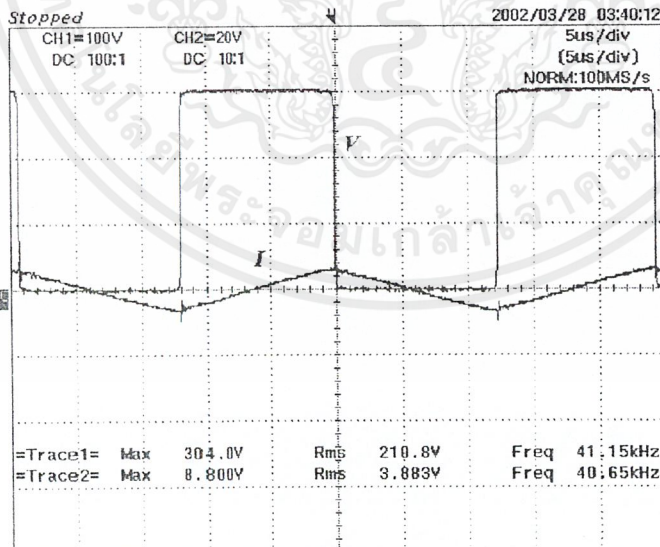
รูปที่ 53 การต่อวงจรการทดลองที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง



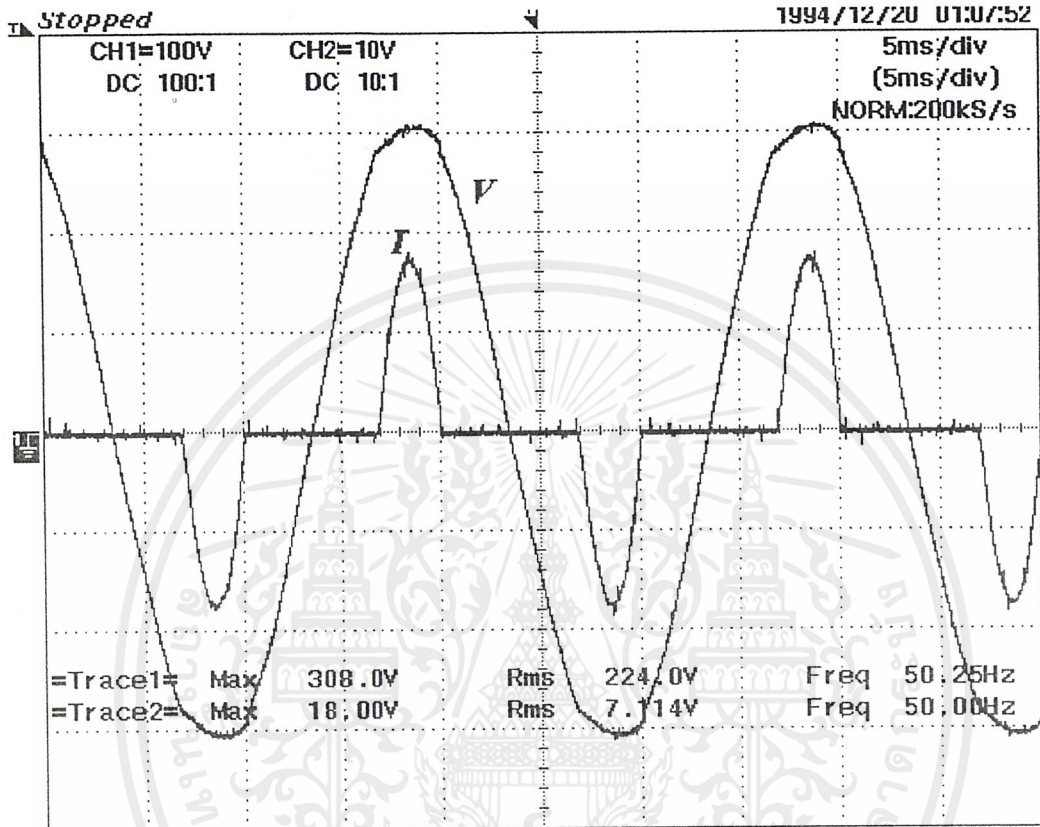
รูปที่ 54 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อมีโหลด



รูปที่ 55 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อไม่มีโหลด

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบภาพจากรูปคลื่นทั้งสองทำให้เราทราบว่า เมื่อไม่มีโหลดจะทำให้กระแสลดต่ำลง อย่างมาก ทำให้เราสามารถยกหม้อออกขณะเปิดเครื่องได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 56 รูปคลื่น กระแสและแรงดันขาเข้า ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

ในการทดลองเตาที่เราสร้างขึ้น สามารถให้ความร้อนได้สูงถึง 2.28 กิโลวัตต์โดยใช้หม้อเบออร์ 24 ขนาดของขดลวดที่เบออร์ 30 จำนวน 20 เส้น ระยะห่างระหว่างหม้อกับขดลวดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ความถี่ใช้งาน 40 กิโลเฮิรตซ์ สามารถต้มน้ำ 1.5 ลิตรให้เดือดได้ในเวลา 3 นาที

ความร้อนที่ได้จากเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะเป็น การให้ความร้อนเฉพาะบริเวณที่ต้องการ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการให้ความร้อนมากที่สุด ทำให้ประหยัดและไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ ทั้งยังมีความปลอดภัยในด้านการใช้งาน อย่างไรก็ตาม เตาหุงต้มความถี่สูงที่ได้สร้างขึ้นเป็นเพียงเครื่องต้นแบบเท่านั้น ยังต้องการการพัฒนาในระดับต่อไปอีก เนื่องจากข้อบกพร่องและข้อจำกัดในการใช้งานบางประการ ทำให้การใช้งานทั่วไปในครัวเรือนอาจจะมีข้อจำกัดอยู่บ้าง ซึ่งผู้ใช้งานจำเป็นจะต้องมีความรู้และความเข้าใจในวิธีการและกฎเกณฑ์ในการใช้งานพอสมควร จึงจะทำให้การใช้งานเป็นไปอย่างถูกต้องและปลอดภัย

ข้อเสนอแนะในการปรับปรุง

1. อินเตอร์เฟซการใช้งานของเตาหุงต้มความถี่สูง ยังใช้การหมุนปรับความถี่ด้วยตัวดำเนินการปรับค่าได้ ซึ่งดูสับสนและไม่ได้ค่าที่แน่นอน ควรจะได้รับการปรับปรุงออกแบบให้เป็นปุ่มกดและมีตัวเลขบอกค่าความถี่และค่าอื่น ๆ ที่แน่นอน
2. ปรับปรุงรูปลักษณะภายนอกให้มีความสวยงามน่าใช้ และเพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถวางขายในท้องตลาดได้ จำเป็นต้องสร้างให้รูปลักษณ์ภายนอกมีความดึงดูดความสนใจ เล็ก กะทัดรัดน่าใช้
3. พัฒนาให้ต้นทุนในการผลิตลดต่ำลงให้มากที่สุด โดยที่ยังคงประสิทธิภาพที่ดีไว้
4. พัฒนาให้สามารถใช้ได้กับหม้อชนิดอื่น เช่น หม้ออลูมิเนียม หม้อเหล็ก และหม้อทองเหลือง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เตาหุงต้มความถี่สูงที่สร้างขึ้นนี้ สามารถต้มน้ำปริมาณ 1.5 ลิตรให้เดือดได้ในเวลา 3 นาที
2. ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนาเตาหุงต้มความถี่สูงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
3. สามารถนำหลักการเดียวกันนี้ไปประยุกต์ใช้งาน ให้เป็นเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงได้หลายประเภท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

SWITCHMODE™ Pulse Width Modulation Control Circuit

The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for SWITCHMODE power supply control.

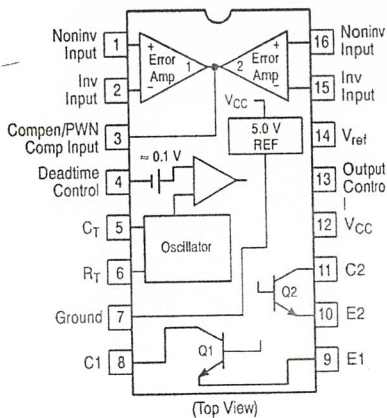
- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator with Master or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5.0 V Reference
- Adjustable Deadtime Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source or Sink
- Output Control for Push-Pull or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout

MAXIMUM RATINGS (Full operating ambient temperature range applies, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	TL494C	TL494I	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	42		V
Collector Output Voltage	V_{C1} , V_{C2}	42		V
Collector Output Current (Each transistor) (Note 1.)	I_{C1} , I_{C2}	500		mA
Amplifier Input Voltage Range	V_{IR}	-0.3 to +42		V
Power Dissipation @ $T_A \leq 45^\circ\text{C}$	P_D	1000		mW
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	80		$^\circ\text{C/W}$
Operating Junction Temperature	T_J	125		$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to +125		$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range TL494C TL494I	T_A	0 to +70 -40 to +85		$^\circ\text{C}$
Derating Ambient Temperature	T_A	45		$^\circ\text{C}$

1. Maximum thermal limits must be observed.

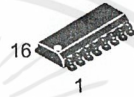
PIN CONNECTIONS



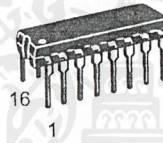
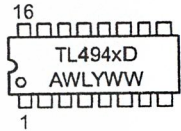
ON Semiconductor

<http://onsemi.com>

MARKING DIAGRAMS



SO-16
D SUFFIX
CASE 751B



PDIP-16
N SUFFIX
CASE 648



x = C or I
A = Assembly Location
WL, L = Wafer Lot
YY, Y = Year
WW, W = Work Week

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
TL494CD	SO-16	48 Units/Rail
TL494CDR2	SO-16	2500 Tape & Reel
TL494CN	PDIP-16	500 Units/Rail
TL494IN	PDIP-16	500 Units/Rail

TL494

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	V_{C1}, V_{C2}	–	30	40	V
Collector Output Current (Each transistor)	I_{C1}, I_{C2}	–	–	200	mA
Amplified Input Voltage	V_{in}	–0.3	–	$V_{CC} - 2.0$	V
Current Into Feedback Terminal	I_{fb}	–	–	0.3	mA
Reference Output Current	I_{ref}	–	–	10	mA
Timing Resistor	R_T	1.8	30	500	k Ω
Timing Capacitor	C_T	0.0047	0.001	10	μ F
Oscillator Frequency	f_{osc}	1.0	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15$ V, $C_T = 0.01$ μ F, $R_T = 12$ k Ω , unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
REFERENCE SECTION					
Reference Voltage ($I_O = 1.0$ mA)	V_{ref}	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation ($V_{CC} = 7.0$ V to 40 V)	Reg_{line}	–	2.0	25	mV
Load Regulation ($I_O = 1.0$ mA to 10 mA)	Reg_{load}	–	3.0	15	mV
Short Circuit Output Current ($V_{ref} = 0$ V)	I_{SC}	15	35	75	mA

OUTPUT SECTION

Collector Off-State Current ($V_{CC} = 40$ V, $V_{CE} = 40$ V)	$I_{C(off)}$	–	2.0	100	μ A
Emitter Off-State Current $V_{CC} = 40$ V, $V_C = 40$ V, $V_E = 0$ V)	$I_{E(off)}$	–	–	–100	μ A
Collector–Emitter Saturation Voltage (Note 2.) Common–Emitter ($V_E = 0$ V, $I_C = 200$ mA) Emitter–Follower ($V_C = 15$ V, $I_E = -200$ mA)	$V_{sat(C)}$ $V_{sat(E)}$	– –	1.1 1.5	1.3 2.5	V
Output Control Pin Current Low State ($V_{OC} \leq 0.4$ V) High State ($V_{OC} = V_{ref}$)	I_{OCL} I_{OCH}	– –	10 0.2	– 3.5	μ A mA
Output Voltage Rise Time Common–Emitter (See Figure 12) Emitter–Follower (See Figure 13)	t_r	– –	100 100	200 200	ns
Output Voltage Fall Time Common–Emitter (See Figure 12) Emitter–Follower (See Figure 13)	t_f	– –	25 40	100 100	ns

2. Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperature as possible.

TL494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$, unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
ERROR AMPLIFIER SECTION					
Input Offset Voltage (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	V_{IO}	–	2.0	10	mV
Input Offset Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IO}	–	5.0	250	nA
Input Bias Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IB}	–	–0.1	–1.0	μA
Input Common Mode Voltage Range ($V_{CC} = 40\ \text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	V_{ICR}	–0.3 to $V_{CC}-2.0$			V
Open Loop Voltage Gain ($\Delta V_O = 3.0\ \text{V}$, $V_O = 0.5\ \text{V}$ to $3.5\ \text{V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	A_{VOL}	70	95	–	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ($V_O = 0.5\ \text{V}$ to $3.5\ \text{V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	f_{c-}	–	350	–	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ($V_O = 0.5\ \text{V}$ to $3.5\ \text{V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	ϕ_m	–	65	–	deg.
Common Mode Rejection Ratio ($V_{CC} = 40\ \text{V}$)	CMRR	65	90	–	dB
Power Supply Rejection Ratio ($\Delta V_{CC} = 33\ \text{V}$, $V_O = 2.5\ \text{V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	PSRR	–	100	–	dB
Output Sink Current (V_O (Pin 3) = 0.7 V)	I_{O-}	0.3	0.7	–	mA
Output Source Current (V_O (Pin 3) = 3.5 V)	I_{O+}	2.0	–4.0	–	mA

PWM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 11)

Input Threshold Voltage (Zero Duty Cycle)	V_{TH}	–	2.5	4.5	V
Input Sink Current ($V_{Pin\ 3} = 0.7\ \text{V}$)	I_{L-}	0.3	0.7	–	mA

DEADTIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 11)

Input Bias Current (Pin 4) ($V_{Pin\ 4} = 0\ \text{V}$ to $5.25\ \text{V}$)	$I_{IB(DT)}$	–	–2.0	–10	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ($V_{Pin\ 4} = 0\ \text{V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$) ($V_{Pin\ 4} = 0\ \text{V}$, $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	DC_{max}	45	48	50	%
		–	45	50	
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	V_{th}	–	2.8	3.3	V
		0	–	–	

OSCILLATOR SECTION

Frequency ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	f_{osc}	–	40	–	kHz
Standard Deviation of Frequency* ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	σf_{osc}	–	3.0	–	%
Frequency Change with Voltage ($V_{CC} = 7.0\ \text{V}$ to $40\ \text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	$\Delta f_{osc}(\Delta V)$	–	0.1	–	%
Frequency Change with Temperature ($\Delta T_A = T_{low}$ to T_{high}) ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$)	$\Delta f_{osc}(\Delta T)$	–	–	12	%

UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION

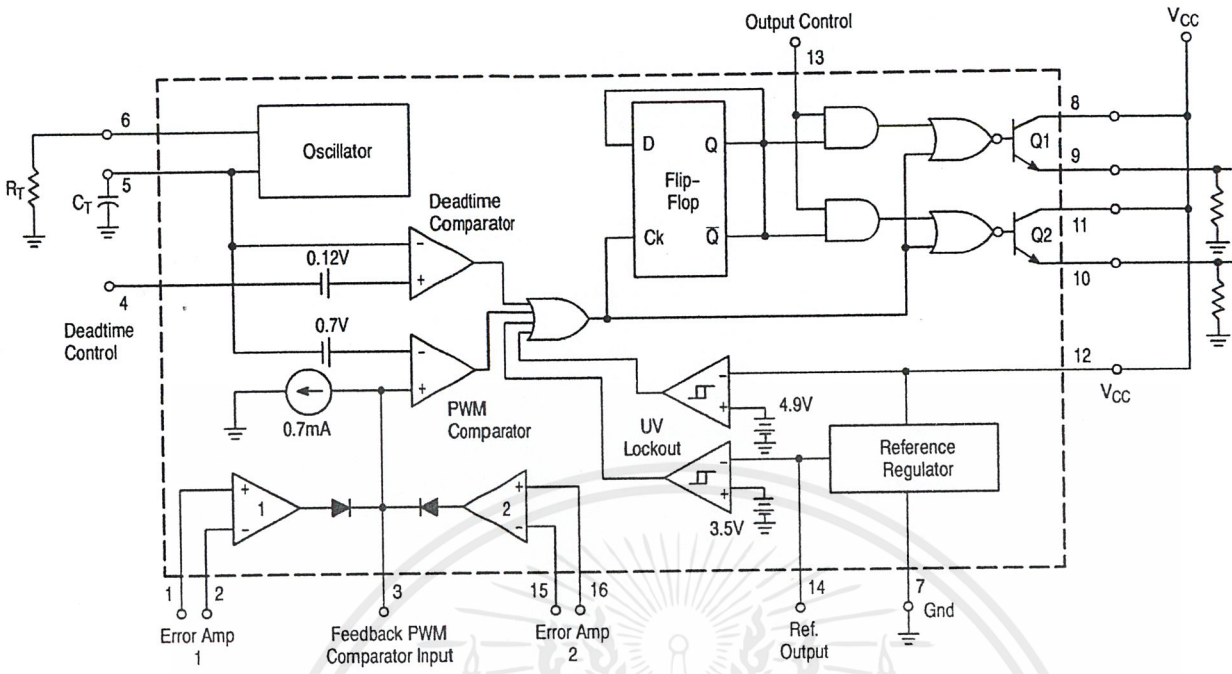
Turn-On Threshold (V_{CC} increasing, $I_{ref} = 1.0\ \text{mA}$)	V_{th}	5.5	6.43	7.0	V
---	----------	-----	------	-----	---

TOTAL DEVICE

Standby Supply Current (Pin 6 at V_{ref} , All other inputs and outputs open) ($V_{CC} = 15\ \text{V}$) ($V_{CC} = 40\ \text{V}$)	I_{CC}	–	5.5	10	mA
		–	7.0	15	
Average Supply Current ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$, $V_{Pin\ 4} = 2.0\ \text{V}$) ($V_{CC} = 15\ \text{V}$) (See Figure 12)		–	7.0	–	mA

* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}{N - 1}}$

TL494



This device contains 46 active transistors.

Figure 1. Representative Block Diagram

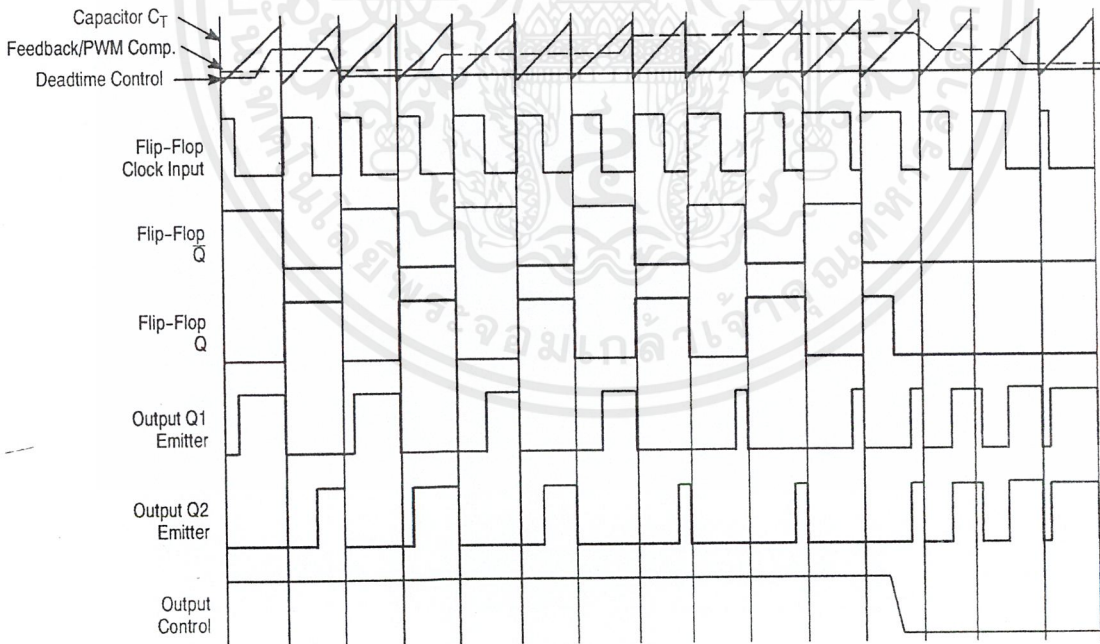


Figure 2. Timing Diagram

APPLICATIONS INFORMATION

Description

The TL494 is a fixed-frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal-linear sawtooth oscillator is frequency-programmable by two external components, R_T and C_T . The approximate oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} \approx \frac{1.1}{R_T \cdot C_T}$$

For more information refer to Figure 3.

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor C_T to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip-flop clock-input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. Therefore, an increase in control-signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to the Timing Diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the deadtime control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The deadtime control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output deadtime to approximately the first 4% of the sawtooth-cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96% with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional deadtime may be imposed on the output by setting the deadtime-control input to a fixed voltage, ranging between 0 V to 3.3 V.

Functional Table

Input/Output Controls	Output Function	$\frac{f_{out}}{f_{osc}} =$
Grounded	Single-ended PWM @ Q1 and Q2	1.0
@ V_{ref}	Push-pull Operation	0.5

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the deadtime control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 V to 3.5 V. Both error amplifiers have a

common mode input range from -0.3 V to $(V_{CC} - 2V)$, and may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the noninverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

When capacitor C_T is discharged, a positive pulse is generated on the output of the deadtime comparator, which clocks the pulse-steering flip-flop and inhibits the output transistors, Q1 and Q2. With the output-control connected to the reference line, the pulse-steering flip-flop directs the modulated pulses to each of the two output transistors alternately for push-pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2, when single-ended operation with a maximum on-time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a ringback winding with a catch diode used for snubbing. When higher output-drive currents are required for single-ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, and the output-mode pin must be tied to ground to disable the flip-flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494 has an internal 5.0 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an internal accuracy of $\pm 5.0\%$ with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0° to 70°C.

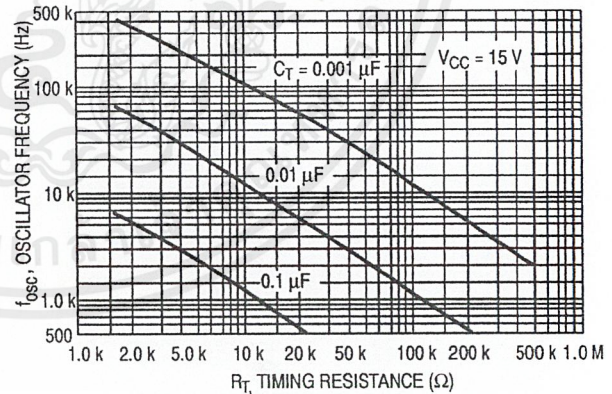


Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance

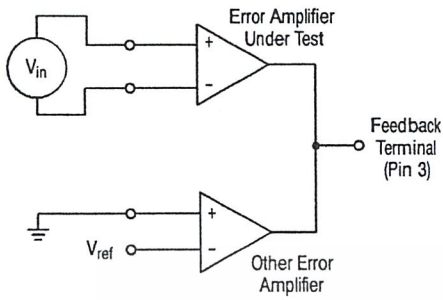


Figure 10. Error-Amplifier Characteristics

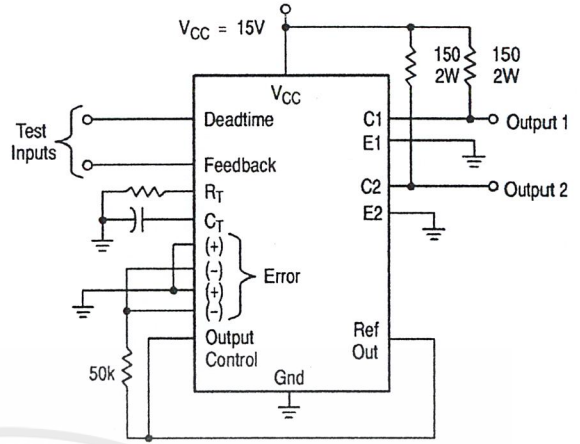


Figure 11. Deadtime and Feedback Control Circuit

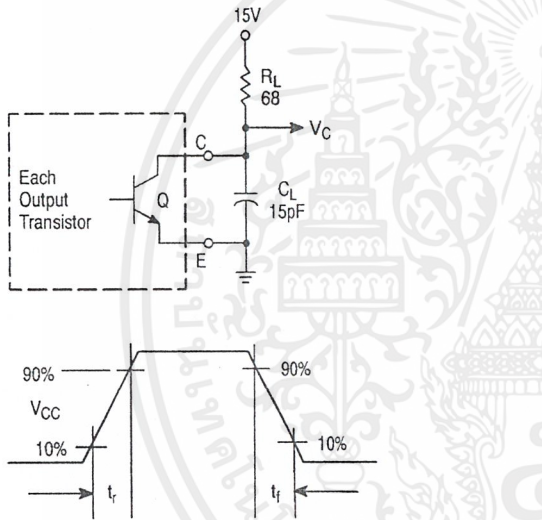


Figure 12. Common-Emitter Configuration Test Circuit and Waveform

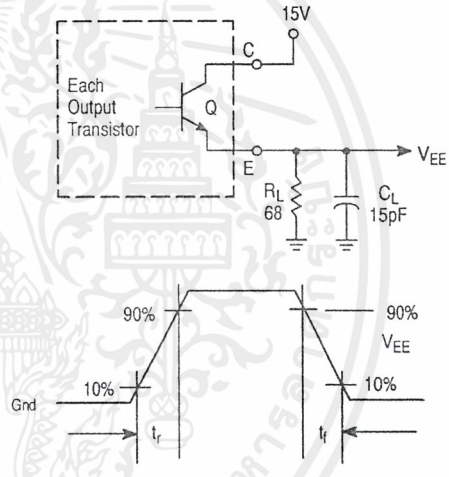


Figure 13. Emitter-Follower Configuration Test Circuit and Waveform

TL494

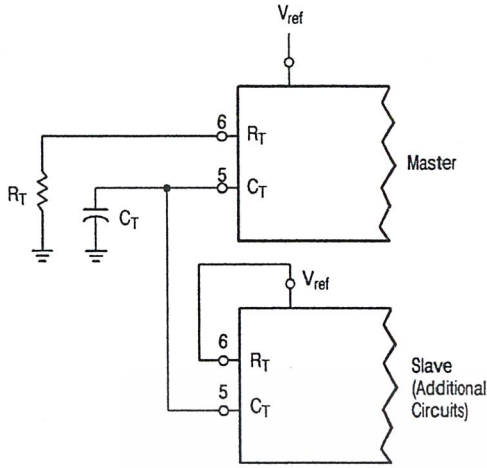


Figure 18. Slaving Two or More Control Circuits

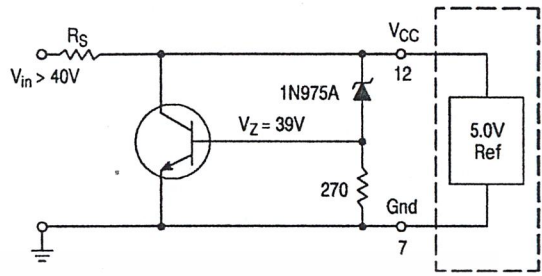


Figure 19. Operation with $V_{in} > 40\text{ V}$ Using External Zener

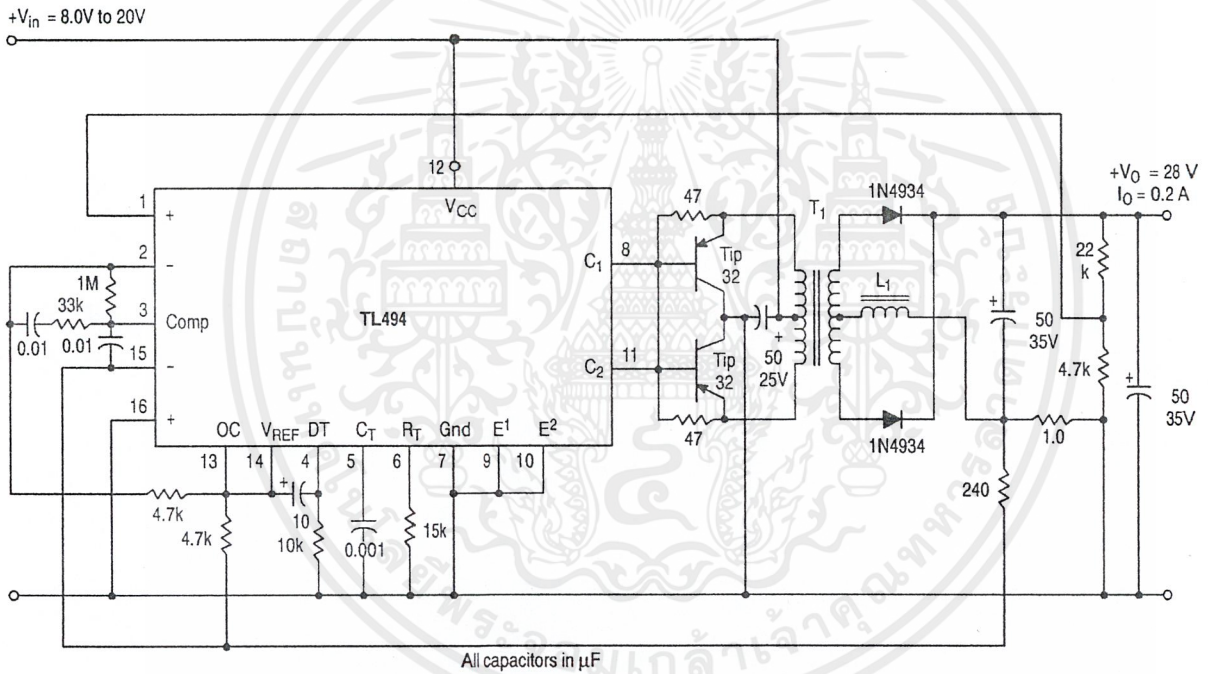


Figure 20. Pulse Width Modulated Push-Pull Converter

Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 10\text{ V to } 40\text{ V}$	14 mV 0.28%
Load Regulation	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ mA to } 1.0\text{ A}$	3.0 mV 0.06%
Output Ripple	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	65 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 28\text{ V}, R_L = 0.1\ \Omega$	1.6 A
Efficiency	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	71%

L1 - 3.5 mH @ 0.3 A
 T1 - Primary: 20T C.T. #28 AWG
 Secondary: 120T C.T. #36 AWG
 Core: Ferroxcube 1408P-L00-3CB

TL494

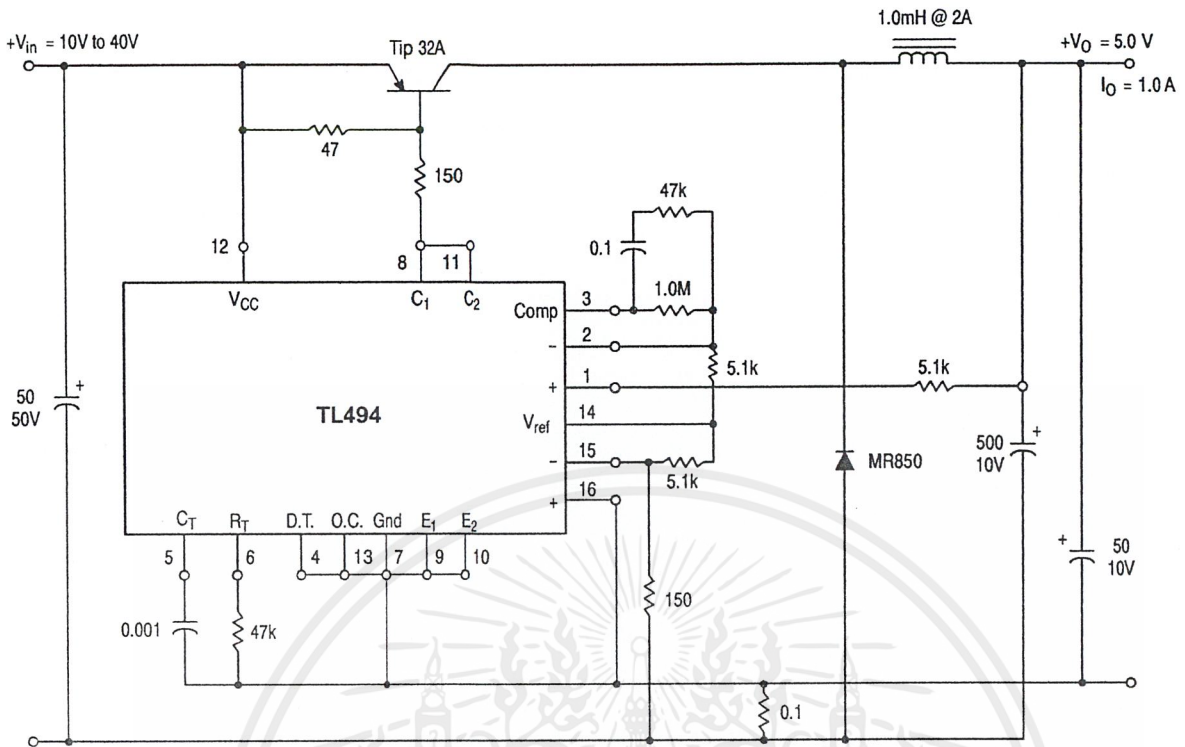


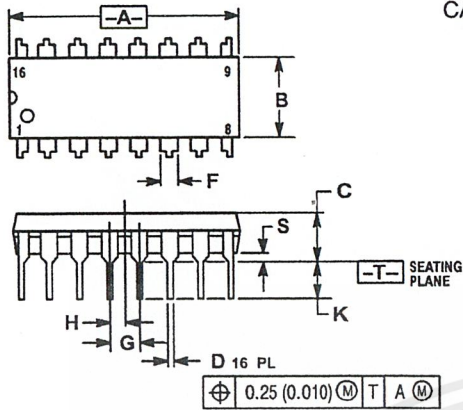
Figure 21. Pulse Width Modulated Step-Down Converter

Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 8.0 \text{ V to } 40 \text{ V}$	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 0.2 \text{ mA to } 200 \text{ mA}$	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	40 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, R_L = 0.1 \Omega$	250 mA
Efficiency	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	72%

TL494

PACKAGE DIMENSIONS

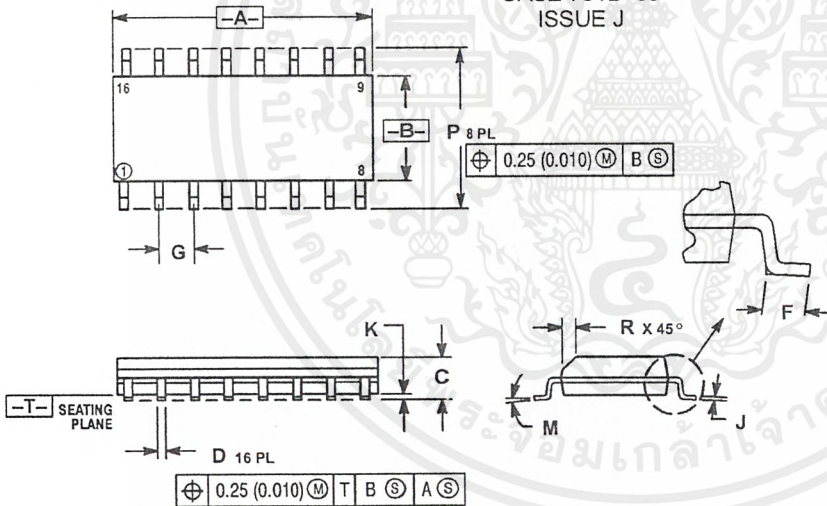
PDIP-16
N SUFFIX
CASE 648-08
ISSUE R



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
 3. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
 4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
 5. ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.740	0.770	18.80	19.55
B	0.250	0.270	6.35	6.85
C	0.145	0.175	3.69	4.44
D	0.015	0.021	0.39	0.53
F	0.040	0.70	1.02	1.77
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.050 BSC		1.27 BSC	
J	0.008	0.015	0.21	0.38
K	0.110	0.130	2.80	3.30
L	0.295	0.305	7.50	7.74
M	0°	10°	0°	10°
S	0.020	0.040	0.51	1.01

SO-16
D SUFFIX
CASE 751B-05
ISSUE J

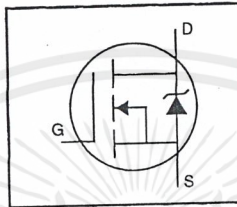


- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
 3. DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
 4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 (0.006) PER SIDE.
 5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF THE D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	9.80	10.00	0.386	0.393
B	3.80	4.00	0.150	0.157
C	1.35	1.75	0.054	0.068
D	0.35	0.49	0.014	0.019
F	0.40	1.25	0.016	0.049
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
J	0.19	0.25	0.008	0.009
K	0.10	0.25	0.004	0.009
M	0°	7°	0°	7°
P	5.60	6.20	0.229	0.244
R	0.25	0.50	0.010	0.019

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements

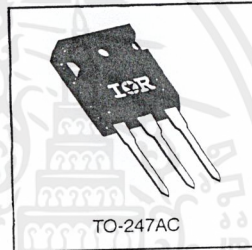


$V_{DSS} = 500V$
 $R_{DS(on)} = 0.27\Omega$
 $I_D = 20A$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.



DATA SHEETS

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	20	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	13	
I_{DM}	80	A
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	280	W
	2.2	W/°C
V_{GS}	± 20	V
E_{AS}	960	mJ
I_{AR}	20	A
E_{AR}	28	mJ
dv/dt	3.5	V/ns
T_J	-55 to +150	°C
T_{STG}	300 (1.6mm from case)	
	Soldering Temperature, for 10 seconds	
	10 lbf·in (1.1 N·m)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	

Thermal Resistance

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	—	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	—	—	40	

IRFP460



Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V _{(BR)DSS}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	V _{GS} =0V, I _D =250μA
ΔV _{(BR)DSS} /ΔT _J	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	V/°C	Reference to 25°C, I _D =1mA
R _{DS(on)}	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	V _{GS} =10V, I _D =12A ③
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V _{DS} =V _{GS} , I _D =250μA
g _{fs}	Forward Transconductance	13	—	—	S	V _{DS} =50V, I _D =12A ③
I _{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V _{DS} =500V, V _{GS} =0V
		—	—	250		V _{DS} =400V, V _{GS} =0V, T _J =125°C
I _{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V _{GS} =20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V _{GS} =-20V
Q _g	Total Gate Charge	—	—	210	nC	I _D =20A
Q _{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29		V _{DS} =400V
Q _{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110		V _{GS} =10V See Fig. 6 and 13 ④
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	V _{DD} =250V
t _r	Rise Time	—	59	—		I _D =20A
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	110	—		R _G =4.3Ω
t _f	Fall Time	—	58	—		R _D =13Ω See Figure 10 ④
L _D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact
L _S	Internal Source Inductance	—	13	—		
C _{iss}	Input Capacitance	—	4200	—	pF	V _{GS} =0V
C _{oss}	Output Capacitance	—	870	—		V _{DS} =25V
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—		f=1.0MHz See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I _S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I _{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80		
V _{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	T _J =25°C, I _S =20A, V _{GS} =0V ④
t _{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	T _J =25°C, I _F =20A
Q _{rr}	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	μC	di/dt=100A/μs ④
t _{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L _S +L _D)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)
- ② V_{DD}=50V, starting T_J=25°C, L=4.3mH, R_G=25Ω, I_{AS}=20A (See Figure 12)
- ③ I_{SD}≤20A, di/dt≤160A/μs, V_{DD}≤V_{(BR)DSS}, T_J≤150°C
- ④ Pulse width ≤ 300 μs; duty cycle ≤2%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

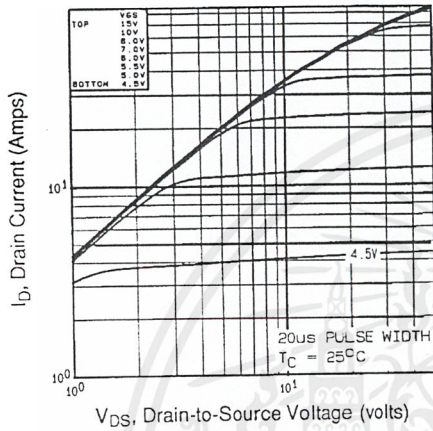


Fig 1. Typical Output Characteristics, $T_C=25^\circ\text{C}$

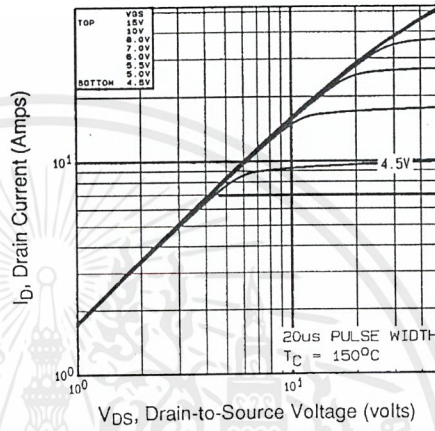


Fig 2. Typical Output Characteristics, $T_C=150^\circ\text{C}$

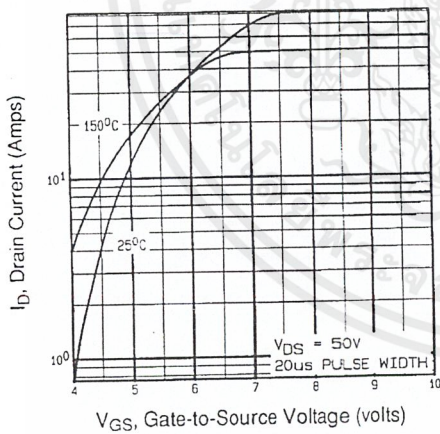


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

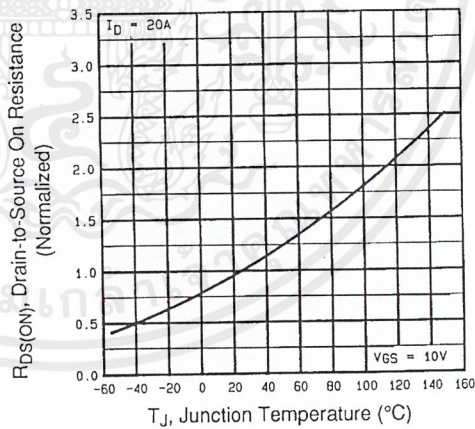


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

DATA SHEETS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

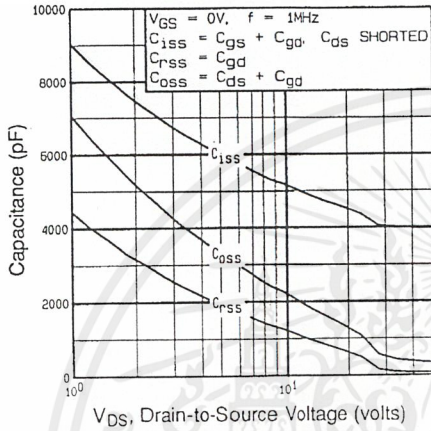


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

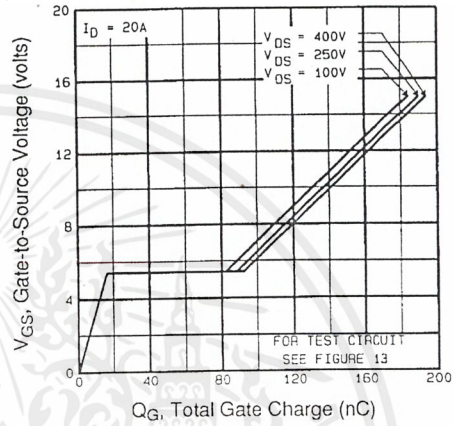


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

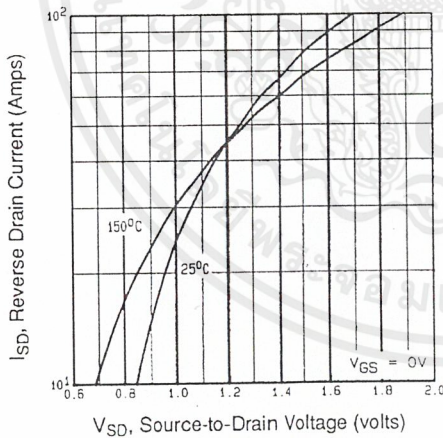


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

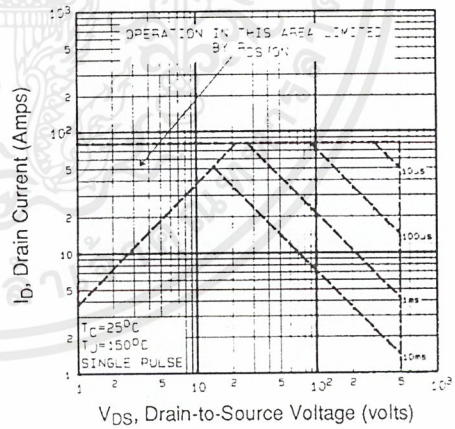


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

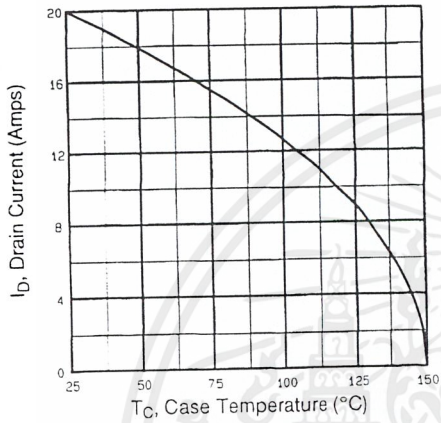


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

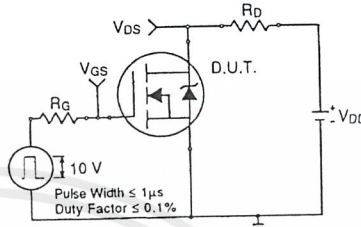


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

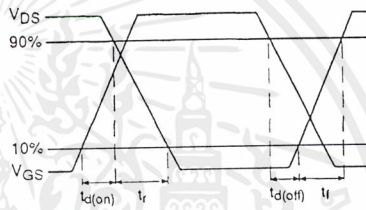


Fig 10b. Switching Time Waveforms

DATA SHEETS

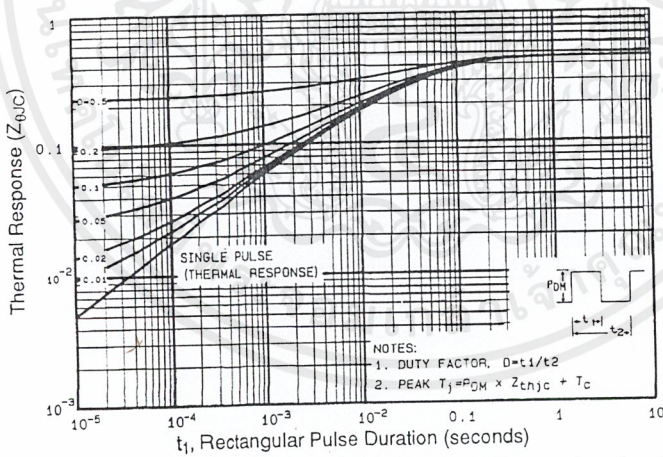


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

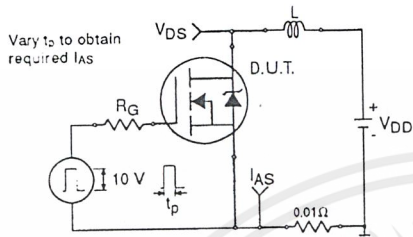


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

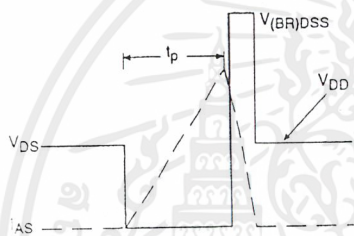


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

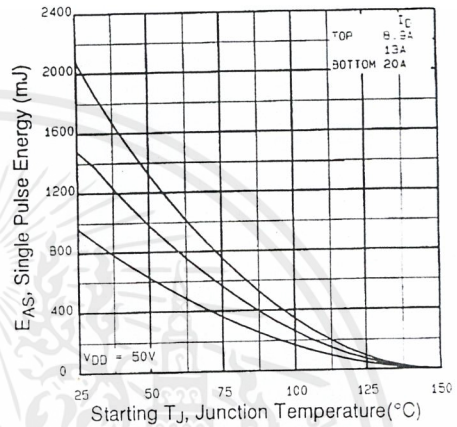


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

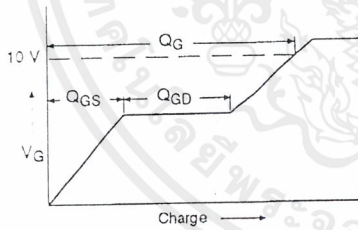


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

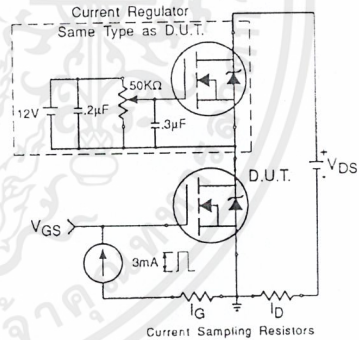


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit – See page 1505

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

Appendix C: Part Marking Information – See page 1517

International Rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดีตามวัตถุประสงค์ ทั้งนี้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดี จากบุคคลดังต่อไปนี้

1. รศ.ดร.วิริยะ พิเศษฐจำเริญ
2. ดร.วิจิตร กิณเรศ
3. อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย
4. พี่เอ พี่นัส พี่โรมัสและพี่ๆนักศึกษาปริญญาโททุกท่าน
5. เพื่อนๆกลุ่มโปรเจกต์ใกล้เคียงและทุกคนที่เข้ามาสร้างความตึกครั้นยามศึก

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และบุคคลดังกล่าวทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ คำปรึกษาและความช่วยเหลือต่างๆที่มีให้ ตลอดจนช่วยจัดหาอุปกรณ์ต่างๆที่ขาดเหลือในการทำโครงการงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุเมธ ศิริสันติสัมฤทธิ์,สมโชค เกษรบัวและอำพล สงวนวงศ์,"เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ",ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2542
- [2] ธีรยุทธ หนูเหลือง,ปฐมศักดิ์ โง้วเจริญและศักดิ์ชาย จตุพรวัฒน์ชัย,"เครื่องหลอมแบบเหนี่ยวนำ" , ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2543
- [3] L.Gragalies,J.A.Sabate,K.R.Wang,W.A.Tabisz,andF.C.Lee,"Desing of a 10 kW,500 kHz phase-shift Controlled Series-Resonant Inverter of Induction Heating,"IEEE,PP 843-849, 1993.
- [4] J.M.HO,F.C.Juang,"A Practical PWM Inverter Control Circuitry for Induction Heating and Studying of the performances under Load Variations,"IEEE,PP 249-299,1998
- [5] Satoshi Nagai,Eiji Hiraki,Yasushiro Arai and Matsuo Nakaoka,"New Phase-Shift Switching PWM Series Resonant Inverter Topologies and There Practical Evaluation," IEEE,1997.