

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสที่ลดจำนวนสวิทช์
REDUCED SWITCH CURRENT SOURCE RESONANT INVERTER



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **62708**
วัน,เดือน,ปี **21 ส.ค. 2549**

b. 11628904
i.

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรณการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2548


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสที่ลดจำนวนสวิตช์

ผู้จัดทำ

1. นาย ประทีป บัญรอด
2. นาย นพพล บัวเกา
3. นาย นิพนธ์ ยิ้มเจริญ
4. นาย สุพจน์ ทิพมา



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิริยะ พิเชษฐจำเริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสที่ลดจำนวนสวิตช์

นาย ประทีป	บุญรอด	46015103
นาย นพพล	บัวเกา	46015143
นาย นิพนธ์	ยิ้มเจริญ	46015144
นาย สุพจน์	ทิพมา	46015162
รศ.ดร.วิริยะ	พิเชษฐจำเริญ	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

ปริยญาณินพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและสร้าง เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ความถี่สูง สำหรับการให้ความร้อนแก่ภาชนะหุงต้ม โดยใช้ฮาร์ฟบริดจ์เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบขนาน ในวงจรอินเวอร์เตอร์นี้ ใช้มอสเฟตอนุกรมกับไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ และใช้หลักการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ พร้อมทั้งใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุรองความถี่สูงต่อทางด้านแหล่งจ่ายไฟสลับ ปริยญาณินพนธ์เล่มนี้จะแบ่งรายละเอียดออกเป็นบทๆ ในส่วนแรก จะกล่าวถึงหลักการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยมีโหลดเป็นชุดขดลวดเหนี่ยวนำ พร้อมภาชนะหุงต้ม หลักการเรโซแนนท์ และหลักการคำนวณหาวงจรมูลของขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมภาชนะหุงต้ม จากนั้นจะเป็นการเปรียบเทียบวงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 2 ลักษณะ ในส่วนที่สอง จะเป็นการคำนวณวิเคราะห์หาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ในวงจรเรโซแนนท์ หลักการคำนวณหาค่าความต้านทานและอินดักแตนซ์เทียบเท่าของโหลดเรโซแนนท์ขนาน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณวิเคราะห์หาลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าต่อไป พร้อมกับการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องทางทฤษฎี โดยจะทำการทดสอบในช่วงความถี่ 30-35 กิโลเฮิรตซ์ ให้กำลังเอาต์พุต 860 วัตต์

REDUCED SWITCH CURRENT SOURCE RESONANT INVERTER

Prateep Boonrod

Noppol Buakao

Nipon Yimjarern

Supot Tibma

Assoc. Prof. Dr. Viriya Pichetchumrun Advisor

2005

ABSTRACT

This thesis presents an analysis of high frequency induction cooker applicable heating up for utensil, using a half-bridge parallel resonant inverter. A Reduced Switch Current Source Resonant Inverter is implemented using MOSFETs in series with diode as a switching device and become high values by the principle of DC current supply to inverter circuit inclusive of using the inductance and capacitance filter high frequency connect to ac supply side together. The details in this thesis are divided into various chapters. The principle of high-frequency induction cooker with a load of induction coil and utensil, the principle of resonant and the principle of calculation for an equivalent circuit of the induction coil with the utensils placed on it are first described. Then, the comparison of two types of half-bridge inverter circuit. In the second described concern the calculation of various resonant circuit parameters and then followed by the calculation of equivalent resistance and inductance of a parallel resonant load circuit which can be used to calculate various voltage and current waveforms which again can lead to the calculation of various electrical characteristics of the load circuit, the theoretical results of which are also verified by experiment and simulation which operates in the switching frequency range of 30-35 kHz and give the result of the output power 860 W.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินงานต่าง ๆ จาก รศ.ดร.วิริยะ พิเชษฐจำเริญ ที่ให้คำปรึกษา คณะผู้จัดทำซาบซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบคุณอาจารย์ยงยุทธ นาราชฎร์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม พี่ศักดา พรหมเหมือน พี่ธรรมจักร กงวิรัตน์ พี่ณัฐภูมิ พลชะดิน ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำทุก ๆ อย่าง ไม่ว่าจะเป็น ความรู้เกี่ยวกับวงจรขับแหล่งข้อมูล โปรแกรม MATLAB รวมถึงการสร้างเครื่องทดสอบ ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ และ พี่ ๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือทั้งร่างกาย แรงใจ จนชิ้นงานนี้ได้สำเร็จลงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คณะอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และแนวความคิดต่าง ๆ จนคณะผู้จัดทำได้เป็นวิศวกรที่ดี มีคุณภาพ ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำเนิด ความรู้และประโยชน์ที่มีในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแต่ท่านผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

10 มีนาคม 2549

สารบัญ

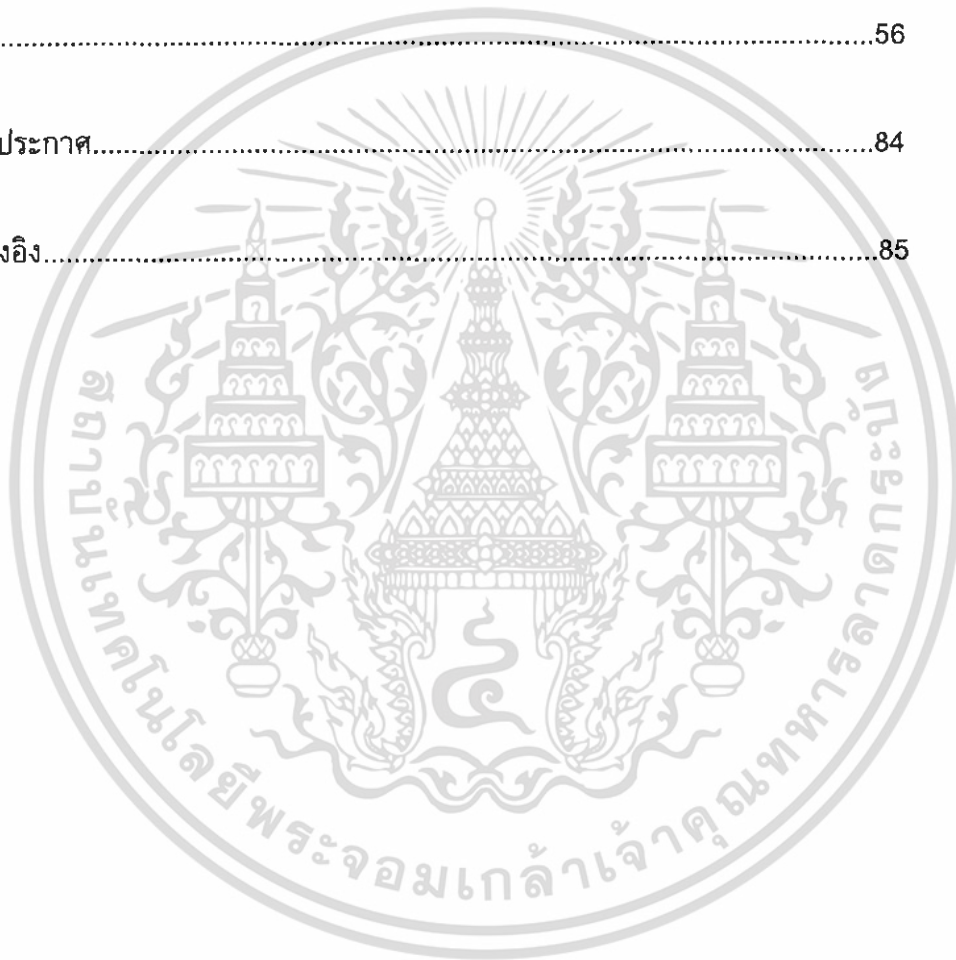
	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 พื้นฐานของการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	3
2.3 หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน.....	8
2.3.1 โหลดเรโซแนนท์.....	8
2.4 พื้นฐานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ.....	10
บทที่ 3 หลักการพื้นฐานของวงจรเรโซแนนท์ที่ใช้กับ วงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	13
3.1 บทนำ.....	13
3.2 หลักการเรโซแนนท์.....	13
3.3 สวิตช์เรโซแนนท์.....	15
3.4 หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในแบบอุดมคติ และ ลักษณะพื้นฐานของตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟต.....	18
3.4.1 ลักษณะตัวเก็บประจุแฝงภายในการพิจารณามอสเฟต.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 คุณลักษณะของอุปกรณ์.....	21
4.1 บทนำ.....	21
4.2 การใช้งานมอสเฟตกำลัง.....	21
4.3 คุณลักษณะการสวิตช์.....	22
4.4 การขนานมอสเฟตกำลัง.....	23
4.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะหุงต้ม.....	24
บทที่ 5 หลักการทำงานของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์	
ขณะขับโหลดเรโซแนนซ์ขนาน.....	26
5.1 บทนำ.....	26
5.2 หลักการทำงาน.....	23
5.3 การขับนำมอสเฟตกำลัง.....	28
5.4 การทำงานของอินเวอร์เตอร์และการควบคุม.....	29
5.4.1 การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์.....	30
5.4.2 การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์.....	31
บทที่ 6 โครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	34
6.1 บทนำ.....	34
6.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น.....	34
6.3 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Bridge Inverter).....	34
6.4 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter).....	35
6.41 ชุดสร้างสัญญาณควบคุม.....	35
6.42 วงจรขยายสัญญาณหรือวงจรขับ.....	36
6.5 ชุดโหลดเรโซแนนซ์.....	37
6.6 การออกแบบวงจร ชุดโหลดเรโซแนนซ์.....	37
บทที่ 7 ผลการทดลอง.....	40
7.1 บทนำ.....	40
7.2 การทดลองเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	40
7.3 รูปกระแสและแรงดันที่จุดต่างๆ ในกับังจร.....	41
7.4 รูปกระแสและแรงดันที่จ่ายโหลด.....	43
7.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองขณะมีโหลดกับไม่มีโหลด.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6 การทดลองเปรียบเทียบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในกรณีความถี่ต่ำกว่า และสูงกว่าความถี่เรโซแนนท์.....	50
7.6.1 การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนท์.....	50
7.6.2 การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์.....	50
7.7 รูปสัญญาณที่จุดต่างๆ ของชุดควบคุม.....	52
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	55
ภาคผนวก.....	56
กิตติกรรมประกาศ.....	84
เอกสารอ้างอิง.....	85



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2-1 หลักการให้ความร้อนของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	3
2-2 วงจรเทียบเท่าของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม.....	4
2-3 อิมพีแดนซ์เทียบเท่าของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม.....	4
2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิว ของภาชนะหุงต้ม.....	7
2-5 บล็อกไดอะแกรมของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	8
2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใช้งานกับพิกัดกำลังไฟฟ้า สำหรับอุปกรณ์สวิตช์แต่ละชนิด.....	11
2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างย่านความถี่ใช้งานกับพิกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้า สำหรับงานให้ความร้อน.....	12
3-1 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และกระแสต่อค่าความถี่สำหรับเรโซแนนท์ แบบขนาน.....	13
3-2 วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจรเรโซแนนท์ขนาน.....	14
3-3 การเปลี่ยนวงจรให้เป็นวงจรเรโซแนนท์ขนาน.....	14
3-4 สวิตช์เรโซแนนท์.....	16
3-5 ตัวอย่างรูปคลื่นและโลโก้ของจุดทำงานของสวิตช์ในกรณี ZCS และ ZVS.....	16
3-6 สวิตช์เรโซแนนซ์เดี่ยวกระแสศูนย์และรูปคลื่นของกระแส.....	17
3-7 สวิตช์เรโซแนนซ์เดี่ยวแรงดันศูนย์และรูปคลื่นของแรงดัน.....	18
3-8 สัญลักษณ์มอสเฟตแบบ n-channel.....	19
3-9 ลักษณะการเก็บและคายประจุที่สะสมอยู่ภายใน C_{oss} ผ่านตัวมอสเฟต.....	20
4-1 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของมอสเฟตแบบ n และ แบบ p.....	22
4-2 รูปของวงจรมอสเฟตกำลัง	23
4-3 การขนานมอสเฟตกำลัง.....	24
4-4 เส้นกราฟแสดงการหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะหุงต้ม.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5-1	วงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์โร้โซแนนท์ขนานของเครื่องให้ความร้อนแบบ เหนี่ยวนำความถี่สูง.....	26
5-2	โหมดการทำงานที่ 1.....	27
5-3	โหมดการทำงานที่ 2.....	27
5-4	โหมดการทำงานที่ 3.....	28
5-5	รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด.....	28
5-6	รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	29
5-7	รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่คาปาซิเตอร์.....	29
5-8	สัญญาณขั้วนำมอสเฟตกำลัง.....	30
5-9	อินเวอร์เตอร์โร้โซแนนท์แบบแหล่งจ่ายกระแสครึ่งบริดจ์ที่ใช้มอสเฟต อนุกรมกับไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตช์.....	31
5-10	รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตช์ ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนท์.....	32
5-11	รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตช์ ที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์.....	33
6-1	แสดงชุดกรองความถี่สูงทางด้านอินพุต.....	34
6-2	แสดงวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น.....	35
6-3	แสดงการต่อใช้งานไอซีเบอร์ TL 494.....	36
6-4	วงจรขยายสัญญาณหรือวงจรขับ.....	36
6-5	แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์.....	37
6-6	แสดงวงจรสมมูลของโหลดเรโซแนนท์.....	38
6-7	รูปทรงของขดลวดเหนี่ยวนำของภาชนะหุงต้ม.....	38
6-8	ผังงานการหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเรโซแนนท์.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7-1 การวัดสัญญาณ Input และ Output ของวงจร.....	41
7-2 รูปกระแสและแรงดันอินพุตของวงจร.....	41
7-3 รูปกระแสและแรงดันหลังวงจร Bridge.....	42
7-4 รูปกระแสและแรงดันที่ L_5 จ่ายให้กับ L_1 และ L_2	42
7-5 รูปกระแสและแรงดันที่ L_1 และ L_2 จ่ายให้กับวงจร.....	43
7-6 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด.....	43
7-7 ฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่โหลด.....	44
7-8 ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่โหลด.....	44
7-9 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่คาปาซิเตอร์.....	45
7-10 ฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่คาปาซิเตอร์.....	45
7-11 ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่คาปาซิเตอร์.....	46
7-12 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	46
7-13 ฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	47
7-14 ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	47
7-15 รูปแรงดันและกระแสที่โหลดเมื่อเทียบกับ Fundamental.....	48
7-16 ฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่โหลดเมื่อเทียบกับ Fundamental.....	48
7-17 ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่โหลดเมื่อเทียบกับ Fundamental.....	49
7-18 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีโหลด.....	49
7-19 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรไม่มีโหลด.....	50
7-20 รูปกระแสและแรงดันที่โหลดในขณะทำงานต่ำกว่าความถี่เรโซแนนท์.....	51
7-21 รูปกระแสและแรงดันที่โหลดในขณะทำงานสูงกว่าความถี่เรโซแนนท์.....	51
7-22 สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL 494.....	52
7-23 สัญญาณอินพุตของไอซีเบอร์ TLP 250.....	53
7-24 สัญญาณเอาต์พุตของชุดขับที่ใช้ขับนำมอสเฟต.....	53
7-25 ภาพขยายสัญญาณเอาต์พุตของชุดขับที่ใช้ขับนำมอสเฟต.....	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรรีเลย์และวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์.....	9
2-2 การเปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์และรูปคลื่นแรงดันและกระแส ที่ใช้ในวงจรรีเลย์และวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดอนุกรมและขนาน.....	10
4-1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในภาชนะหุ้มตัวที่ความถี่ 30 kHz.....	24
7-1 อุปกรณ์และค่าพิกัดต่าง ๆ ของวงจรรีเลย์และวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลอง.....	40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนในการหุงต้มมีอยู่มากมายหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นการใช้หลอดเปล่งแสงให้ความร้อนหรือการใช้ขดลวดให้ความร้อนก็ตาม ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการพัฒนาไปเป็นอย่างมาก ซึ่งได้รวมไปถึงการวิจัยและการพัฒนาวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ที่สามารถจ่ายโหลดความร้อนเหนี่ยวนำด้วยกำลังที่สูง โดยวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์จะใช้ MOSFET หรือเป็น IGBT ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองนั้นมีความไวในการสวิตช์สูงและทนกระแสได้พอสมควร จึงทำให้อุปกรณ์ L และ C มีขนาดที่เล็กลง ทำให้น้ำหนักโดยรวมของอินเวอร์เตอร์นั้นมีน้ำหนักเบาและสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าในระดับที่สูงขึ้นด้วย จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้อินเวอร์เตอร์ในระยะหลังนั้นได้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการ การทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ความถี่สูง โดยมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าผ่านวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ไปยังโหลด

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้า เมื่อตัวแปรต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะเป็นค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าคาปาซิเตอร์

1.2.3 เพื่อสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ในวงจรเรโซแนนซ์ขนาน เช่นอิมพีแดนซ์ มุมระหว่างแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุท และกำลังไฟฟ้า ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความถี่ที่ปรับเปลี่ยนไป

1.2.4 เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า และเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ได้เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความถี่

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

การวิเคราะห์เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดแหล่งจ่ายกระแส เพื่อใช้ในการให้ความร้อนแก่ภาชนะหุงต้มในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งเนื้อหาออกได้เป็นส่วนๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการทำโครงการ ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 หลักการพื้นฐานของการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูงและหลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน

บทที่ 3 หลักการเรโซแนนซ์ขนานที่ใช้กับวงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ อธิบายหลักการเกิดเรโซแนนซ์ และการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรเรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ค่าคุณลักษณะของอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น มอสเฟต ค่าความเหนียวนำ และ ภาวะที่ใช้ในการวิจัย

บทที่ 5 การวิเคราะห์หลักการการทำงานของวงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ขณะขับโหลด เรโซแนนท์ขนาน ลักษณะคลื่นของแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆของวงจร ลักษณะโหมดการทำงาน ของวงจรในช่วง 1 พีเรียด และลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทตลอดจนการหา สเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาท์พุทของวงจรอินเวอร์เตอร์

บทที่ 6 ส่วนประกอบต่างๆที่ประกอบกันขึ้นเป็นเครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำ ความถี่สูง โดยจะแสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์แต่ละส่วนว่ามีลักษณะการทำงาน เป็นอย่างไร แต่ละส่วนแยกย่อยเป็นอย่างไร มีกี่แบบ ความเหมาะสมที่นำมาใช้กับโครงการนี้ เป็นอย่างไร

บทที่ 7 ผลการทดลองของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำความถี่สูง

บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง เป็นการกล่าวถึงข้อแนะนำ ปัญหา และแนวทางการแก้ไขผลการทดลอง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาการทำงานของเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบครึ่งบริดจ์

1.4.2 ศึกษาหลักการให้ความร้อนโดยอาศัยหลักการเหนียวนำเบื้องต้น

1.4.3 ศึกษาหลักการของ ZCS (Zero Current Switching) และ ZVS (Zero Voltage Switching)

1.4.4 จำลองการทำงานของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบครึ่งบริดจ์ แบบไบโพล่าด้วยโปรแกรม PSpice และโปรแกรม MATLAB

1.4.5 ทำการทดลองและทดสอบการทำงานของชุดวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่าย กระแสแบบครึ่งบริดจ์โดยการจำลองโหลด

1.4.6 ทำการทดลองและทดสอบการทำงานของชุดวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่าย กระแสแบบครึ่งบริดจ์โดยใช้โหลดงานจริง

1.4.7 เก็บข้อมูล วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

สามารถนำเครื่องต้นแบบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำด้วยความถี่สูง ชนิด แหล่งจ่ายกระแสนี้ ไปพัฒนาเพื่อใช้ในวงการอุตสาหกรรม หรือเพื่อการผลิต-จำหน่าย ทั้ง ภายในประเทศ และ ต่างประเทศ เพื่อเป็นการสนับสนุนทางด้านอุตสาหกรรมของประเทศและ เพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

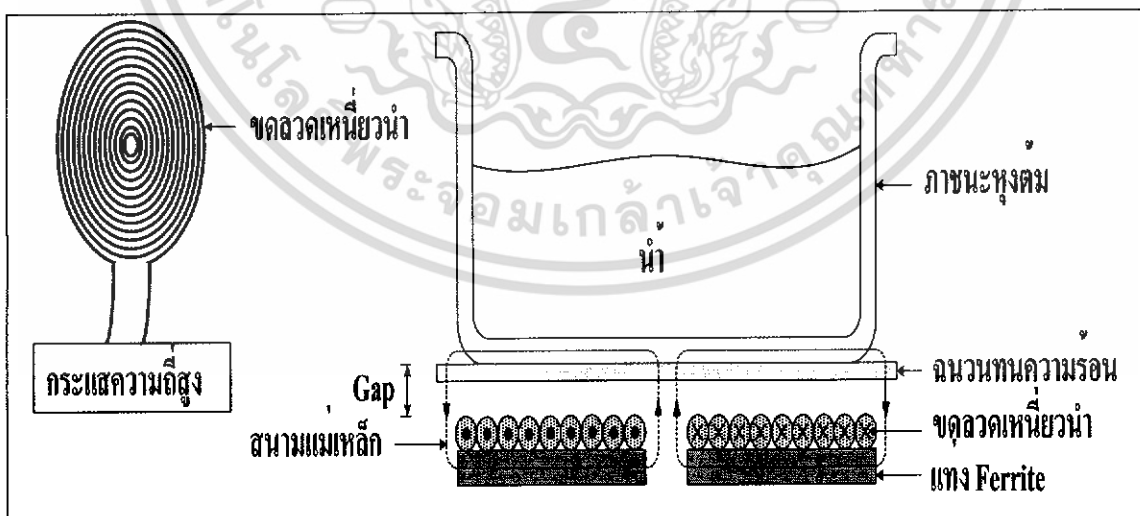
ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง การพิจารณาวงจรเทียบเท่าของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำในลักษณะของหม้อแปลง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ชุดโหลดภาชนะหุงต้มได้ง่ายขึ้น สำหรับโหลดภาชนะหุงต้มที่ใช้วัสดุต่างชนิดกันจะมีค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นวัสดุของภาชนะหุงต้มแต่ละชนิดจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญในการพิจารณาและการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อให้เหมาะสมกับโหลดภาชนะหุงต้มนั้นๆ และการพิจารณาหลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน ซึ่งจะพิจารณาในส่วนของโครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ เปรียบเทียบอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์และฮาร์ฟบริดจ์ เปรียบเทียบโหลดเรโซแนนท์ทั้งแบบอนุกรมและขนาน

2.2 พื้นฐานของการเกิดความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

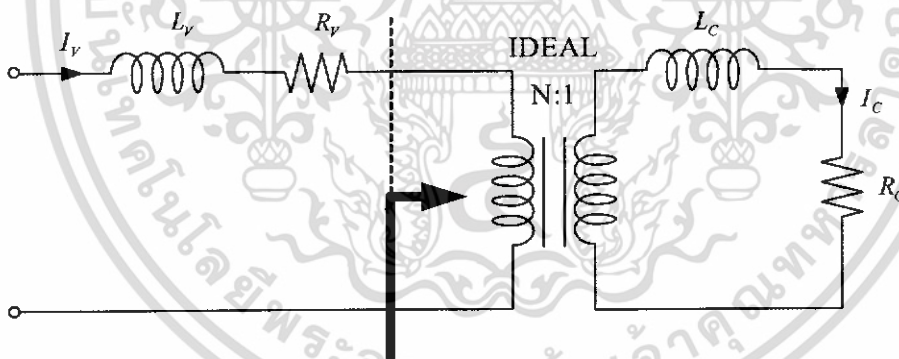
การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงนี้ ความร้อนที่ได้จะเกิดขึ้นที่ภาชนะโดยตรง โดยอาศัยกระแสไหลวนในภาชนะหุงต้ม ทำให้หุงต้มได้ในเวลาอันรวดเร็ว โดยจะมีหลักการพิจารณาเหมือนกับหม้อแปลง เพื่อหาค่าอินดักแตนซ์และความต้านทานเทียบเท่าต่างๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุของภาชนะแต่ละชนิด ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาเลือกใช้ภาชนะหุงต้มให้เหมาะสมกับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำต่อไป



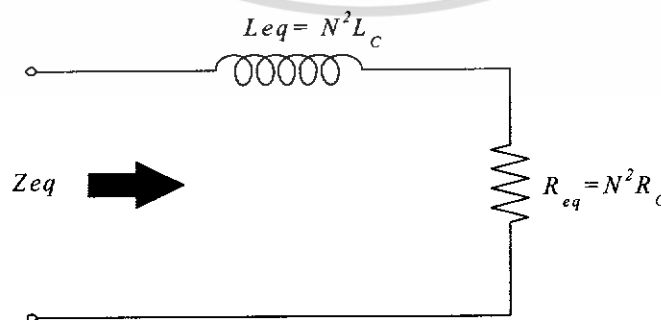
รูปที่ 2-1 หลักการให้ความร้อนของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ จากรูปที่ 2-1 เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้ภาชนะหุงต้ม ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Magnetic Flux) กับภาชนะหุงต้ม ถ้าภาชนะหุงต้มเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferro-Magnetic สนามแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับภาชนะจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ในภาชนะหุงต้มเป็นเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นที่ก้นของภาชนะหุงต้ม และจะถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำที่อยู่ภายในภาชนะ ทำให้น้ำเดือดได้ในที่สุด ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะไม่มีการสัมผัสกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม ทำให้ปลอดภัยต่อการใช้งาน เตาหุงต้มเหนี่ยวนำนี้จะมีประสิทธิภาพในการหุงต้มสูง เนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นที่ตัวภาชนะโดยตรง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของขดลวดเหนี่ยวนำและไหลดภาชนะหุงต้มจะมีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านซึ่งกันและกัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลง โดยสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลง ดังรูปที่ 2-2 โดยภาชนะหุงต้มทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิมีจำนวนขดลวดเพียง 1 รอบ โดยมี Leakage Inductance ของภาชนะหุงต้ม L_c และความต้านทานของภาชนะ R_c ส่วนขดลวดทางด้านปฐมภูมิสามารถแทนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ โดยมี Leakage Inductance ของขดลวดเหนี่ยวนำ L_v ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ R_v และเมื่อรวมกับ L_c และ R_c ทางด้านทุติยภูมิที่ย้ายมารวมกับด้านปฐมภูมิแล้วจะได้อิมพีแดนซ์รวม Z_{eq} ประกอบด้วย R_{eq} และ L_{eq} ดังรูปที่ 2-3 ดังนั้นขดลวดเหนี่ยวนำและไหลดภาชนะหุงต้มนี้ สามารถเขียนแทนด้วยวงจรเทียบเท่า ซึ่งประกอบด้วยอินดักแตนซ์เทียบเท่า L_{eq} และความต้านทานเทียบเท่า R_{eq}



รูปที่ 2-2 วงจรเทียบเท่าของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม



รูปที่ 2-3 อิมพีแดนซ์เทียบเท่าของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดเหนี่ยวนำและโพลดภาชนะหุ้มตุ้มสามารถเขียนแทนด้วยวงจรมุมเทียบเท่า ซึ่งประกอบด้วย อินดักแตนซ์เทียบเท่า และความต้านทานเทียบเท่าสามารถหาค่าได้ดัง สมการ

$$R_{eq} = R_c + N^2 R_v \quad (2.1)$$

เมื่อ $R_{vp} = N^2 R_c$ จะได้

$$R_{eq} = R_c + R_{vp} \quad (2.2)$$

$$L_{eq} = L_c + N^2 L_v \quad (2.3)$$

โดยที่ N คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

R_c คือ ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิหรือขดลวดเหนี่ยวนำ

R_v คือ ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิหรือโพลดภาชนะหุ้มตุ้ม

L_c คือ Leakage Inductance ทางด้านปฐมภูมิ

L_v คือ Leakage Inductance ทางด้านทุติยภูมิ

R_{vp} คือ ความต้านทานทางด้านปฐมภูมิของโพลดภาชนะหุ้มตุ้ม

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$P_c = I_c^2 R_c \quad (2.4)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในโพลดภาชนะหุ้มตุ้มมีค่าเท่ากับ

$$P_v = I_v^2 R_v \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิจะได้

$$P_v = I_c^2 R_{vp} \quad (2.6)$$

เนื่องจาก

$$I_v = N I_c \quad (2.7)$$

โดยที่ I_c คือ กระแสในโพลดภาชนะหุ้มตุ้ม

I_v คือ กระแสในขดลวดเหนี่ยวนำ

ดังนั้นประสิทธิภาพของโพลดภาชนะหุ้มตุ้มจะได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_v}{P_v + P_c} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{I_v^2 R_v}{I_v^2 R_v + I_c^2 R_c} \quad (2.9)$$

$$= \frac{I_v^2 R_v}{\left[\frac{I_v^2}{N^2} \right] [R_v N^2] + I_c^2 R_c} \quad (2.10)$$

$$= \frac{I_c^2 R_{vp}}{[I_c^2] [R_{vp}] + I_c^2 R_c} \quad (2.11)$$

$$= \frac{R_{vp}}{R_{vp} + R_c} \quad (2.12)$$

$$= \frac{1}{1 + R_c / R_{vp}} \quad (2.13)$$

ความร้อนส่วนมากจะเกิดขึ้นโดยกระแสไหลวนในโหลดภาชนะหุงต้มที่บริเวณชั้นผิว นอกของกันภาชนะหุงต้มที่มีความลึกเท่ากับ δ_{vessel} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของภาชนะหุงต้มดังสมการ

$$\delta_{vessel} = \sqrt{\frac{1}{\mu_o}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{vessel}}{\mu_r f}} \quad (2.14)$$

โดยที่	δ_{vessel}	คือ	ค่าความลึกผิว (m)
	ρ_{vessel}	คือ	สภาพความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของภาชนะหุงต้ม ($\Omega \cdot m$)
	f	คือ	ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน (Hz)
	μ_r	คือ	ความขาบซึมแม่เหล็กสัมพัทธ์
	μ_o	คือ	$4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m)

ดังนั้นความต้านทานที่ผิวของโหลดภาชนะหุงต้มในย่านความถี่สูง R_v มีค่าดังนี้

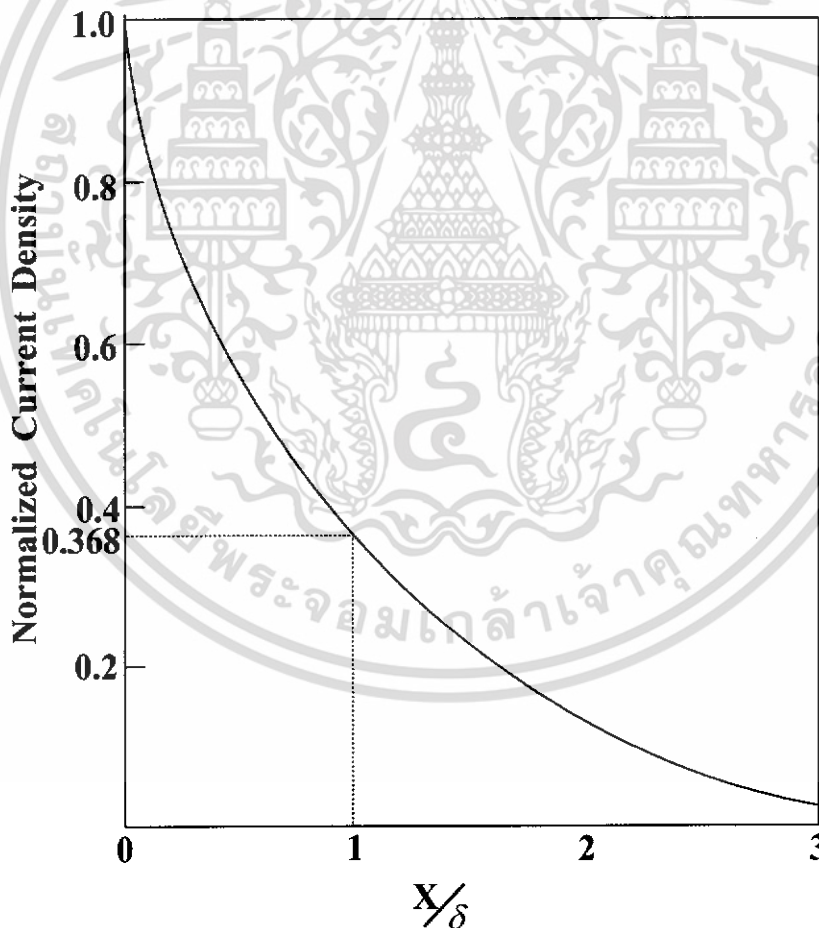
$$R_v = \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{4\pi \times 10^{-7}} \cdot \sqrt{\rho \mu_r f} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการที่ (2.15) ลงในสมการที่ (2.5) จะได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของโพลดภาชนะ
หุงต้ม P_v ดังนี้

$$P_v = I_v^2 R_v = \sqrt{4\pi \times 10^{-7}} \cdot (NI_c)^2 \cdot \sqrt{\rho \mu_r f} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.15) จะเห็นได้ว่าความต้านทานของภาชนะหุงต้ม R_v จะแปรผัน
โดยตรงกับสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ρ ของภาชนะหุงต้ม ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก
 μ_r และความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ f ที่ป้อนจากอินเวอร์เตอร์ จากสมการที่ (2.16) จะได้ว่า
การเพิ่มของเพาเวอร์เอาต์พุท P_v ของภาชนะหุงต้มสามารถทำได้โดยการเพิ่มความถี่ f ของ
กระแสในขดลวดเหนี่ยวนำและแอมแปร์-เทอรัน $N \cdot I_c$ ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ รูปที่ 2-4
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะความลึกจากผิวด้านนอกของภาชนะ
หุงต้ม จะเห็นได้ว่ากระแสมีความหนาแน่นสูงสุดที่ผิวด้านนอกของภาชนะและจะลดลงเมื่อ
ระยะความลึกจากผิวมากขึ้น



รูปที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของภาชนะหุงต้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน

สำหรับโครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงสามารถแบ่งการทำงานออกเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2-5 รายละเอียดประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ 1 เฟส 50 เฮิร์ต จากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับชุดเรกติฟายเออร์ที่ต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง แล้วจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟตรง เป็นแรงดันไฟสลับความถี่สูง โดยใช้เพาเวอร์มอสเฟตอนุกรมกับไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตชิง เพื่อจ่ายให้กับชุดโหลดเรโซแนนท์

2.3.1 โหลดเรโซแนนท์

สำหรับโหลดเรโซแนนท์ที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงโดยทั่วไป เช่น เครื่องชุบแข็งผิวโลหะ เครื่องหลอมโลหะ เตาหุงต้มเหนี่ยวนำ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องเชื่อมความถี่สูง จะมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือลดการสูญเสียในการสวิตช์ เมื่อสวิตช์ตัดวงจรที่กระแสศูนย์ (ZCS) หรือสวิตช์ต่องจรที่แรงดันศูนย์ (ZVS) และข้อเสียเปรียบที่สำคัญของวงจรเรโซแนนท์แบบขนานคือ ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรกติฟายเออร์ และจำเป็นต้องมี Choke ขนาดใหญ่พอเนื่องจากเป็น Constant Current อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์โดยทั่วไปจะมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ชนิดอนุกรมและชนิดขนาน ทั้งสองชนิดนี้มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2-1 และมีโครงสร้างของวงจรดังแสดงในตารางที่ 2-2 จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนท์ชนิดอนุกรมจะใช้แหล่งจ่ายชนิดแรงดันคงที่ (Constant Voltage Source) เนื่องจากต้องใช้คาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อกรองแรงดันให้เรียบแล้วจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ สำหรับลักษณะคลื่นแรงดันจะเป็นรูปคลื่นสแควร์ และกระแสจะเป็นรูปคลื่นไซน์ ส่วนอินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนท์ขนานจะมีลักษณะที่ตรงข้ามกันคือ จะเป็นชนิดแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source) เนื่องจากต้องใช้อินดักเตอร์ขนาดใหญ่ เพื่อกรองกระแสให้เรียบแล้วจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ ส่วนลักษณะรูปคลื่นแรงดันจะเป็นรูปคลื่นไซน์ ในขณะที่รูปคลื่นกระแสจะเป็นรูปสแควร์



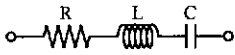
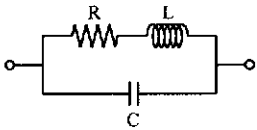


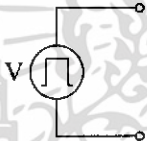
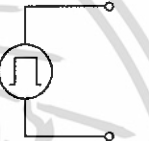
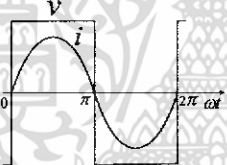
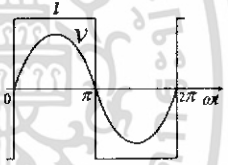
รูปที่ 2-5 บล็อกไดอะแกรมของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ชนิดอนุกรมและขนาน

วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิด	ข้อดี	ข้อเสีย
เรโซแนนท์อนุกรม	<ul style="list-style-type: none"> - โครงสร้างง่ายและราคาถูก - สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าดีซีได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรกติฟายเออร์ โดยไม่ต้องมีการปรับแรงดัน - กำลังไฟฟ้าที่จ่ายสามารถปรับควบคุมได้ง่ายโดยการปรับความถี่ที่วงจรอินเวอร์เตอร์ 	<ul style="list-style-type: none"> - ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรโหลดจะเปิดวงจรออกไม่ได้ - ไม่สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้ - ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับความถี่สวิตช์ให้เลื่อนห่างออกจากความถี่เรโซแนนท์ ทำให้กระแสไม่ค้อยเป็นไซน์ ซึ่งเป็นผลให้มีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นตามมา
เรโซแนนท์ขนาน	<ul style="list-style-type: none"> - ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรโหลดสามารถเปิดวงจรออกได้ - สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้ - อุปกรณ์ L และ C ที่ใช้ในวงจรเรโซแนนท์ไม่จำเป็นต้องมีพิกัดแรงดันสูงเนื่องจากกระแสเป็นรูปคลื่นสแควร์ จึงมีค่า Peak คงที่ที่ตำแหน่งเรโซแนนท์ 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าดีซีได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรกติฟายเออร์ แต่ต้องมีการปรับแรงดันจากการใช้สวิตช์ควบคุม - จำเป็นต้องมี Choke เนื่องจากเป็น Constant Current - มีขนาดใหญ่เนื่องจากมี Choke และวงจรควบคุมแรงดันดีซีอินพุทให้กับอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์และรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน

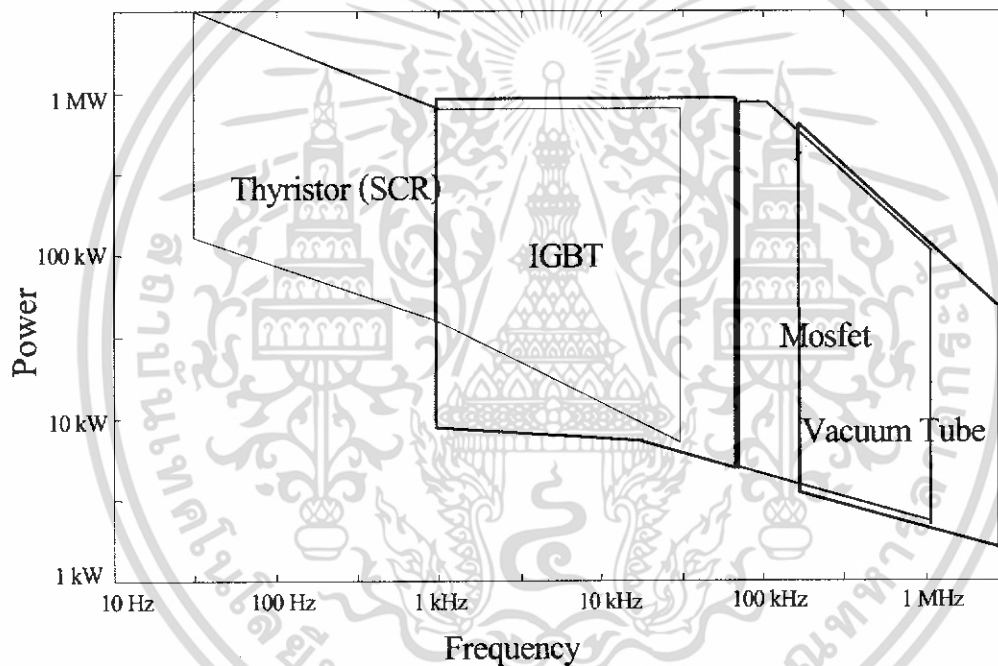
Inverter	Series Resonant	Parallel Resonant
Load		
Switch		
Source		
Output Waveform		

2.4 พื้นฐานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกันและมีการพัฒนามาตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันทั้งทางด้านรูปแบบ ระบบ และชนิดอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเครื่องให้ความร้อนนี้ จะเป็นส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งในอดีตจะสามารถใช้งานได้ถึง 10kHzในงานอุตสาหกรรม ในปัจจุบันจึงนิยมใช้ semi-conductor Inverter เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในงานด้านการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าตั้งแต่การใช้งานในย่านความถี่ต่ำ จนถึงย่านความถี่สูงโดยที่ความถี่ต่ำกว่า 1KHz จนถึงย่านความถี่ปานกลาง 10kHz จะใช้ SCR Inverter และย่านความถี่ปานกลาง 10KHz ถึงย่านความถี่สูง 50KHz ใช้ IGBT เป็นสวิตช์ของ Inverter ส่วนย่านความถี่สูง 50KHz-450KHz ใช้ Mosfet Inverter และในย่านความถี่สูงกว่า 450KHz ยังคงจำเป็นต้องใช้หลอดสุญญากาศ (Vacuum tube) อยู่เช่นเดิม จะเห็นว่าสามารถที่จะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับงานการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำได้ตั้งแต่ในย่านความถี่ต่ำ 50Hz จนถึงย่านความถี่สูง 450KHz ดังในรูปที่ 2-6 ซึ่งอธิบายความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าและพิกัดความถี่ของอุปกรณ์แต่ละเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

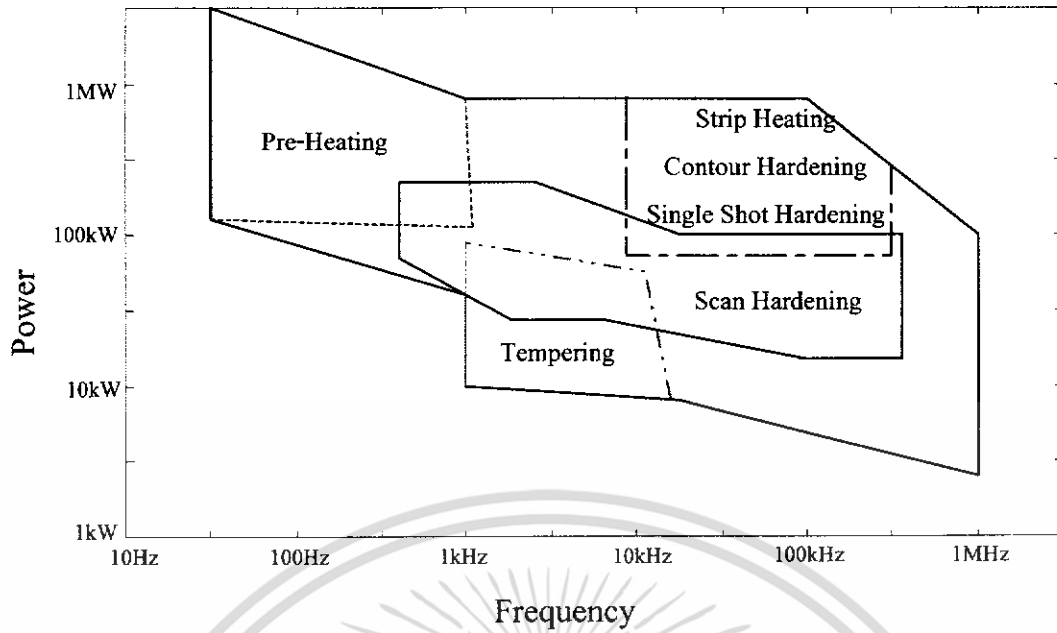
ชนิดที่ยังคงมีใช้ในปัจจุบันคือ Thyristor, IGBT, Mosfet , Vacuum Tube และยังสามารถได้ว่า อุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกำลังที่สูงได้จะถูกใช้งานในย่านความถี่ต่ำ ส่วนอุปกรณ์ที่สามารถทำงานในย่านความถี่สูงจะสามารถจ่ายกำลังได้ต่ำกว่า

ความสัมพันธ์ระหว่างย่านความถี่กับพิกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับงานให้ความร้อนในแบบต่างๆ อธิบายได้ในรูปที่ 2-7 ซึ่งย่านการให้ความร้อนนี้จะมีลักษณะคล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใช้งานกับพิกัดกำลังไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์สวิตช์แต่ละชนิด โดยจะเห็นว่าสามารถประมาณได้ว่าลักษณะการใช้งานบางอย่างจะเหมาะสมกับอุปกรณ์บางชนิดได้ เช่นในงาน Scan Hardening ซึ่งใช้ความถี่ย่านประมาณ 1 kHz ถึงประมาณ 500kHz ก็จะเป็นย่านที่ใช้ IGBT และมอสเฟตเป็นอุปกรณ์ โดย IGBT จะแบ่งใช้งานย่านที่ความถี่ต่ำและมอสเฟตจะแบ่งใช้งานย่านความถี่สูง



รูปที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใช้งานกับพิกัดกำลังไฟฟ้า สำหรับอุปกรณ์สวิตช์แต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างย่านความถี่ใช้งานกับพิภพการจ่ายกำลังไฟฟ้า
สำหรับงานให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการพื้นฐานของวงจรเรโซแนนซ์ที่ใช้กับ วงจรอาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์

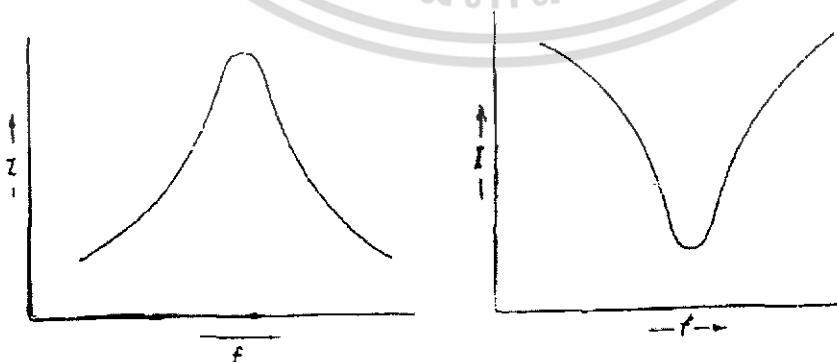
3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง หลักการพื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบอาร์ฟบริดจ์ ซึ่งมีโหลดเอาต์พุตประกอบด้วยชุดขดลวดความถี่สูงและภาชนะหุงต้มซึ่งเป็นชิ้นงานประเภทภาชนะหุงต้มที่ต้องการให้เกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ จากคลื่นกระแสความถี่สูงจากเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ไปยังขดลวด เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสไหลวนความถี่สูงที่ตัวชิ้นงาน โดยเนื้อหาที่นำเสนอจะเกี่ยวกับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ เช่น อิมพีแดนซ์ การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของวงจรอาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ขนาน รวมถึงหลักการคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูลและค่าความเหนี่ยวนำสมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ขนานขณะขับกระแสความถี่สูงไปยังชิ้นงาน

3.2 หลักการเรโซแนนซ์

เมื่อเราป้อนความถี่ให้กับวงจรเรโซแนนซ์ RLC แบบอนุกรม จะพบว่าที่ความถี่ค่าหนึ่งค่า X , จะเท่ากับ X_c เป็นผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ RLC แบบอนุกรมมีค่าต่ำสุดที่นั่นคือ $Z=R$ ปรากฏการณ์เช่นนี้เราเรียกว่า “ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์” และความถี่ที่เกิดขึ้น ณ จุดเรโซแนนซ์นี้เราจะเรียกว่า “ความถี่เรโซแนนซ์” และเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดเรโซแนนซ์นี้มีค่าต่ำสุด ดังนั้นค่ากระแสที่ไหลผ่านในวงจรจึงมีค่ามากที่สุด

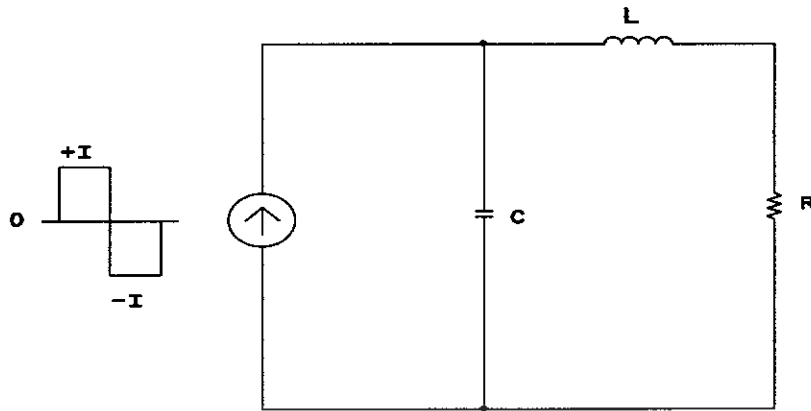
ในทำนองเดียวกันถ้าเราปรับความถี่ที่ป้อนให้กับวงจรเรโซแนนซ์ RLC แบบขนาน จนถึงค่าหนึ่งก็จะพบว่า สามารถเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ได้เช่นกันนั่นคือค่า X_c จะเท่ากับ X อย่างไรก็ตาม ค่าอิมพีแดนซ์ ที่เกิดขึ้น ณ จุดเรโซแนนซ์ที่ต่อแบบขนานนี้จะมีค่ามากที่สุด และจะทำให้ค่ากระแสที่ไหลในวงจรมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับแบบอนุกรม



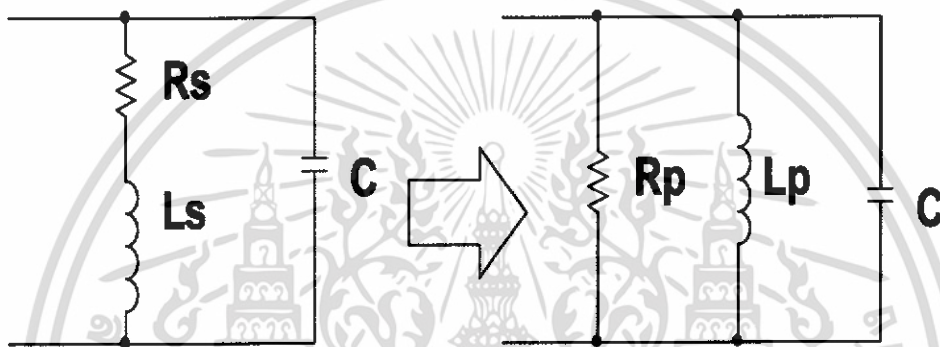
รูปที่ 3-1 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และกระแสต่อค่าความถี่สำหรับเรโซแนนซ์แบบขนาน

(ซ้าย) ค่าอิมพีแดนซ์กับค่าความถี่ (ขวา) ค่ากระแสกับค่าความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-2 วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์ขนาน



รูปที่ 3-3 การเปลี่ยนวงจรให้เป็นวงจรเรโซแนนซ์ขนาน

ผลตอบสนองของโหนดเรโซแนนซ์ขนานที่มีต่อกระแสพัลส์สี่เหลี่ยม สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$C \frac{du}{dt} + i_L + \frac{u}{R} = i \quad (3.1)$$

แทนค่า

$$u = L \frac{di_L}{dt}$$

ได้สมการ

$$CL \frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{di_L}{dt} + i_L = i \quad (3.2)$$

จัดรูปสมการใหม่

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{LC} i_L = i \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) จะได้อ่า natural frequency, damping coefficient และ damping factor ตามลำดับ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \alpha = \frac{1}{2RC}, \quad \zeta = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

การเปลี่ยนวงจรที่ทำการวิจัยเพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ (3.1-3.3) ทำได้โดย

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} \quad (3.4)$$

$$X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} \quad (3.5)$$

เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำมีตัวประกอบกำลังต่ำมาก ดังนั้น $R_s \ll X_s$ ทำให้ประมาณว่า

$$R_p = \frac{X_s^2}{R_s} \quad (3.6)$$

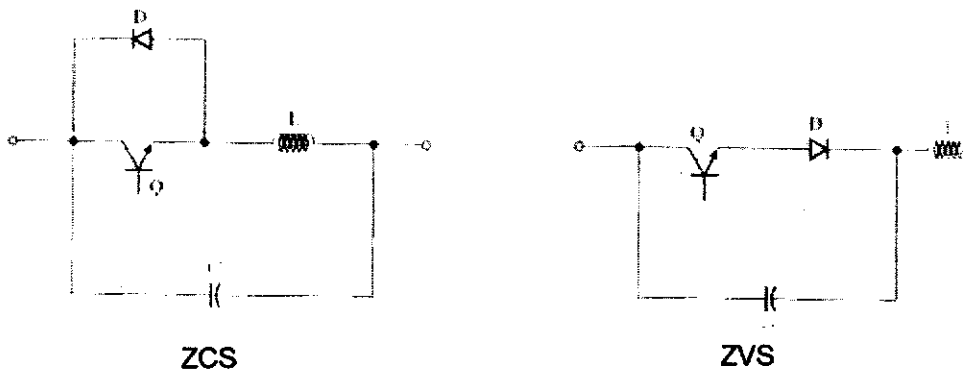
$$X_p = X_s \quad (3.7)$$

3.3 สวิตช์เรโซแนนท์

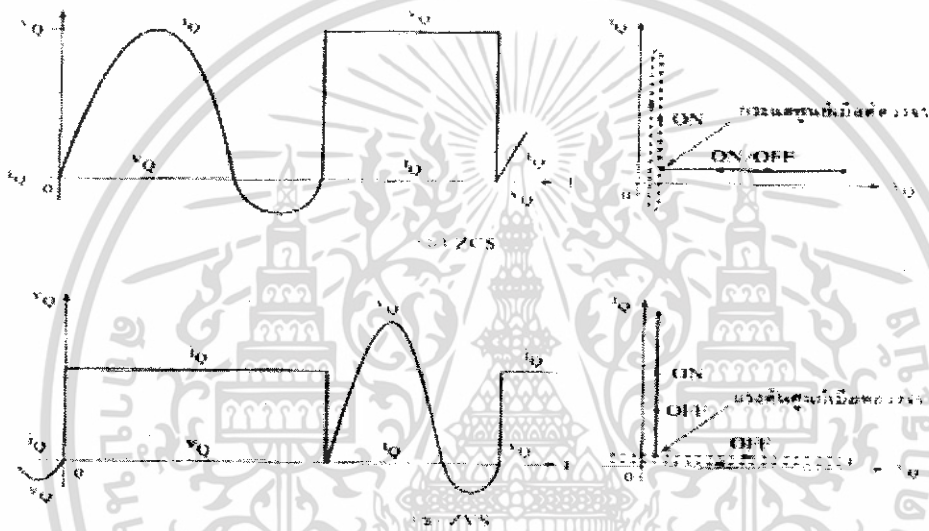
สวิตช์เรโซแนนท์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ประกอบด้วย L และ C ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซแนนท์ สวิตช์เรโซแนนท์แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ สวิตช์ที่ตัดวงจรเมื่อกระแสเป็นศูนย์ (zero current switch; ZCS) และสวิตช์ที่ตัดวงจรเมื่อแรงดันเป็นศูนย์ (zero voltage switch; ZVS) ดังแสดงในรูปที่ 3-4 จะแสดงวงจรของสวิตช์ทั้งสอง การทำงานของ ZCS อธิบายได้โดย เมื่อทรานซิสเตอร์ (Q) ตัดวงจร และมีตัวเหนี่ยวนำ (L) ต่ออนุกรมอยู่ด้วย กระแสจะเริ่มไหลจากค่าศูนย์ วงจรเรโซแนนท์ LC ทำให้กระแสเกิดการแกว่ง กระแสจะไหลกลับทางได้โดยผ่านทางไดโอด (D) ในช่วงเวลาที่กระแสไหลกลับทางนี้ ให้ออกคำสั่งตัดวงจรของทรานซิสเตอร์ (Q) เมื่อกระแสพยายามจะไหลในทิศทางปกติ (จากซ้ายไปขวา) อีกครั้งหนึ่ง สวิตช์ ZCS ก็จะตัดวงจร เพราะไดโอดจะหยุดนำกระแสโดยอัตโนมัติเมื่อกระแสลดเป็นศูนย์ การทำงานของ ZCS จะมีลักษณะเป็นแบบ dual ดังรูปที่ 3-4

ข้อดีของสวิตช์เรโซแนนท์คือ การลดความเค้นที่มีต่อสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ การสูญเสียในสวิตช์จะลดลง สวิตช์จึงสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้น (เช่น ใช้ MOSFET ทำงานที่ 1MHz)

ข้อเสียของสวิตช์เรโซแนนท์คือ ต้องใช้สิ่งประดิษฐ์ที่เป็นสารตัวนำที่ทนกระแสสูงขึ้น สำหรับ ZCS และทนแรงดันสูงขึ้นสำหรับ ZVS ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สวิตช์ธรรมดา (กระแสเป็นรูปสี่เหลี่ยม แรงดันเป็นรูปไซน์ของ ZCS และกระแสเป็นรูปไซน์ แรงดันเป็นรูปสี่เหลี่ยมของ ZVS)



รูปที่ 3-4 สวิตช์เรโซแนนท์



รูปที่ 3-5 ตัวอย่างรูปคลื่นและโลโก้ของจุดทำงานของสวิตช์ในกรณี ZCS และ ZVS

จากรูปที่ 3-4 ZCS คือสวิตช์ที่ตัดวงจรเมื่อกระแสเป็นศูนย์เนื่องจากกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำทันทีไม่ได้ การต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับสวิตช์ไวงานเป็นการบังคับให้การตัดวงจรสวิตช์ไวงานทำงานที่กระแสศูนย์ (ไม่เช่นนั้นจะเกิดยอดแหลมของแรงดันคร่อมสวิตช์) การตัดวงจรของสวิตช์ไวงานขึ้นอยู่กับสัญญาณขับนำ เราจึงใช้ไดโอดเข้าช่วยเพื่อให้การตัดวงจรเป็นไปโดยธรรมชาติคือเมื่อกระแสเป็นศูนย์ ดังนั้นการตัดต่อวงจรที่กระแสศูนย์จะใช้สวิตช์ไวงานและไดโอดต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ L_r โดยที่สวิตช์ไวงานอาจต่ออนุกรมกับไดโอด (กรณีครึ่งคลื่น) หรือต่อขนานกับไดโอดก็ได้ (กรณีเต็มคลื่น) รูปที่ 3-6 แสดงสวิตช์เรโซแนนท์เดี่ยวกระแสศูนย์ซึ่งเป็นการปรับปรุง PWM โดยเพิ่ม L_r ต่ออนุกรมกับสวิตช์ไวงานและเพิ่ม C_r ต่อขนานกับไดโอดหลัก

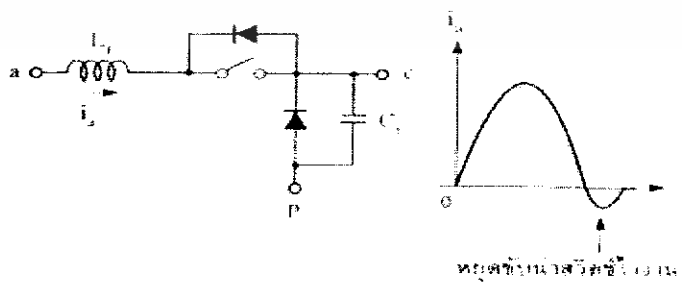
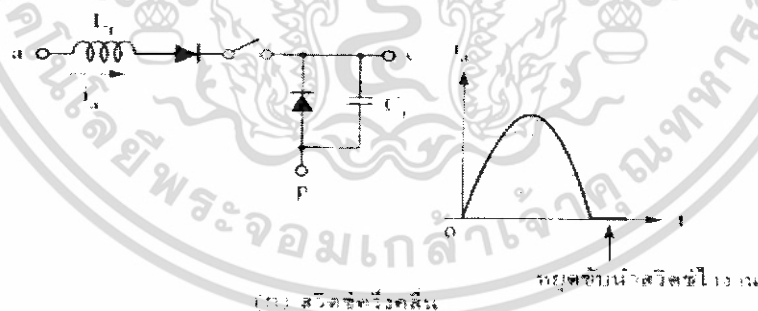
ในกรณีของสวิตช์ครึ่งคลื่น หลังจากต่อสวิตช์ไวงานกระแสผ่านสวิตช์จะมีรูปร่างเกือบเป็นไซน์เพราะเกิดการเรโซแนนท์ระหว่าง L_r กับ C_r ดังนั้นสวิตช์ร่วมที่ประกอบด้วยไดโอดอนุกรมกับสวิตช์ไวงาน จะหยุดนำกระแสในธรรมชาติ เมื่อกระแสลดค่าเป็นศูนย์จากค่าบวก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สู่ค่าลบ คำสั่งขับสวิตช์ไวงานจะสั่งให้สวิตช์ไวงานหยุดนำกระแสภายหลังจากหยุดนำกระแสโดยธรรมชาติ ดังรูปที่ 3-6 (ก)

ในกรณีเต็มคลื่นกระแสผ่านสวิตช์รวมจะเริ่มไหลผ่านสวิตช์ไวงานก่อน และเมื่อแกว่งไปสู่ค่าลบจึงไหลผ่านไดโอด ในช่วงที่มีกระแสผ่านไดโอดจะมีกระแสไหลผ่านสวิตช์ไวงาน และต้องอาศัยช่วงเวลานี้เปลี่ยนสัญญาณขับนำไม่ให้นำสามารถขับนำกระแส กระแสของ L_r ที่จะแกว่งสู่ค่าบวกอีกครั้งก็ไม่อาจทำได้ จึงหยุดอยู่ที่ค่าศูนย์การหยุดนำกระแสก็เป็นไปโดยธรรมชาติของไดโอดนั่นเองเพียงแต่ต้องเปลี่ยนคำสั่งขับนำสวิตช์ไวงานในช่วงเวลาที่เหมาะสม (เมื่อกระแสของ L_r เป็นลบ) ดังรูปที่ 3-6 (ข)

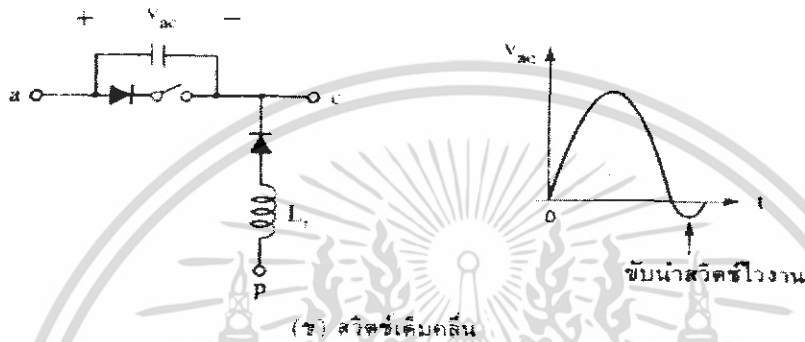
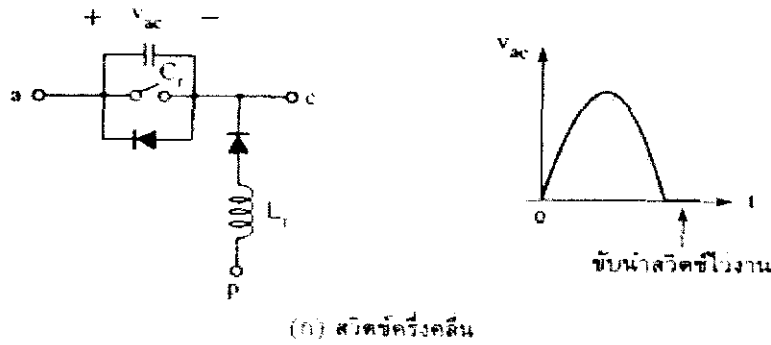
จากรูปที่ 3-4 ZVS คือสวิตช์ที่ต่อวงจรเมื่อแรงดันเป็นศูนย์เนื่องจากแรงดันตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงทันทีไม่ได้การต่อตัวเก็บประจุนานกับสวิตช์ไวงานเป็นการบังคับให้การต่อของวงจรสวิตช์ไวงานต้องกระทำในขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ (มีจะนั้นจะทำให้เกิดการเทประจุผ่านสวิตช์ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสีย) เราต้องใช้ไดโอดเข้าช่วยเพื่อให้วงจรเป็นไปโดยธรรมชาติ คือเมื่อแรงดันตกคร่อมไดโอดเริ่มเป็นบวกกรณีครึ่งคลื่นตรงกับการต่อ C_r และไดโอดขนานกับสวิตช์ไวงานและกรณีเต็มคลื่นตรงกับการต่อไดโอดอนุกรมกับสวิตช์ไวงาน ส่วนตัวเหนี่ยวนำ L_r ที่ทำให้เกิดการเรโซแนนท์ อาจต่ออนุกรมกับไดโอดหลัก ดังรูปที่ 3-7

ในกรณีของสวิตช์ครึ่งคลื่น (Half wave-ZVS) หลังจากตัดวงจรสวิตช์ไวงานแรงดันตกคร่อมสวิตช์จะมีรูปร่างเกือบเป็นไซน์เพราะเกิดการเรโซแนนท์ระหว่าง L_r กับ C_r เมื่อแรงดันลดค่าลงเป็นศูนย์จากค่าบวกสู่ค่าลบ ไดโอดที่ต่อขนานกับสวิตช์ไวงานจะเริ่มนำกระแสคำสั่งให้สวิตช์ไวงานนำกระแสจะเริ่มหลังจากไดโอดได้นำกระแสแล้ว สวิตช์ไวงานจึงต่อวงจรที่แรงดันศูนย์



รูปที่ 3-6 สวิตช์เรโซแนนท์เดี่ยวกระแสศูนย์และรูปคลื่นของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะ



รูปที่ 3-7 สวิตช์เรโซแนนซ์เดี่ยวแรงดันศูนย์และรูปคลื่นของแรงดัน

ในกรณีสวิตช์เต็มคลื่น (Full wave-ZVS) แรงดันตกคร่อม C_r สามารถแบ่งเป็นลบได้ถ้าเราสั่งให้สวิตช์ไวงานต่อวงจรในช่วงเวลาที่แรงดันเป็นลบ สวิตช์จะยังไม่นำกระแสเพราะมีไดโอดกั้นอยู่ เมื่อแรงดันแกว่งเข้าสู่ค่าบวกทั้งไดโอดและสวิตช์ไวงานก็เริ่มนำกระแส

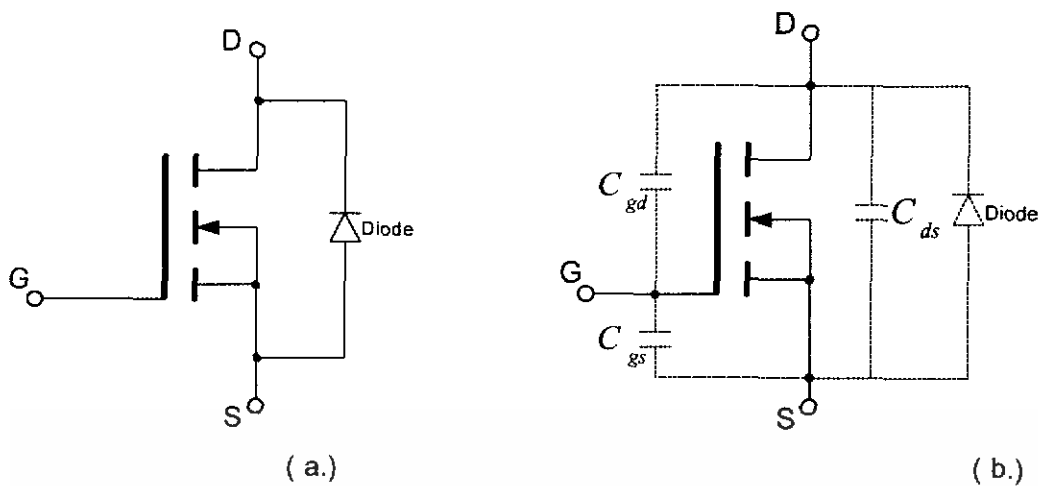
3.4 หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในแบบอนุกรมคิต และลักษณะพื้นฐานของตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟต

ในการใช้งานอาร์พริจอินเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสวิตช์ทั้ง 2 ตัวนั้นสามารถเลือกใช้ได้หลายชนิดเช่น SCR , GTO, BJT , IGBT, มอสเฟต โดยสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมแตกต่างกัน ตามลักษณะงาน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้มอสเฟต เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะเรโซแนนซ์ที่มีความถี่สูง ซึ่ง มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ที่สามารถทำงานที่ความถี่สูงกว่า 20 KHz ได้เป็นอย่างดี

3.4.1 ลักษณะตัวเก็บประจุแฝงภายในการพิจารณามอสเฟต

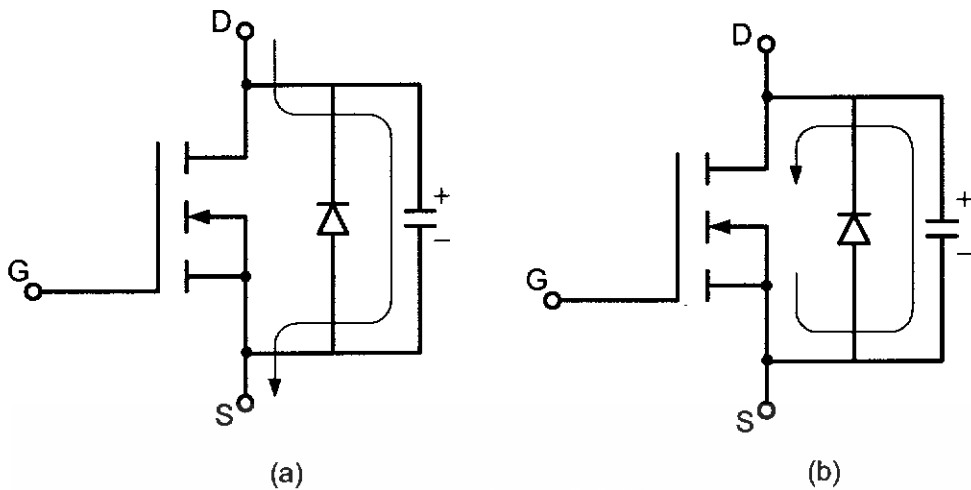
มอสเฟต (MOSFETs: Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้เป็นสวิตช์ที่ความถี่สูงในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากมีความเร็วในการตัดต่อที่สูง สัญลักษณ์ของมอสเฟตมีลักษณะดังในรูปที่ 3-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-8 สัญลักษณ์มอสเฟตแบบ n-channel (a.) สัญลักษณ์ โดยทั่วไป
(b.) ลักษณะตัวเก็บประจุแฝงที่คร่อมระหว่างขาต่างๆของมอสเฟต

มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ทำงานทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มักนำมาใช้เป็นสวิตช์ ลักษณะการทำงานจะเป็นการใช้แรงดันที่คร่อมระหว่างขา gate กับขา source (V_{gs}) ควบคุมกระแส drain (i_d) ลักษณะโครงสร้างภายในมอสเฟตโดยทั่วไปจะมีตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic Capacitance) คร่อมอยู่ระหว่างขาต่างๆคือ C_{gd} , C_{gs} , C_{ds} ซึ่งโดยปกติจะมีค่าไม่เกิน 1000pF และจะมีไดโอดความเร็วสูง (Fast Recovery Diode) คร่อมอยู่ระหว่างขา Drain และขา Source ในลักษณะกลับทิศกับมอสเฟต เมื่อมอสเฟต Turn on จะมีค่าความต้านทานระหว่าง Drain-Source (R_{ds}) ต่ำมากโดยปกติจะไม่เกิน 1โอห์ม ซึ่งเมื่อนำมอสเฟตมาใช้งานจะทำให้มอสเฟต Turn On และ Turn Off ทำให้ตัวเก็บประจุแฝงเหล่านี้มีการ Charge และ Discharge ประจุแต่เนื่องจากค่าความจุมีน้อยมากทำให้ช่วงเวลาการ Charge และ Discharge ที่เกิดขึ้นนี้สั้นมาก (ปกติจะน้อยกว่า 200 nS) ดังนั้นช่วงเวลานี้จึงมีผลกระทบต่อวงจรรีเลย์เตอร์มากเฉพาะที่ความถี่สูงเท่านั้น โดยลักษณะการ Charge และ Discharge ของตัวเก็บประจุแฝงนี้ โดยทั่วไป (กรณีที่ไม่มีกรควบคุมให้ทำงานในสภาวะ ZVS) นั้นอธิบายได้ในรูปที่ 3-9 (a) และ (b) ในรูปที่ 3-9(a) กระแสไหลออกจากวงจรรีเลย์เตอร์จากภายนอกจะทำการ Charge ประจุให้ตัวเก็บประจุแฝงในขณะที่ มอสเฟต อยู่ในสภาวะ off ซึ่งจะทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแฝงดังกล่าวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และในรูปที่ 3-9(b) เมื่อมอสเฟต อยู่ในสภาวะ turn on ประจุซึ่งเก็บสะสมอยู่ในตัวเก็บประจุแฝงก่อนหน้านี้ จะ Discharge ผ่านมอสเฟต ซึ่งจะเกิดกระแสสูงไหลผ่านมอสเฟต เนื่องจากค่า R_{Ds} ภายในมอสเฟต มีค่าน้อยมากจากที่กล่าวมาแล้วซึ่งอาจทำให้มอสเฟตเสียหายได้ในที่สุด



รูปที่ 3-9 ลักษณะการเก็บและคายประจุที่สะสมอยู่ภายใน C_{oss} ผ่านตัวมอสเฟต
 (a) ตัวเก็บประจุ C_{oss} จะเก็บประจุขณะมอสเฟต เริ่ม turn off ด้วยกระแสจากวงจรภายนอกจากวงจรเรโซแนนท์ (b) ประจุที่เก็บสะสมไว้จะ Discharge ผ่านมอสเฟต ในขณะที่เริ่ม turn on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

คุณลักษณะของอุปกรณ์

4.1 บทนำ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงคุณลักษณะต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ไม่ว่าจะเป็นมอสเฟต ค่าความเหนี่ยวนำ และภาชนะหุ้มตุ้ม ที่ใช้ในการวิจัยนี้

4.2 การใช้งานมอสเฟตกำลัง

ใช้เพื่อควบคุมการไหลของกระแสแบบแอนะล็อก โดยจุดทำงานบนกราฟคุณลักษณะ $i_D = f(V_{DS})$ ขณะทำงานเพื่อเปลี่ยนสถานะจากหยุดนำกระแสเป็นนำกระแส จะเริ่มต้นเคลื่อนที่จากบริเวณตัดผ่านบริเวณไวงาน ไปยังบริเวณโอห์มมิก ในขณะเดียวกันเมื่อต้องการเปลี่ยนสถานะจากนำไปเป็นหยุดนำกระแส จุดทำงานจะเคลื่อนที่จากบริเวณโอห์มมิกผ่านบริเวณไวงาน และสิ้นสุดที่บริเวณตัด ดังแสดงในรูปที่ 4-1 มอสเฟตกำลังอยู่ในลักษณะตัดวงจรเมื่อแรงดันเกต-ซอร์ส มีค่าน้อยกว่าแรงดันเริ่มเปลี่ยน (Threshold Voltage) หรือ $V_{GS(th)}$ โดยปกติแรงดันค่านี้จะมีค่าไม่มากนักและขณะที่มอสเฟตกำลังเริ่มเปิดวงจร แรงดัน เดรน - ซอร์ส ของมอสเฟตกำลังจะมีแรงดันตกคร่อมด้วยค่าแรงดันเท่ากับแหล่งจ่าย ดังนั้นแรงดันเบรกดาวนระหว่างเดรน-ซอร์ส หรือ BV_{DSS} ของมอสเฟตกำลังต้องเลือกให้มีค่ามากกว่าแรงดันแหล่งจ่ายกำลังที่ป้อน เพื่อหลีกเลี่ยงเบรกดาวนแบบอะวาลานซ์ ที่บริเวณรอยต่อ เดรน - ซอร์ส ของมอสเฟตกำลังนั้น

โดยที่
$$V_{GS} - V_{GS(th)} > V_{DS} > 0 \quad (4.1)$$

กระแสเดรนในบริเวณไวงาน จะมีค่าไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันเดรน - ซอร์ส แต่จะขึ้นอยู่กับแรงดัน เกต-ซอร์ส และกระแสค่า เรียกว่า กระแสอิ่มตัว พร้อมกับ ทำให้บริเวณดังกล่าวนี้เรียกว่า บริเวณการอิ่มตัว หรือ Pentode จะเป็นบริเวณไวงาน เพื่อหลีกเลี่ยง ค่าอิ่มตัวที่เกิดขึ้นกับมอสเฟตกำลัง และตามหลักทฤษฎี กระแสเดรนในช่วงขณะนี้โดยประมาณ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$i_D = k [V_{GS} - V_{GS(th)}]^2 \quad (4.2)$$

k = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับขนาดรูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์ และจุดที่บริเวณโอห์มมิกกับบริเวณไวงานติดกัน จะได้แรงดัน $V_{GS} - V_{GS(th)} = V_{DS}$

ดังนั้น
$$i_{DS} = k V_{DS}^2 \quad (4.3)$$

เมื่อ $k = [\mu_n C_{ox} W] / 2L$

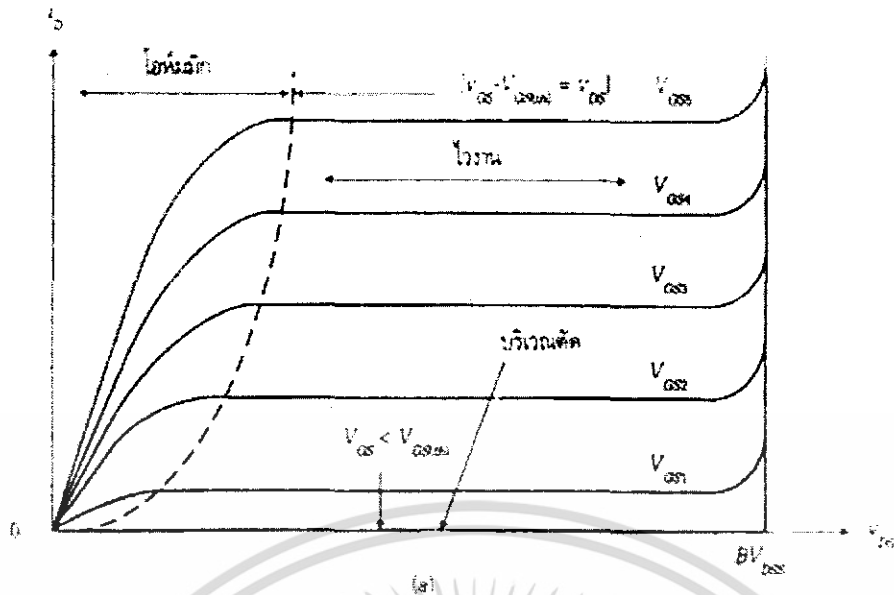
μ_n = ค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากในชั้นผกผัน

C_{ox} = ค่าความจุไฟฟ้าของเกตออกไซด์

W = ค่าความกว้างของเกต

L = ค่าความยาวของมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-1 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของมอสเฟตแบบ n และ แบบ p

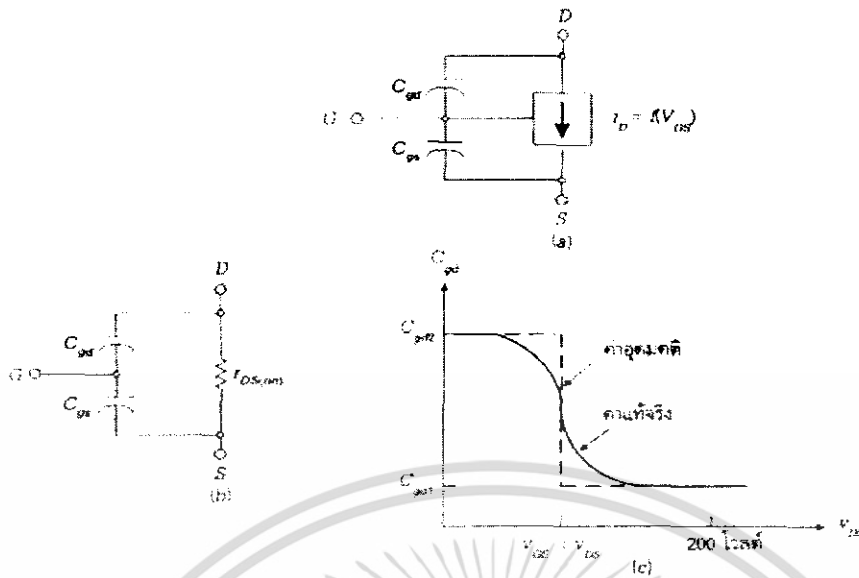
4.3 คุณลักษณะการสวิตช์

การสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง สามารถทำงานได้เร็วกว่าอุปกรณ์แบบไบโพลาร์ เพราะขณะที่มอสเฟตกำลัง นำและหยุดนำกระแส พหุข่างน้อยในส่วนที่เพิ่ม ไม่ต้องเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากอุปกรณ์ จะมีก็เฉพาะค่าการประจุตัวเก็บประจุในวงจรมวมูล ดังรูปที่ 4-2 (a)

สำหรับแหล่งจ่ายกระแส สามารถควบคุมได้ด้วยการป้อนแรงดันเกต และมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อแรงดัน $V_{GS} < V_{GS(th)}$ และเท่ากับ $g_m [V_{GS} - V_{GS(th)}]$ เมื่อมอสเฟตกำลังทำงานอยู่ในบริเวณไวงาน และกระแส i_D สามารถทราบได้จากกราฟแสดงคุณลักษณะการถ่ายโอน ซึ่งค่าความชัน คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ หรือ g_m

การทำงานของมอสเฟตกำลัง จะเข้าสู่บริเวณโหม้มิก เมื่อแรงดัน V_{DS} มีค่าน้อยกว่า หรือ เท่ากับแรงดัน $V_{DS} - V_{GS(th)}$ ดังนั้นในการนำไปใช้การสวิตช์กับงานด้วยค่ากำลังสูงๆ แรงดัน V_{GS} ต้องมีค่ามากกว่าแรงดัน $V_{GS(th)}$ มากๆ สำหรับการงานเพื่อเข้าสู่บริเวณโหม้มิกอย่างง่าย ก็คือ แรงดัน V_{DS} ต้องกำหนดให้ค่าน้อยกว่า V_{GS} แต่เมื่อ V_{DS} มีค่าน้อยบริเวณโหม้มิก ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของแหล่งจ่ายกระแส เกิดขึ้นอยู่ได้ไม่นานพอ เพราะชั้นผกผันที่บริเวณปลายเดรนของแชนแนล ถูกบีบอยู่ไม่นาน ดังนั้นความหนาของชั้นผกผันจึงมีขนาดเกือบเท่ากันตลอด และชั้นผกผันนี้ได้ทำหน้าที่ลัดวงจรเดรนไปยังซอร์ส พร้อมกับทำให้ตัวเก็บประจุ C_{gd} ที่ปลายเดรน ดังแสดงในรูป 4-2 (b) เหมือนลัดลงกราวด์ โดยผ่านชั้นผกผันไปยังซอร์ส สำหรับค่าความต้านทานขณะนำกระแส $r_{DS(on)}$ ที่มีค่ารวมอยู่ด้วยในวงจรมวมูล จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสีย ขณะอยู่ในบริเวณโหม้มิกได้ และส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในบริเวณ n ของเดรน แต่บางทีสามารถเกิดขึ้นได้บริเวณแชนแนล แต่มีค่าน้อยมาก เมื่อนำเปรียบเทียบกับค่าที่เกิดขึ้นในบริเวณ n ยกบริเวณมอสเฟตที่มีขนาดแรงดันเบรกคาวาน์ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 รูปของวงจรมอสเฟตกำลัง (a) วงจรสมมูลมอสเฟตกำลังสำหรับวิเคราะห์ทรานเซียนต์ในย่านตัดและย่านไวงาน (b) วงจรสมมูลมอสเฟตกำลังสำหรับวิเคราะห์ทรานเซียนต์ในย่านโอห์มมิก (c) ค่าความจุไฟฟ้าของขาเกต-เดรนที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันเดรน-ซอร์ส

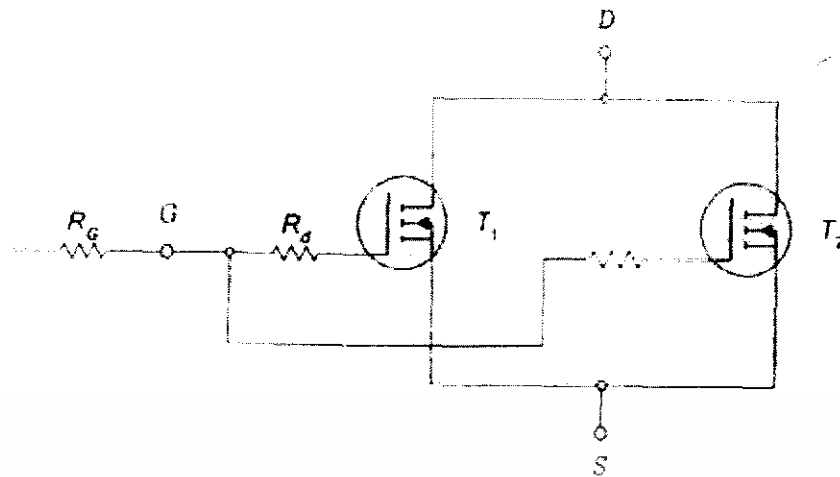
4.4 การขนานมอสเฟตกำลัง

มอสเฟตกำลังสามารถขนานได้ง่าย เพราะค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่กระทำต่อค่าความต้านทานขณะนำกระแสมีค่าเป็นบวก ถ้าหากอุณหภูมิรอยต่อของมอสเฟตกำลัง ที่ต่อขนานกันทั้ง 2 ตัวมีค่าเท่ากัน และในขณะเดียวกัน $I_{DS(on)}$ ของมอสเฟต T2 มีค่ามากกว่า T1 ดังนั้นกระแสจะไหลผ่าน T1 มากกว่า T2 ทำให้กำลังสูญเสียเป็นความร้อน มีค่าสูงกว่าด้วย แต่เนื่องจากแรงดันตกคร่อมมอสเฟตกำลังทั้งสองตัวเป็นค่าเดียวกัน จึงทำให้อุณหภูมิ รอยต่อ T1 มีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้ $r_{DS(on)}$ ของ T1 สูงขึ้นตามเพื่อไปลดกระแสที่ไหลผ่าน T1 ให้น้อยลง สุดท้ายได้เสถียรภาพของการทำงานขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงดีมาก

การนำตัวต้านทานมาต่อขนานเข้ากับมอสเฟตก่อน ก็เพื่อลดการออสซิลเลตด้วยความถี่สูงที่จะเกิดขึ้นกับวงจรระหว่างการสวิตช์ กระแสมอสเฟตกำลังแต่ละตัวกำหนดได้จากคุณสมบัติการถ่ายโอนดังในรูปที่ 4-1 แต่เนื่องจากมอสเฟตกำลังแต่ละตัว จะมีคุณลักษณะการถ่ายโอนไม่เหมือนกัน และถ้าต้องการกระแสเดรน ให้ไหลผ่านมอสเฟตกำลังแต่ละตัวเท่ากัน ดังนั้นในระหว่างการสวิตช์เดียวกัน ควรบิอนแรงดัน เกต-ซอร์สกับมอสเฟตกำลังดังกล่าว ให้ได้กระแสเกตสอดคล้องกับกระแสดเรนนั้นๆ ด้วย โดยนำตัวต้านทานที่มีค่าต่ำๆมาต่ออนุกรมเข้ากับเกตแต่ละตัวก่อนที่จะนำมาต่อขนานกัน โดยถึงแม้ว่าจะจะมีการเหนี่ยวนำประปลายบ้าง แต่เมื่ออินพุทที่เกตมีค่าความจุไฟฟ้าสูงมาก แต่ผลของค่าเหนี่ยวนำกับค่าความจุไฟฟ้าสามารถทำให้เกิดการออสซิลเลตความถี่สูงในมอสเฟตกำลังได้ ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงการต่อความต้านทาน R_g

ดังรูปที่ 4-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-3 การขนานมอสเฟดกำลัง

4.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะหุ้มฉนวน

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะหุ้มฉนวนนั้นมีผลต่อการซึมซาบสนามแม่เหล็ก เนื่องจากมีค่า μ_r ต่างกัน ดังนั้นการเลือกภาชนะที่ใช้ในการทดลองจึงต้องเลือกให้เหมาะสม จากรูปที่ 4-4 จะแสดงการอ่านค่าต่างๆ ของวัสดุที่ต่างชนิดกัน

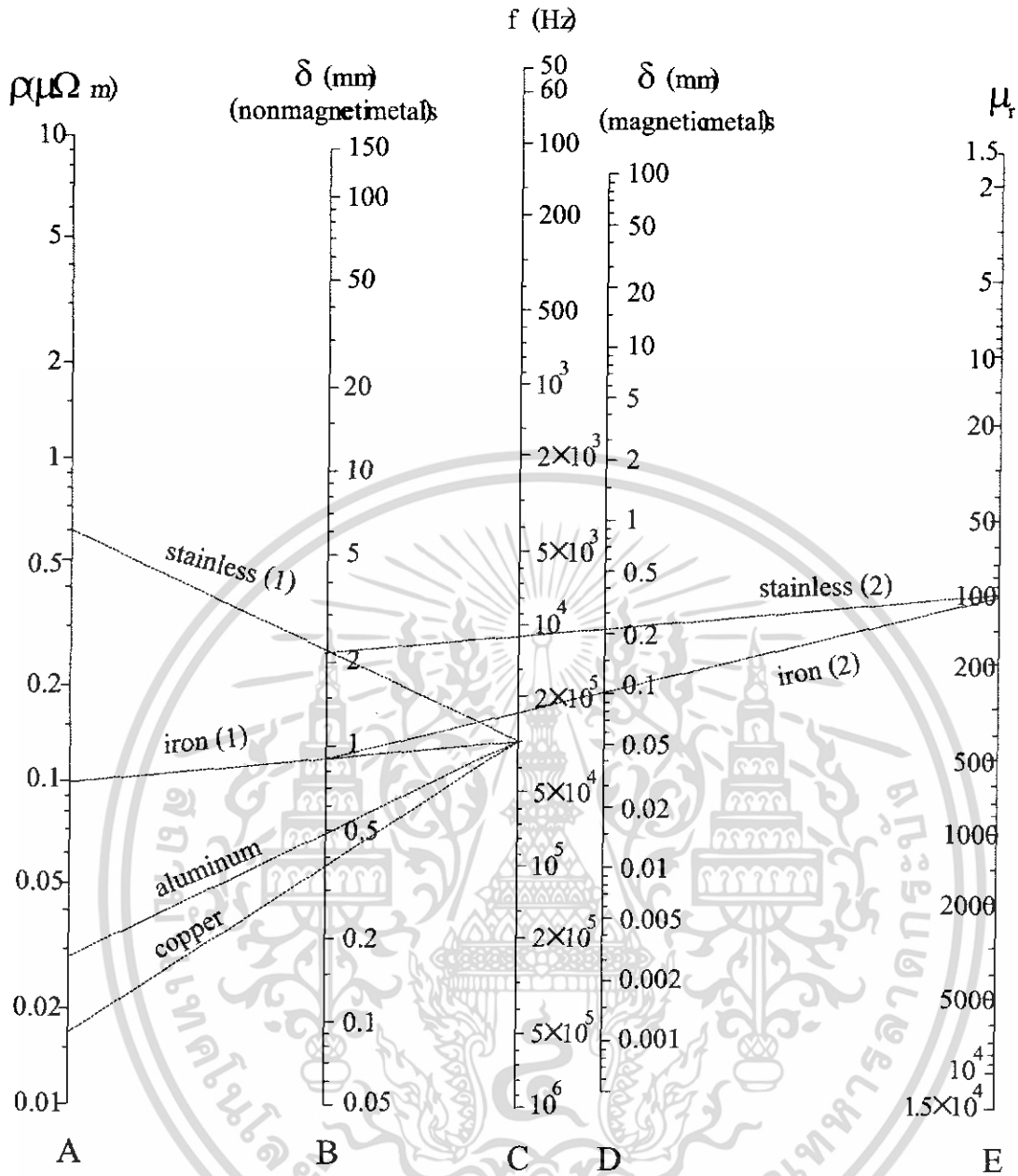
ตารางที่ 4-1 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะหุ้มฉนวนที่วัสดุต่างๆ กัน ที่ความถี่ 30 kHz จะเห็นได้ว่า วัสดุที่ทำด้วยสาร non ferro-magnetic เช่น อลูมิเนียมและทองแดง มีค่าสภาพความต้านทาน ρ และความซึมซาบแม่เหล็ก μ_r ต่ำมากเมื่อเทียบกับสแตนเลส และเหล็กซึ่งทำด้วยสาร ferro-magnetic ดังนั้นการเพิ่มกำลังเอาต์พุตเพาเวอร์สำหรับโหลดที่ภาชนะทำด้วยสาร nonferro-magnetic คือ เพิ่มความถี่ในขดลวดเหนี่ยวนำและเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในภาชนะหุ้มฉนวนที่ความถี่ 30 kHz

material	iron	stainless	aluminum	copper
resistivity ($\Omega \cdot m$) : ρ	9.8×10^{-8}	60×10^{-8}	2.8×10^{-8}	1.7×10^{-8}
Relative permeability : μ_r	100	100	1	1
skin depth (mm) : δ	0.909	0.225	0.486	0.378
surface resistivity (Ω) : R_v	11×10^{-4}	27×10^{-4}	0.575×10^{-4}	0.448×10^{-4}

*ภาชนะที่ใช้ในการวิจัยเป็นภาชนะ stainless

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-4 เส้นกราฟแสดงการหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะหุ้มต้ม

กรณีใช้วัสดุสาร Non-Ferro-Magnetic:

ลากเส้นจากตำแหน่งบนสเกล ρ : A ไปยังตำแหน่งบนสเกล f : C และอ่านค่าที่ได้บนสเกล δ : B

กรณีใช้วัสดุสาร Ferro-Magnetic :

ลากเส้นระหว่างตำแหน่งบนสเกล ρ : A และสเกล f : C จะได้จุดตัดกับตำแหน่งบนสเกล δ : B จากนั้นลากเส้นระหว่างจุดตัดนี้กับตำแหน่งบนสเกล μ_r : E จะได้จุดตัดใหม่ที่ตำแหน่งบนสเกล D อ่านค่า δ ที่ตำแหน่งจุดตัดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

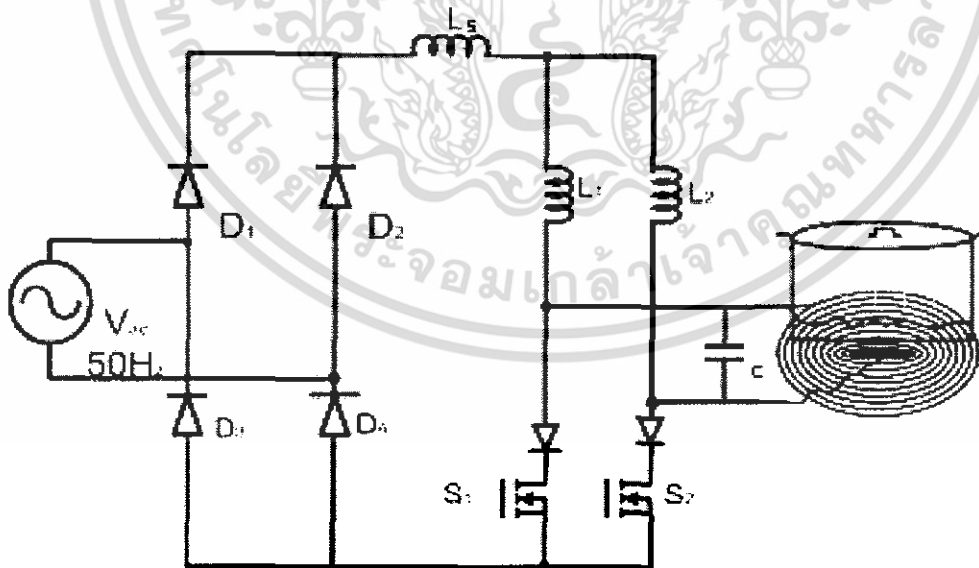
หลักการทํางานของวงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ขณะขับโหลดเรโซแนนท์ขนาน

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอถึงการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ขณะขับโหลดเรโซแนนท์ขนาน ลักษณะคลื่นของแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆของวงจร ลักษณะโหมดการทำงานของวงจรในช่วง 1 คาบเวลา และลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตตลอดจนการหาสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์

5.2 หลักการทํางาน

สำหรับโครงสร้างของวงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ขนานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ได้นำเสนอตั้งรูปที่ 5-1 ในกรณีของการปรับ Duty จะให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เพียง 2 สถานะคือ $+V_d$ และ $-V_d$ เท่านั้น เมื่ออินเวอร์เตอร์ทํางานที่ความถี่สวิตช์ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนท์ จะสามารถแบ่งการทํางานของวงจรออกได้เป็น 3 โหมด โดยมีลักษณะการทํางานที่โหมดต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 5-1 วงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ขนาน

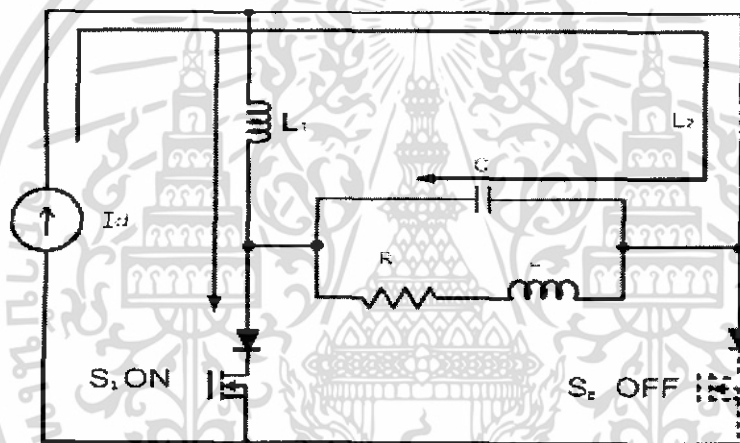
ของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

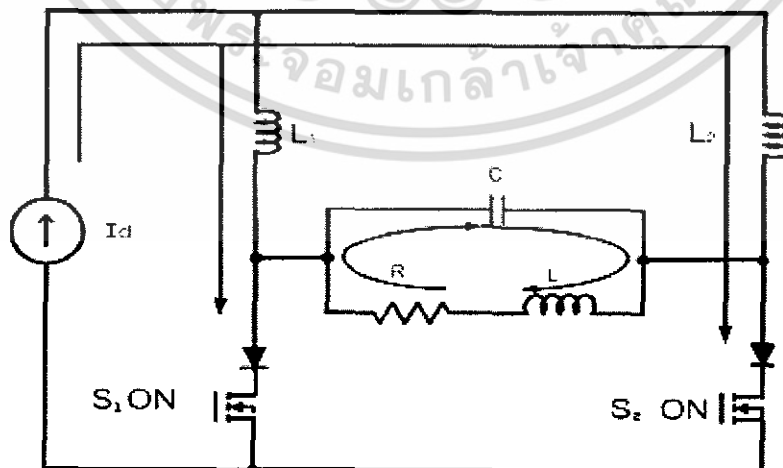
โหมดการทำงานที่ 1 S1 ทำงาน กระแสไฟฟ้าจะไหลในวงจรทั้งสองทางพร้อมๆ กัน โดยกำหนดให้ S1 นั้นทำงานก่อน กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน L_1 D_1 และผ่าน S1 ลงกราวด์ ส่วนอีกทางหนึ่งกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน L_2 แต่จะยังไม่ผ่าน S2 เพราะ S2 ยังไม่ต่อวงจร แต่กระแสไฟฟ้าจะไหลไปยังโหลด RL และจะทำการชาร์จประจุเก็บไว้ที่ C ดังรูปที่ 5-2

โหมดการทำงานที่ 2 S1 และ S2 ทำงานพร้อมกัน ช่วงนี้กระแสจากแหล่งจ่ายจะไหลผ่าน S ทั้งสองตัวลงกราวด์ จะทำให้ C คายประจุให้กับโหลด RL ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นในวงจร ดังรูปที่ 5-3

โหมดการทำงานที่ 3 S2 ทำงาน กระแสไฟฟ้าจะไหลในวงจรทั้งสองทางพร้อมๆ กัน โดย S2 นั้นทำงาน กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน L_2 D_2 และผ่าน S2 ลงกราวด์ ส่วนอีกทางหนึ่งกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน L_1 แต่จะยังไม่ผ่าน S1 เพราะ S1 ยังไม่ต่อวงจร แต่จะไหลไปยังโหลด RL และจะทำการชาร์จประจุเก็บไว้ที่ C ดังรูปที่ 5-4

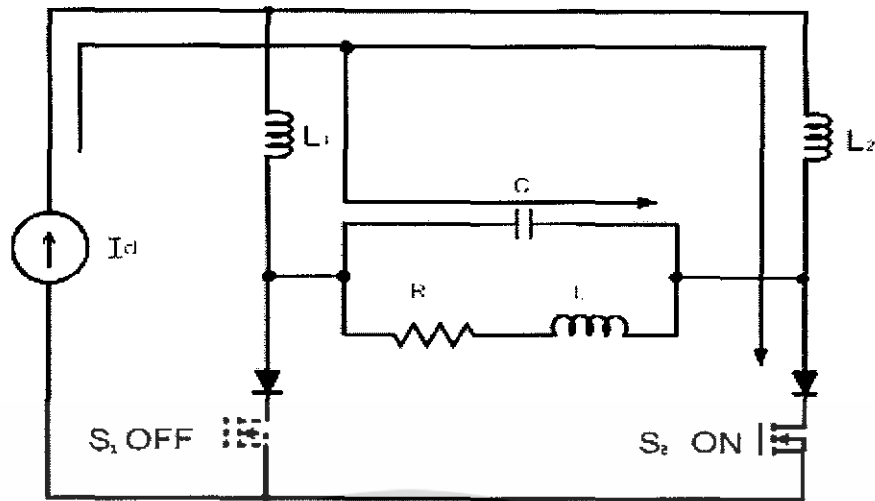


รูปที่ 5-2 โหมดการทำงานที่ 1



รูปที่ 5-3 โหมดการทำงานที่ 2

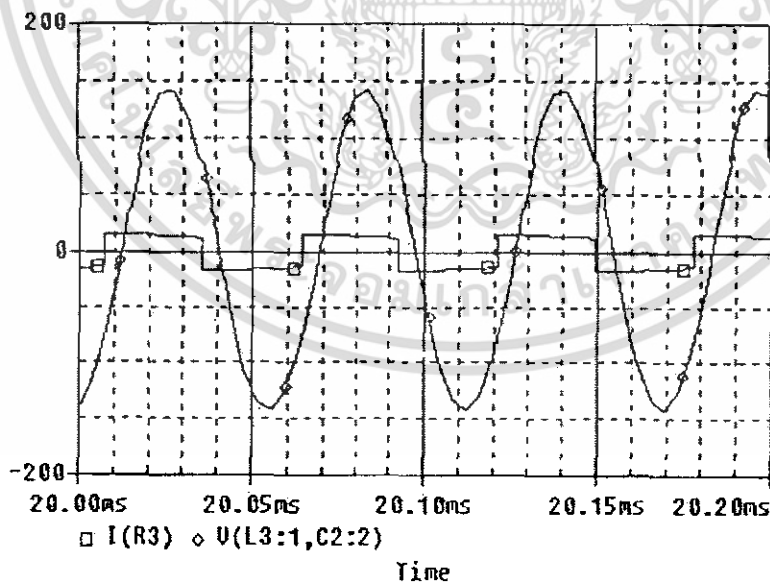
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-4 โหมดการทำงานที่ 3

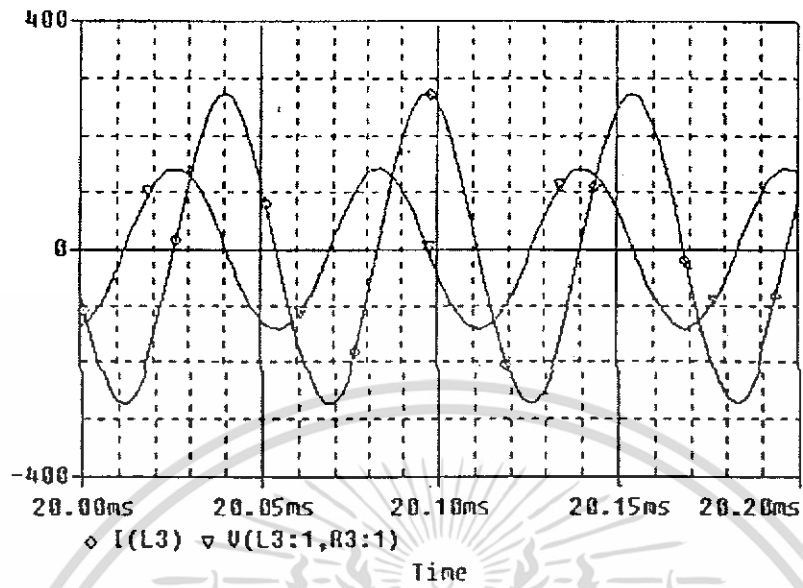
5.3 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดัน

จากรูปวงจร จะเป็นการแสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จ่ายให้กับโหลด ว่ารูปคลื่นกระแสและแรงดันแต่ละกิ่งนั้นเป็นอย่างไร ทำไมรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่โหลดจึงได้รูปสแควร์และพัลส์สี่เหลี่ยม ซึ่งจากรูปทั้งสามจะเห็นว่าเป็นผลจากการรวมกันของกระแสและแรงดันทั้งสองกิ่ง จึงได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5-5

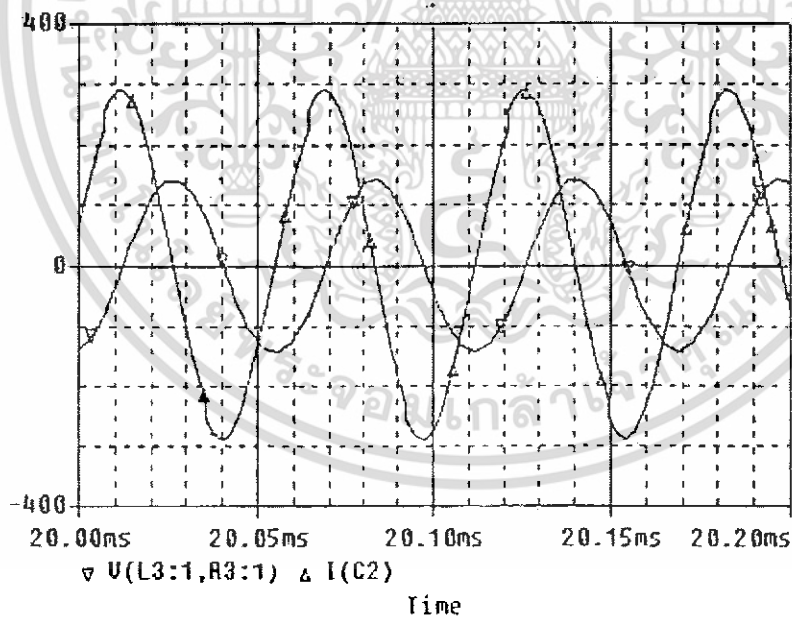


รูปที่ 5-5 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-6 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5-7 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่คาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การขับนำมอสเฟตกำลัง

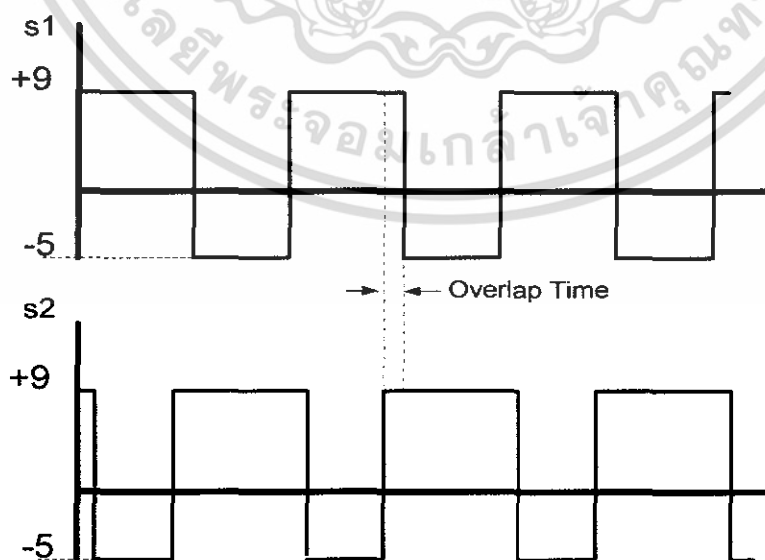
สัญญาณขับนำมอสเฟตกำลัง สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสครึ่งบริดจ์นั้น จะต้องมีการเหลื่อมกัน (overlap) ของสัญญาณเพื่อป้องกันการเปิดวงจรของแหล่งจ่ายกระแส โดยการทำการเหลื่อมของสัญญาณทำโดยการใช้วงจร RC ในการเกิดการหน่วงเวลาในช่วงขอบขาลงของสัญญาณ

สำหรับวงจรขับนำ (gate drive circuit) ใช้ IC TL 494 เป็นตัวสร้างสัญญาณ ซึ่งมีการแยกโหนดระหว่างวงจรภาคกำลังกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ใช้ IC TLP 250 ในช่วงสัญญาณเป็นบวกจะให้แรงดัน +9 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการขับนำมอสเฟต ส่วนในช่วงสัญญาณลบจะให้แรงดัน -5 โวลต์ เพื่อป้องกันการนำกระแสได้เองเนื่องจากสัญญาณลบกวนจากภายนอก โดยไฟเลี้ยงสำหรับตัวขับนำมอสเฟตทั้งสองตัวสามารถใช้ชุดเดียวกันได้เนื่องจากกราวด์ทั้งสองเป็นจุดเดียวกัน สัญญาณขับนำมอสเฟตทั้งสองเป็นดังรูปที่ 5-8

5.5 การทำงานของอินเวอร์เตอร์และการควบคุม

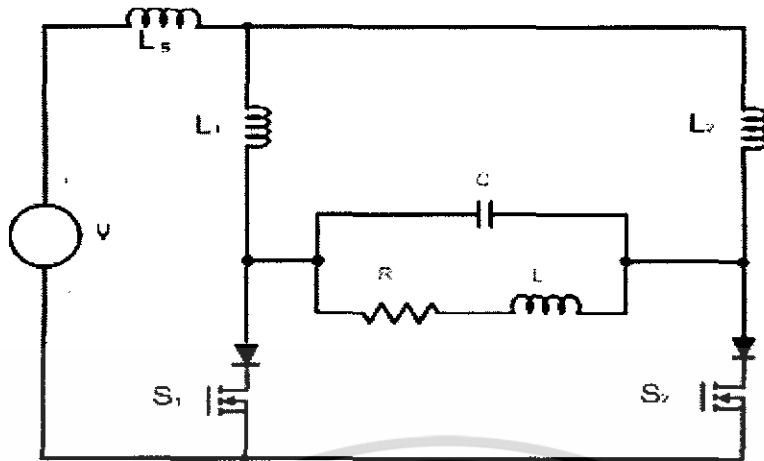
สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์ขนานหรืออินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายกระแสในอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์จะต้องสามารถปิดกันแรงดันได้สองทาง โดยรูปที่ 5-6 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายกระแสครึ่งบริดจ์ที่ใช้มอสเฟตอนุกรมกับไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่งมีข้อดีดังนี้

1. การใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ ไม่ต้องใช้วงจรในการสตาร์ทเช่นเดียวกับในกรณีของการใช้ไอเอสซีอาร์ ที่จำเป็นต้องมีวงจรสตาร์ทเพื่อให้เกิดการคอมมิวเตทได้ในช่วงเริ่มต้น
2. ความถี่ที่ใช้งานสามารถทำได้ทั้งสูงและต่ำกว่าเรโซแนนซ์ ซึ่งในกรณีการใช้ไอเอสซีอาร์ จำเป็นต้องให้ความถี่สูงกว่าเรโซแนนซ์ตลอดเวลา เพื่อให้เกิดการคอมมิวเตทโดยโหลด (Load Commutation) ได้



รูปที่ 5-8 สัญญาณขับนำมอสเฟตกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



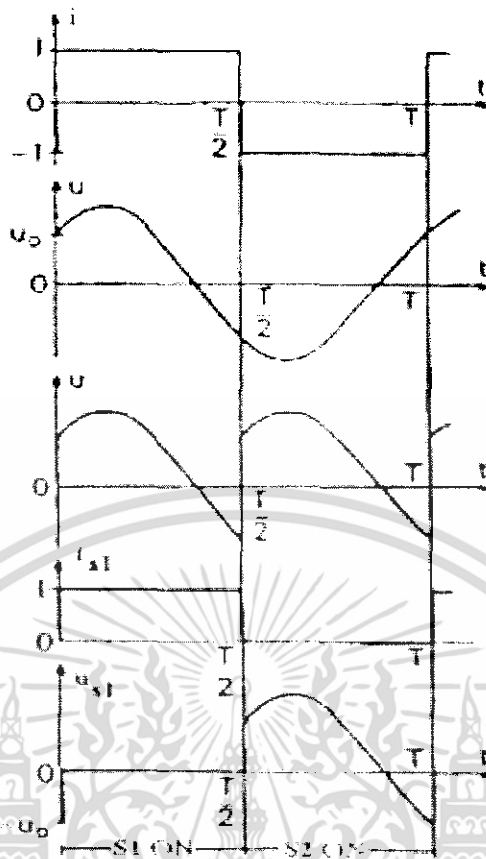
รูปที่ 5-9 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายกระแสครึ่งบริดจ์ที่ใช้มอสเฟต
อนุกรมกับไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตช์

3. ในปัจจุบันมอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดพิกัดกระแสกับแรงดันที่สูงเมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์หรือมอสเฟตกำลัง อีกทั้งการขับนำยังมีความง่ายและสะดวกสำหรับงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้น โหลดของอินเวอร์เตอร์ ทำให้แรงดันที่โหลดมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ เมื่อความถี่อยู่ใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ และเมื่อกำหนดให้ความถี่อยู่ใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าสูงกว่าการทำงานที่ความถี่ห่างจากความถี่เรโซแนนซ์ มากๆ โดยพิจารณาได้จากรูปที่ 5-8 แรงดันที่ตกคร่อมโหลดจะสูงที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ และลดลงรอบๆความถี่เรโซแนนซ์ โดยค่าแรงดันดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าที่โหลด ดังนั้นจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์ควรจะอยู่ใกล้ๆความถี่เรโซแนนซ์เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานไปที่โหลดสูงสุด การพิจารณาจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสจึงแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือการทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์และที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.5.1 การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์

การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้โหลดเป็นอินดักทีฟโหลด โดยมีรูปคลื่นของแรงดันกับกระแสที่จุดต่าง ๆ เป็นดังรูปที่ 5-10

จากรูปที่ 5-10 จะเห็นได้ว่าสวิตช์ตัวที่นำกระแสอยู่จะหยุดนำกระแสได้เมื่อหยุดป้อนแรงดันที่เกิดและสวิตช์ที่เปิดวงจรอยู่จะนำกระแสได้ก็ต่อเมื่อสวิตช์อีกตัวหยุดนำกระแสไปแล้ว ซึ่งช่วงดังกล่าวอาจทำให้เกิดการทำงานที่ไม่ต่อเนื่องกันของสวิตช์ จึงทำให้เกิดสภาวะการเปิดวงจรของตัวเหนี่ยวนำกรองกระแสทำให้เกิดแรงดันยอดสูง (Spike Voltage) ขึ้นที่สวิตช์ทำให้สวิตช์เสียหายได้ สำหรับการปิดกันแรงดันของสวิตช์นั้น ในช่วงที่แรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นบวกมอสเฟตจะปิดกันแรงดันไว้ และเมื่อแรงดันติดลบไดโอดจะทำหน้าที่ปิดกันแรงดันแทน



รูปที่ 5-10 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตช์
ที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนท์

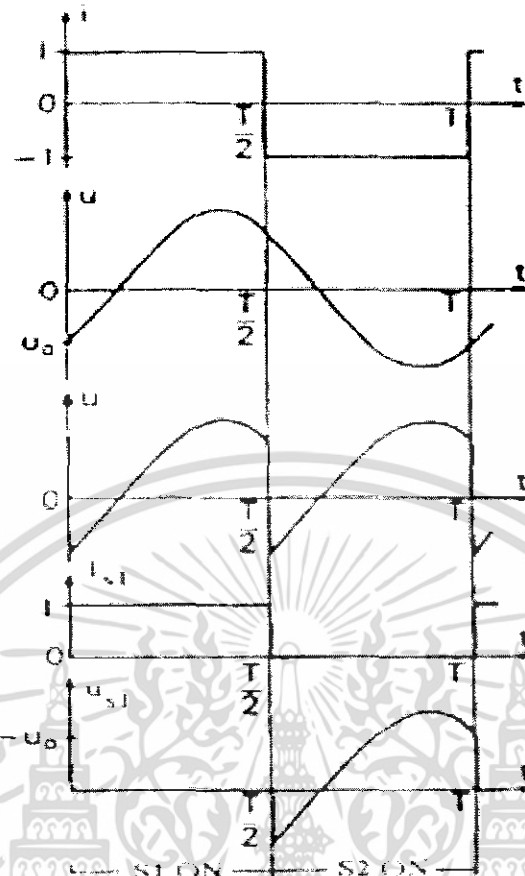
5.5.2 การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์

การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์จะทำให้โหลดเป็นคาปาซิทีฟโหลด โดยมีรูปคลื่นของแรงดันกับกระแสที่จุดต่างๆ เป็นดังรูปที่ 5-11

จากรูปที่ 5-11 จะเห็นได้ว่าการสั่งให้สวิตช์ตัวที่เปิดวงจรอยู่นำกระแสจะทำให้สวิตช์ที่นำกระแสอยู่ได้รับแรงดันรีเวอร์สไบอัสจึงหยุดนำกระแส ดังนั้นการทำงานของสวิตช์จะเป็นไปอย่างต่อเนื่องหรือเรียกว่าเป็นแบบคู่ประกอบกัน (Complementary Switch) สำหรับการปิดกั้นแรงดันของสวิตช์นั้นในช่วงที่แรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นบวกมอสเฟตจะปิดกั้นแรงดันไว้และเมื่อแรงดันติดลบไดโอดจะทำหน้าที่ปิดกั้นแรงดันแทน

จากการทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์ จะมีการสูญเสียในช่วงการตัดวงจรของไดโอดและไอจีบีทีต่อวงจร ส่วนการตัดวงจรของมอสเฟต และการต่อวงจรของไดโอดจะเกิดขึ้นที่แรงดันศูนย์ จึงไม่มีการสูญเสีย ในกรณีการทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนท์ จะมีการสูญเสียในช่วงการตัดวงจรของมอสเฟตและไดโอดต่อวงจร ส่วนการต่อวงจรของมอสเฟตและการตัดวงจรของไดโอดเกิดขึ้นที่แรงดันศูนย์จึงไม่มีการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-11 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตซ์
ที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์

เมื่อพิจารณาจากการทำงานที่ความถี่ทั้งสองแบบ จึงเลือกให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์เล็กน้อย ทำให้กำลังส่งผ่านไปที่โหลดมีค่าสูงและไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ เนื่องจากแรงดันยอดสูง (Spike Voltage)

บทที่ 6

โครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยจะแสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์แต่ละส่วนว่ามีลักษณะการทำงานเป็นอย่างไร แต่ละส่วนแยกย่อยเป็นอย่างไร ความเหมาะสมที่นำมาใช้กับโครงงานนี้เป็นอย่างไร โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงมีดังนี้

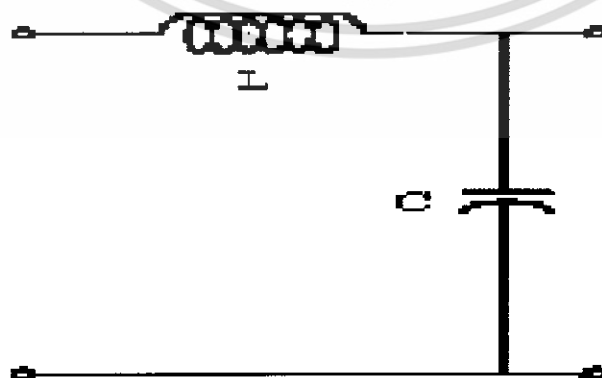
- 6.1.1 ชุดกรองความถี่สูง (Low Pass Filter)
- 6.1.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Bridge Rectifier)
- 6.1.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)
- 6.1.4 ชุดโหลดเรโซแนนท์ (Load Resonant)

6.2 ชุดกรองความถี่สูง (Low Pass Filter)

ในเครื่องซูปแข็งผิวโลหะแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงนี้ จะใส่ค่า ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ เข้าไปทางด้านอินพุทของเครื่องดังรูปที่ 6-1 เพื่อทำหน้าที่กรองความถี่สูงที่เป็นความถี่หลักมูล และความถี่ฮาร์มอนิกอื่นๆ เพื่อให้สัญญาณการไฟฟ้าที่ 50 Hz เพียงความถี่เดียว

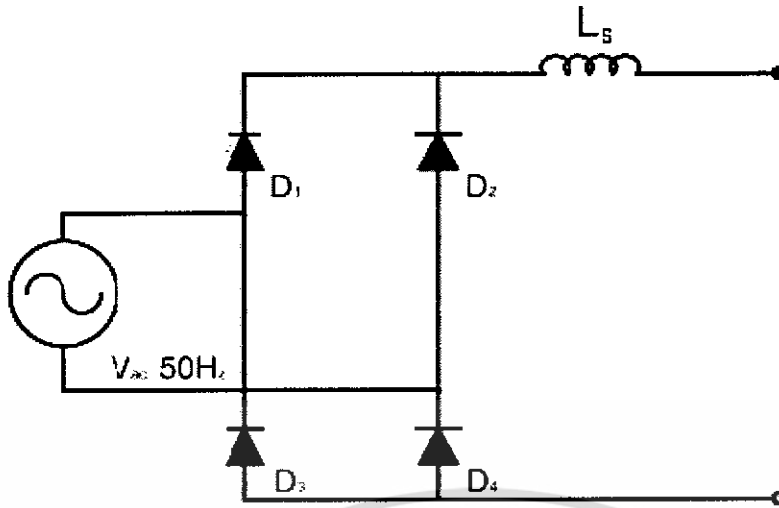
6.3 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Bridge Rectifier)

วงจรเรียงกระแสหรือวงจรเรกติฟายเออร์ คือวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 50 Hz ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อป้อนให้กับชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไป โดยจะมีค่าอินดักแตนซ์ต่ออนุกรมอยู่กับวงจรเรกติฟายเออร์ เพื่อทำการเรียงกระแสให้ตรงเรียบ ซึ่งกระแสนั้นจะเรียบมากน้อยแค่ไหน ก็ขึ้นอยู่กับขนาดของอินดักแตนซ์ที่ต่ออนุกรมในวงจรกับค่ากระแสที่ใช้ในวงจร ซึ่งจะมีวงจрдังรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-1 แสดงชุดกรองความถี่สูงทางด้านอินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-2 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

6.4 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ จะมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วนคือ ส่วนสร้างสัญญาณควบคุมและส่วนของวงจรภาคกำลัง ซึ่งแต่ละส่วนจะทำงานสอดคล้องกัน จะแบ่งการทำงานเป็น

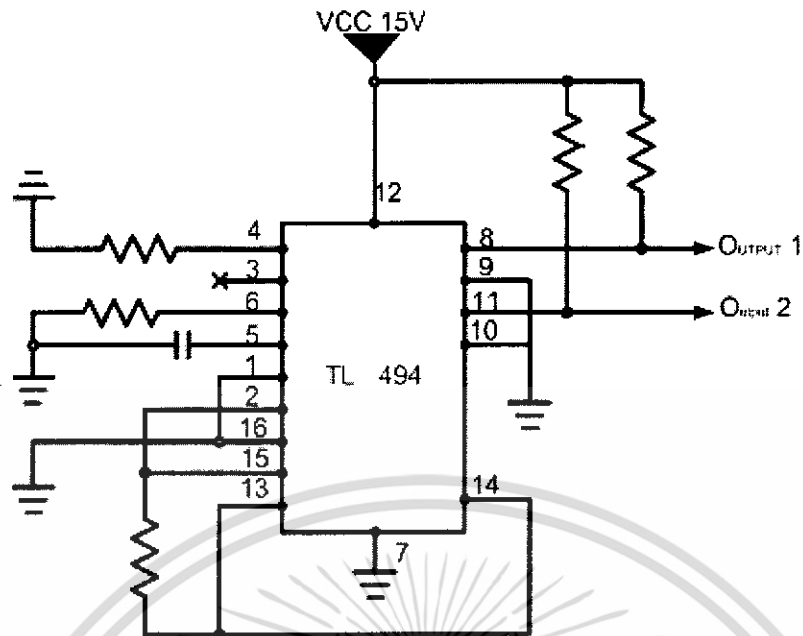
6.4.1 ส่วนสร้างสัญญาณควบคุม จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมและจะส่งสัญญาณที่สร้างนั้นไปควบคุมการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต ในส่วนของวงจรกำลังฮาร์ฟบริดจ์ อินเวอร์เตอร์สัญญาณที่สร้างขึ้นนั้นจะมีขนาดที่ต่ำอยู่จำเป็นที่จะต้องทำการขยายสัญญาณโดยวงจรขยายสัญญาณหรือวงจรขับที่มีขนาดแรงดันสูงขนาด 10 โวลท์ ส่งเข้าที่ขาเกตของเพาเวอร์มอสเฟต โดยการควบคุมแบบนี้จะทำให้สามารถควบคุมความถี่ของสัญญาณที่ส่งไปยังฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ สามารถแบ่งการทำงานของวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

6.4.1.1 ชุดสร้างสัญญาณควบคุม

6.4.1.2 ชุดวงจรขยายสัญญาณหรือวงจรขับ

6.4.1.1 ชุดสร้างสัญญาณควบคุม

วงจรควบคุมจะทำหน้าที่ในการให้กำเนิดสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยม ซึ่งสัญญาณนี้จะนำมาใช้ในการขับขาเกตของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ ไอซีเบอร์ TL 494 เป็น ไอซี 16 ขาในการสร้างสัญญาณ สามารถควบคุมได้ทั้งความถี่และ Duty ซึ่งการควบคุม Duty นั้นสามารถทำได้ด้วยการต่อวงจรหน่วงเข้ากับวงจร ก่อนที่จะนำสัญญาณนั้นไปจ่ายให้กับชุดวงจรขยายสัญญาณหรือวงจรขับ การควบคุมความถี่นั้นสามารถทำการปรับได้โดยปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้ที่ขา 5 ของไอซี การต่อใช้งานไอซีเบอร์ TL 494 แสดงได้รูปที่ 6-3

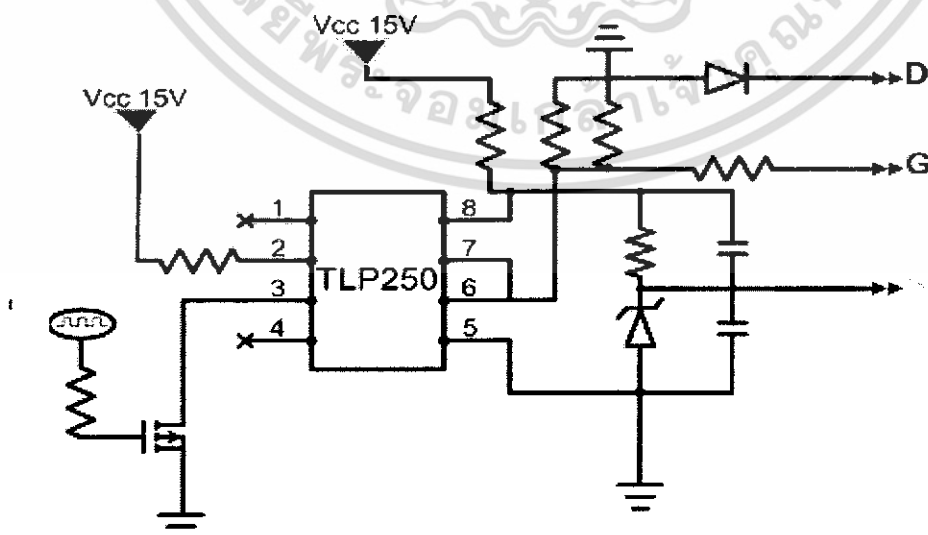


รูปที่ 6-3 แสดงการต่อใช้งานไอซีเบอร์ TL 494

6.4.1.2 วงจรขยายสัญญาณหรือวงจรขับ

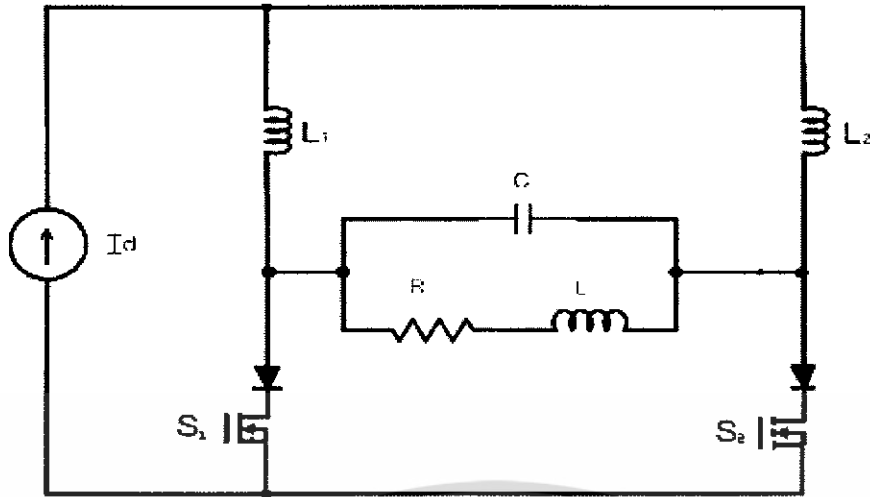
สัญญาณพัลส์ที่ได้จากชุดวงจรสร้างสัญญาณจะถูกนำมาต่อเข้ากับวงจรขับนี้ และเราจะใช้ไอซีเบอร์ TLP 250 เป็นตัวแยกกราวด์ เพื่อแยกกราวด์ของวงจรควบคุมและวงจรภาคกำลังออกจากกัน ดังรูปที่ 6-4

6.4.2 ส่วนของวงจรภาคกำลัง ส่วนนี้จะเป็นวงจรที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะนำอุปกรณ์ต่างๆ มาต่อกันตามรูปข้างล่าง จะเห็นได้ว่ามีอุปกรณ์เช่น มอสเฟตที่อนุกรมกับไดโอดที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ วงจรดังรูปที่ 6-5



รูปที่ 6-4 วงจรขยายสัญญาณหรือวงจรขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-5 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์

6.5 ชุดโพลาร์ไรโซแนนซ์ขนาน

อุปกรณ์ในส่วนนี้จะประกอบด้วยขดลวดทองแดงพันเป็นวงกลม วางอยู่ใต้ภาชนะหุงต้ม ซึ่งจะวางห่างภาชนะหุงต้มเล็กน้อย เพื่อเป็นการระบายความร้อนที่ออกมาจากภาชนะอื่น เนื่องจากความร้อนที่แผ่กระจายขณะทำงาน ซึ่งจะมีคาปาซิเตอร์ต่อขนานอยู่กับขดลวด ดังรูปที่ 6-6

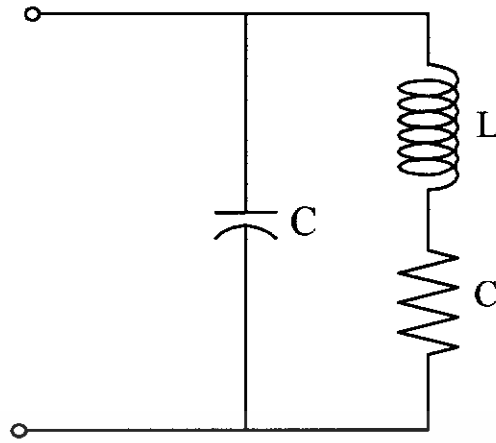
6.6 การออกแบบวงจร ชุดโพลาร์ไรโซแนนซ์

ในการออกแบบขดลวดจะพิจารณาจากผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองควบคู่กันไป โดยตัวแปรที่สำคัญก็คือ ภาชนะหุงต้ม ที่ขึ้นอยู่กับ ความหนาและชนิดของวัสดุ จะทำให้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรมันเปลี่ยนแปลงไปในการออกแบบขั้นต้น เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.1)

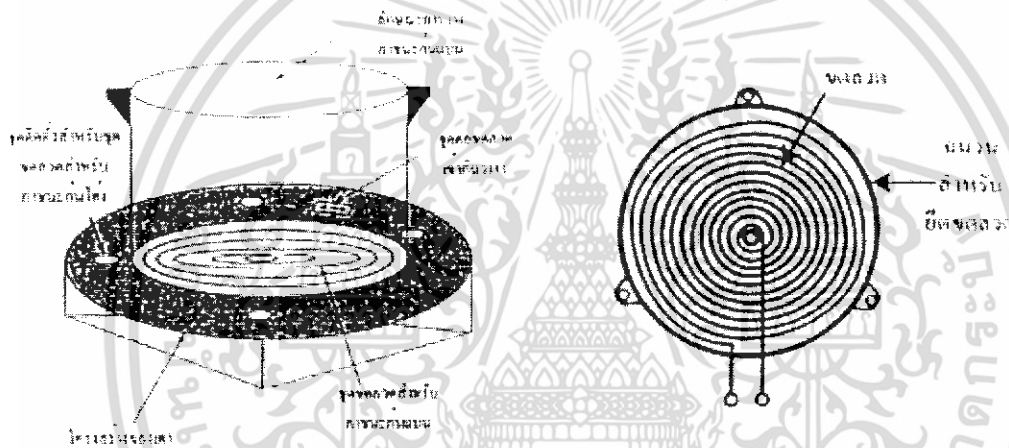
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (6.1)$$

เมื่อ	f_r	คือ	ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)
	L_r	คือ	ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ (H)
	C_r	คือ	ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ (F)

งานวิจัยนี้จะต้องมีการออกแบบขดลวดให้สามารถใช้ได้กับภาชนะกันแบบ ดังนั้น จึงสามารถออกแบบรูปทรงอย่างคร่าวๆ ได้ดังรูปที่ 6-7 โดยหลักการออกแบบจะแยกชุดขดลวดสำหรับภาชนะกันกันแบบออกจากกันอย่างอิสระ ขดลวดสำหรับภาชนะกันแบบจะติดตั้งอยู่กับเตาคงที่



รูปที่ 6-6 แสดงวงจรสมมูลของโพลดิโคโนเนนท์

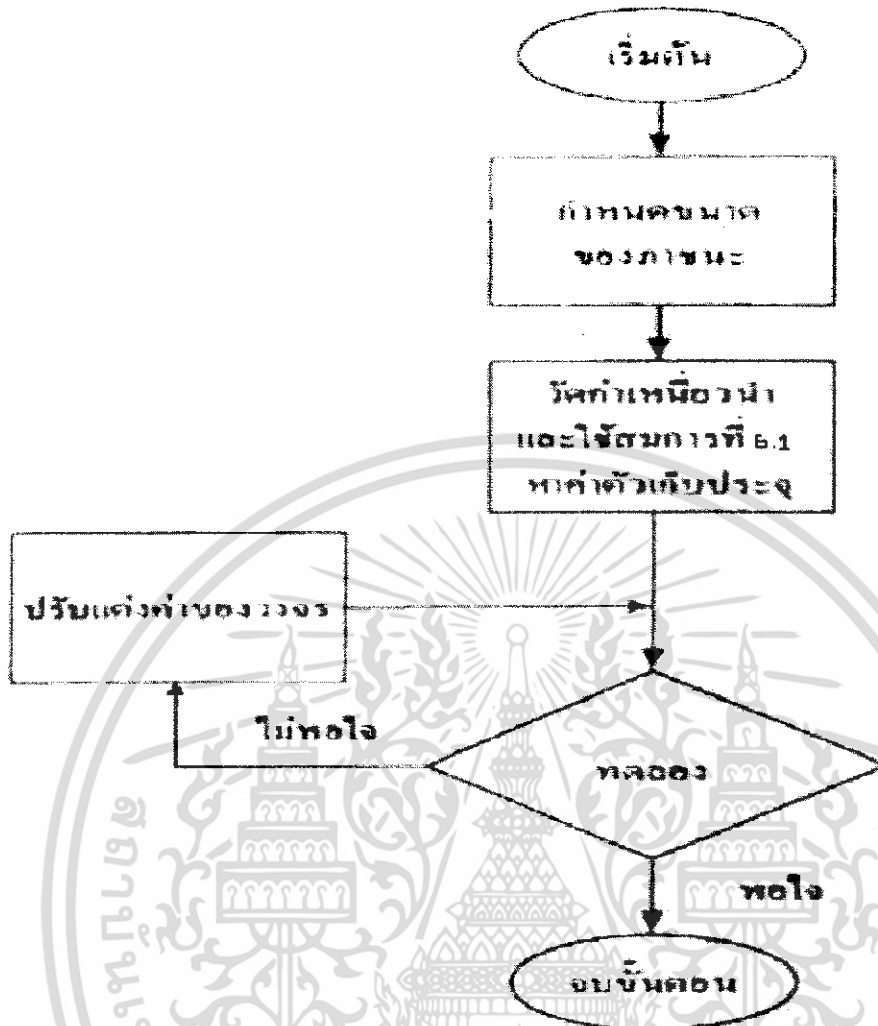


รูปที่ 6-7 รูปทรงของขดลวดเหนี่ยวนำของภาชนะหึ่งดัม

สำหรับการคำนวณเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ แสดงให้เห็นตามผังงานรูปที่ 6-7 อธิบายได้ว่าการออกแบบต้องกำหนดขนาดของภาชนะให้แน่นอน เพื่อต้องการให้วงจรมีประสิทธิภาพทำงานได้สูงสุด ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ภาชนะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร โดยพันขดลวดให้มีความหนาเท่ากับภาชนะนั้น ๆ เมื่อได้ขดลวดที่มีรูปทรงตามต้องการต่อไปจะนำขดลวดดังกล่าวไปตรวจวัดค่าความเหนี่ยวนำ ตามสมการที่ 6.1 ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเท่ากับ 33.56 KHz

นอกจากนี้ จะต้องการออกแบบฉนวนกั้นระหว่างขดลวดกับภาชนะ เพื่อป้องกันไม่ไห้ส่วนใด ๆ ของภาชนะสัมผัสกับขดลวดเหนี่ยวนำโดยตรง ฉนวนนี้จะเป็นฉนวนที่ทนความร้อนได้สูง เช่น เซรามิก แผ่นไมก้า หรืออื่นๆ ซึ่งการเลือกมาใช้งานจะต้องคำนึงถึงน้ำหนัก ความทนทาน และราคาประกอบกันดังนั้น ความหนาของฉนวนจะต้องอยู่จุดเหมาะสมของการทำงาน ในส่วนนี้จะต้องมีการทดลองและปรับแต่งค่าเพื่อให้เครื่องทำงานได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-8 ผังงานการหาค่าตัวเหนียวนาฬิกาและตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

ผลการทดลอง

7.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งจะทำให้การปรับเปลี่ยนค่าของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อดูค่ากำลังที่เปลี่ยนไป เช่น การเพิ่ม-ลดรอบของขดลวด การเพิ่ม-ลด ค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาท์พุท เพื่อเปลี่ยนความถี่เรโซแนนท์ โดยการเก็บค่าข้อมูลจะทำโดยใช้ Oscilloscope รุ่น DL 1520 YOKOGAWA เก็บข้อมูลเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้า และค่าต่าง ๆ

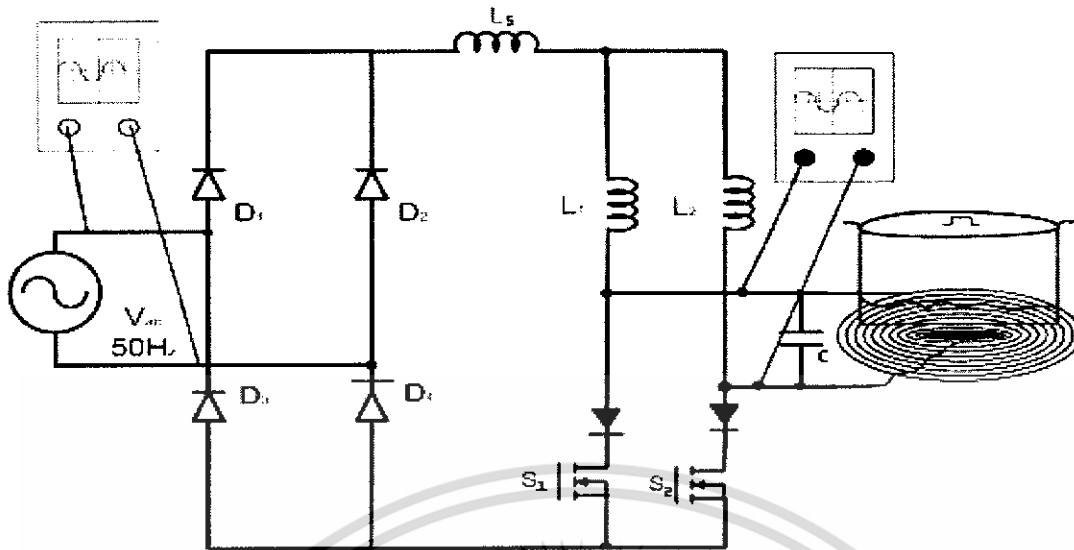
7.2 การทดลองเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูง

การทดลองนี้จะวัดที่จุดสองจุดคือ ที่ด้านอินพุทของเครื่องให้ความร้อน และด้านเอาท์พุทของซูดฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 7-1 เพื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังอินพุทและเอาท์พุท

ตารางที่ 7-1 อุปกรณ์และค่าพิกัดต่าง ๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

รายการ	รายละเอียด
อุปกรณ์สวิตช์อินเวอร์เตอร์	IRFP 460, $R_{DS(on)} = 0.27 \Omega$
ไอซีที่ใช้แยกกราวด์	TLP 250
ไอซีที่ใช้ในการสร้างพัลส์	TL 494
ความถี่ของอินเวอร์เตอร์	33.56 kHz
ตัวเก็บประจุเรโซแนนท์	2.0 μF
ค่าความเหนี่ยวนำ L_s	30 mH
ค่าความเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2	10 mH
ชนิดของภาชนะ	ภาชนะสแตนเลส
เส้นผ่าศูนย์กลางของภาชนะ	22 เซนติเมตร
ระยะห่างระหว่าง working coil กับภาชนะ	0.6 เซนติเมตร
จำนวนรอบของ working coil	18 รอบ
เส้นผ่าศูนย์กลางของ working coil	22 เซนติเมตร
จำนวนเส้นลวดตีเกลียว	80 เส้น เบอร์ 28 S.W.G

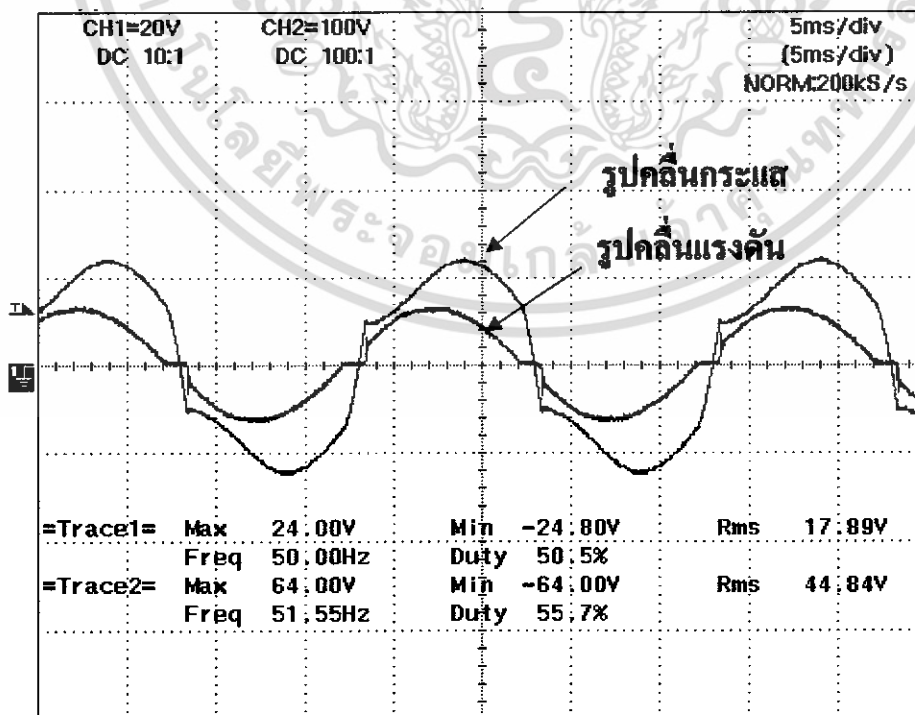
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-1 การวัดสัญญาณ Input และ Output ของวงจร

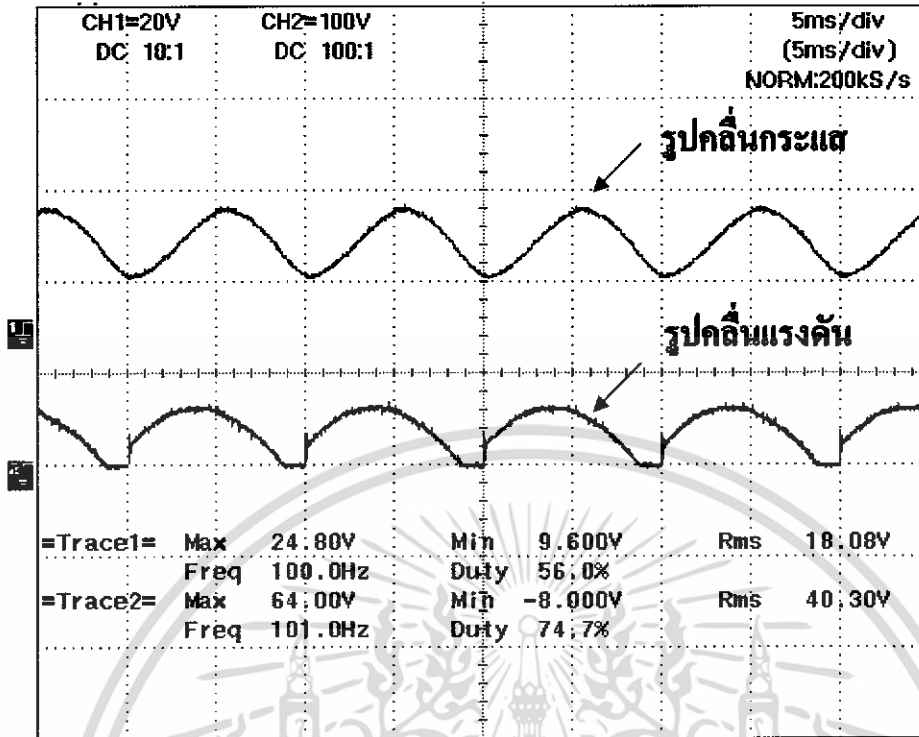
7.3 รูปกระแสและแรงดันที่จุดต่าง ๆ ในกับังจร

จากการทดลองเพื่อเก็บรูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่จุดต่าง ๆ ของวงจรได้ผลการทดลอง โดยจะแสดงให้เห็นว่าแต่ละจุดของวงจรนั้น มีรูปคลื่นกระแสและแรงดันเป็นอย่างไร เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังทางด้านอินพุต และกำลังทางด้านเอาต์พุต จากการทดลองและจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (MATLAB) นำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงเครื่องนี้

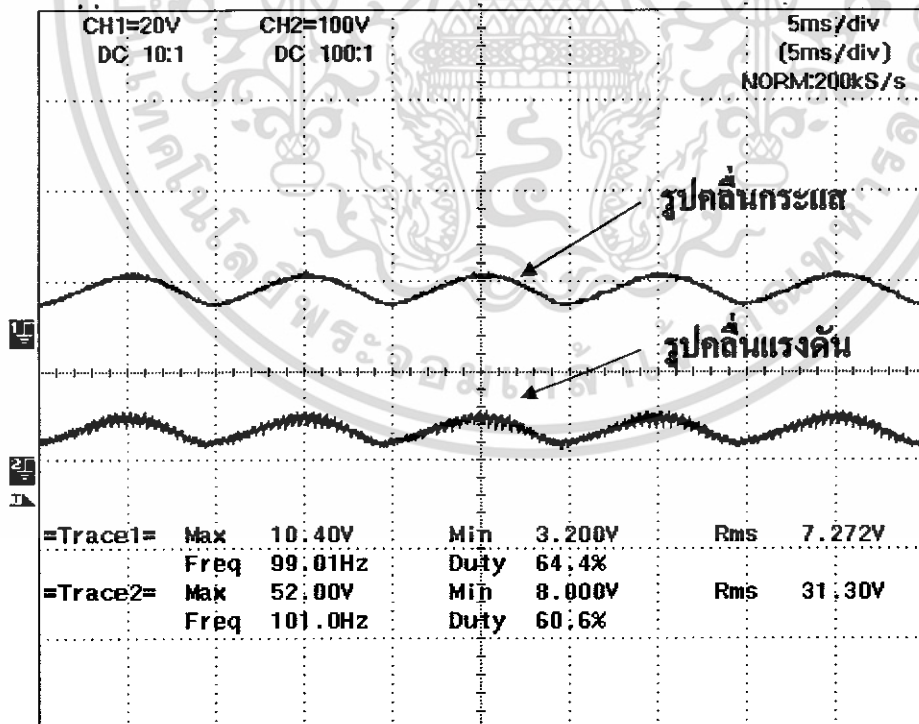


รูปที่ 7-2 รูปกระแสและแรงดันอินพุตของวงจร

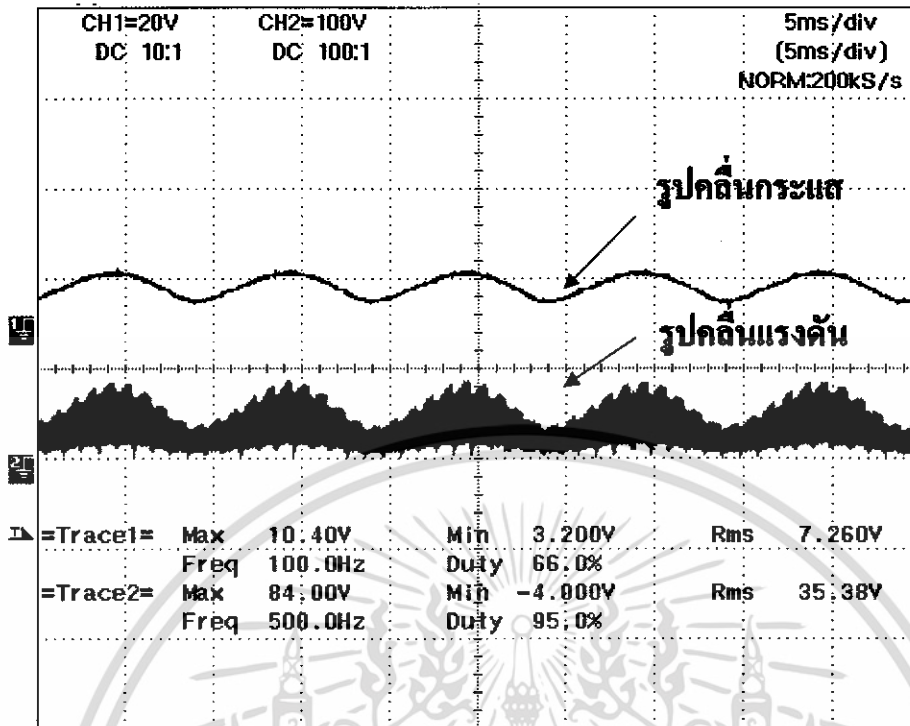
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน เมื่อผู้ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-3 รูปกระแสและแรงดันหลังวงจร Bridge

รูปที่ 7-4 รูปกระแสและแรงดันที่ L_s ถ่ายให้กับ L_1 และ L_2

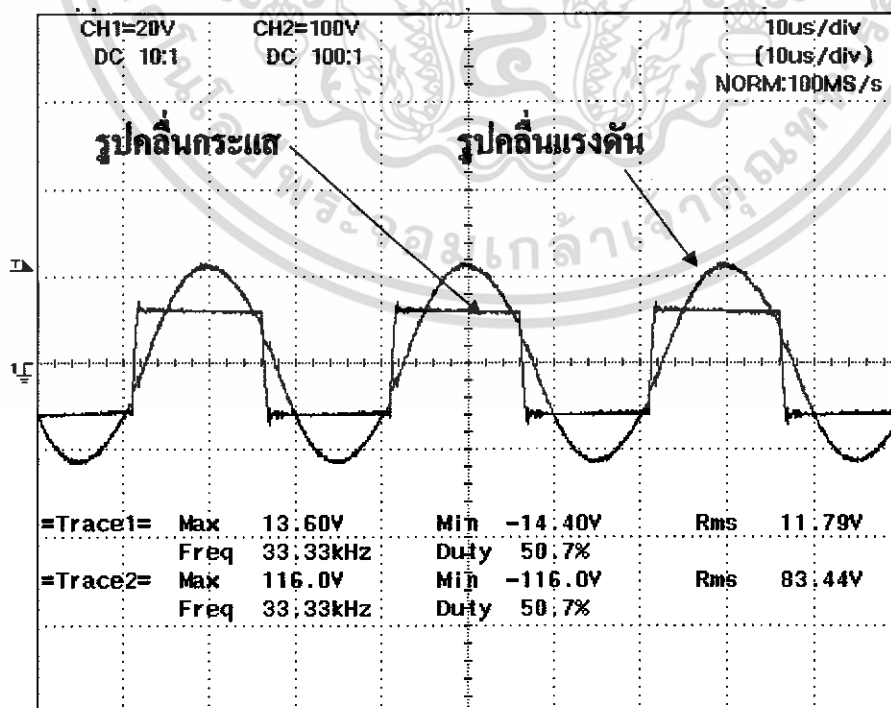
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-5 รูปกระแสและแรงดันที่ L_1 และ L_2 ถ่ายให้กับวงจร

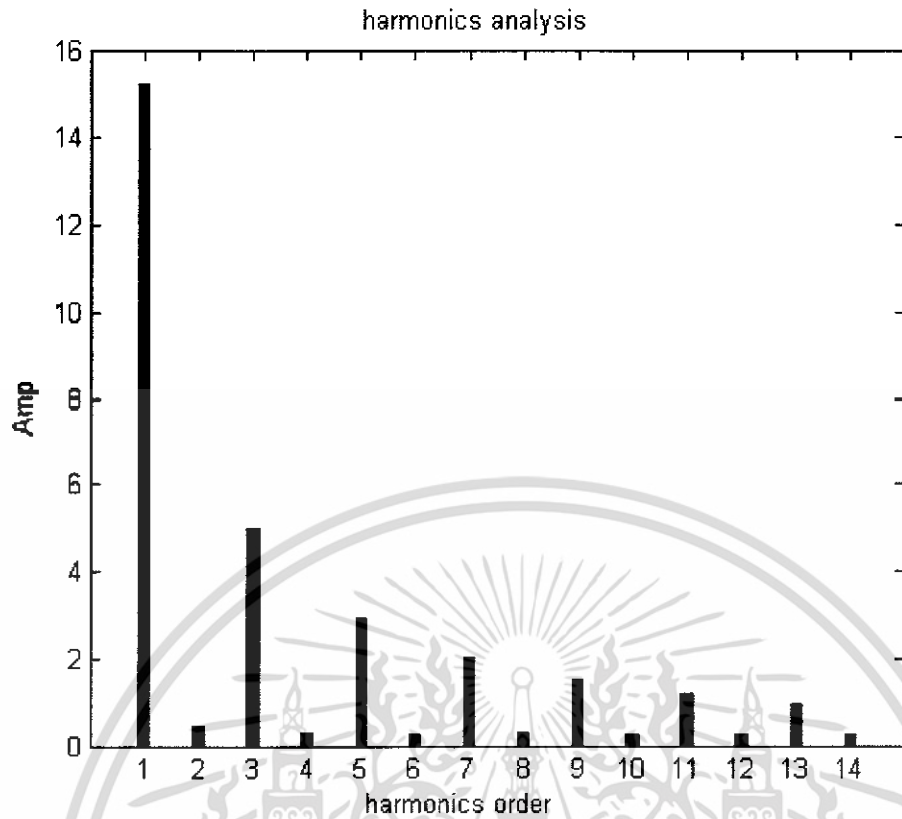
7.4 รูปกระแสและแรงดันที่จ่ายโหลด

ผลลัพธ์ของกระแสและแรงดันที่โหลดเกิดจากผลรวมของกระแสที่คาปาซิเตอร์ร่วมกับกระแสที่อินดักเตอร์ ซึ่งเป็นดังต่อไปนี้

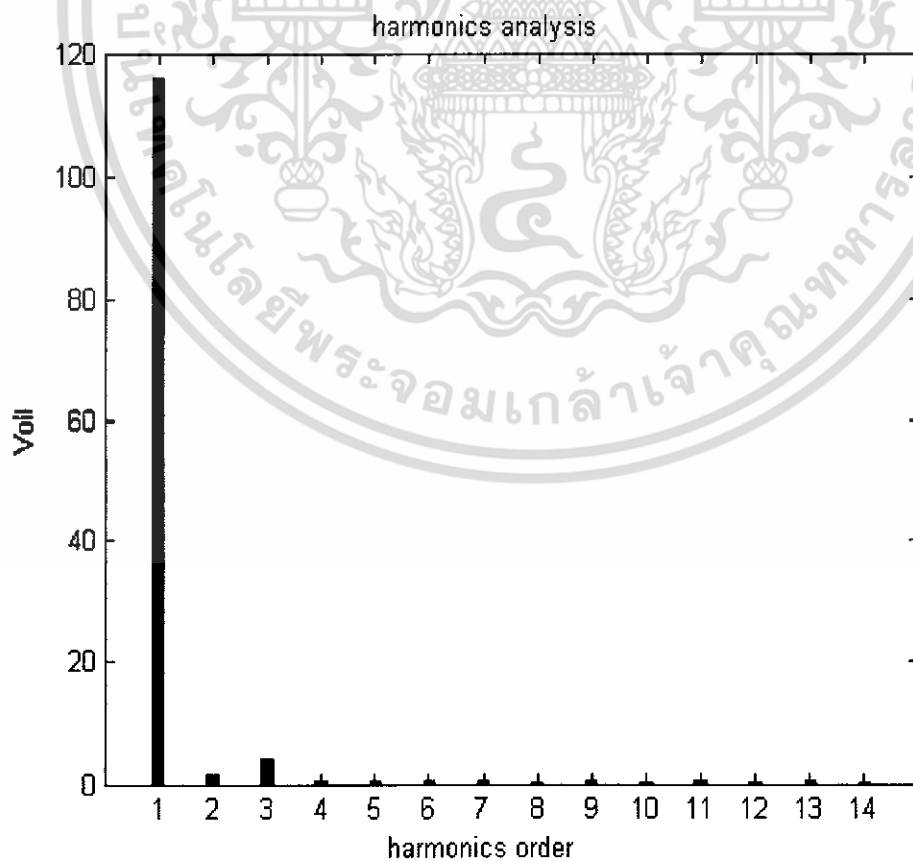


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 7-6 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

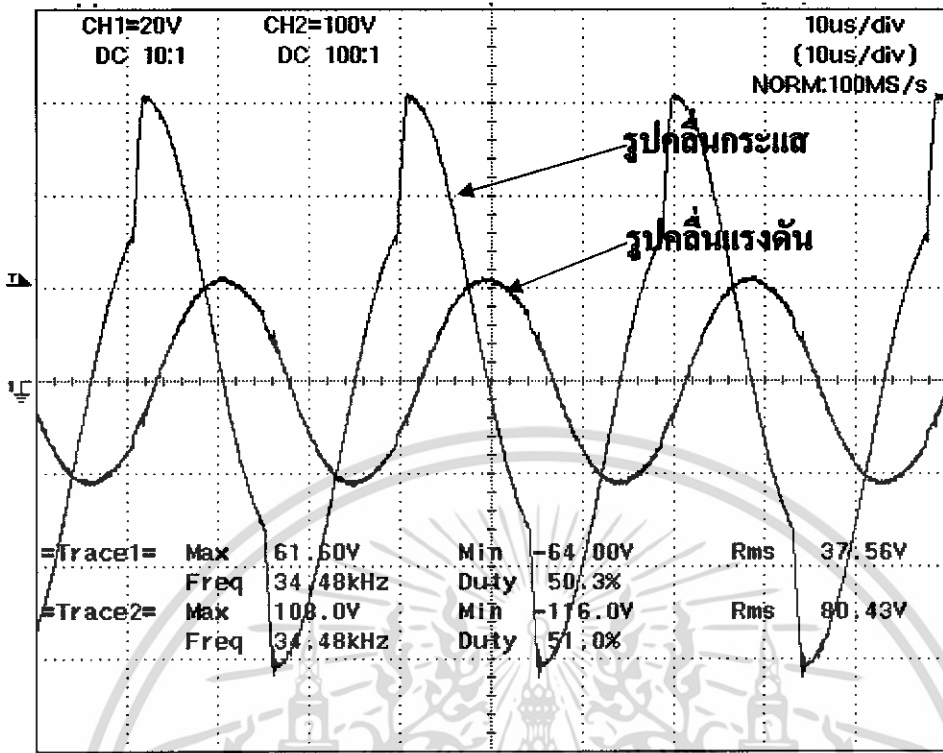
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



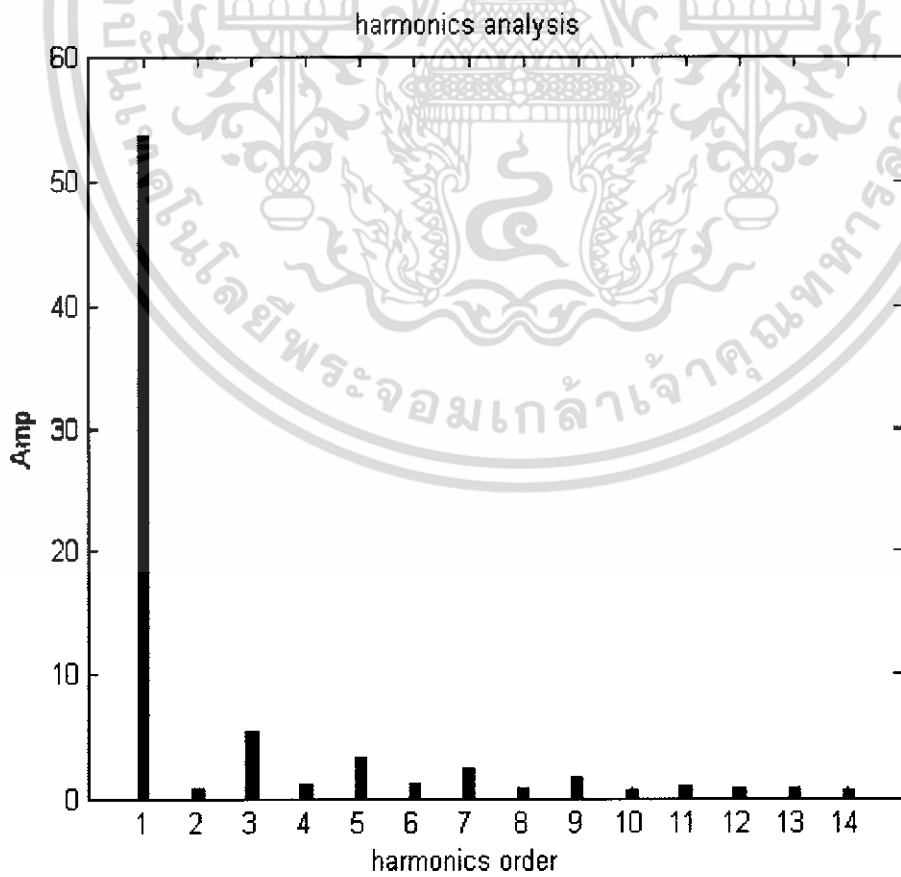
รูปที่ 7-7 ฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่โหลด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 7-8 ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่โหลดอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

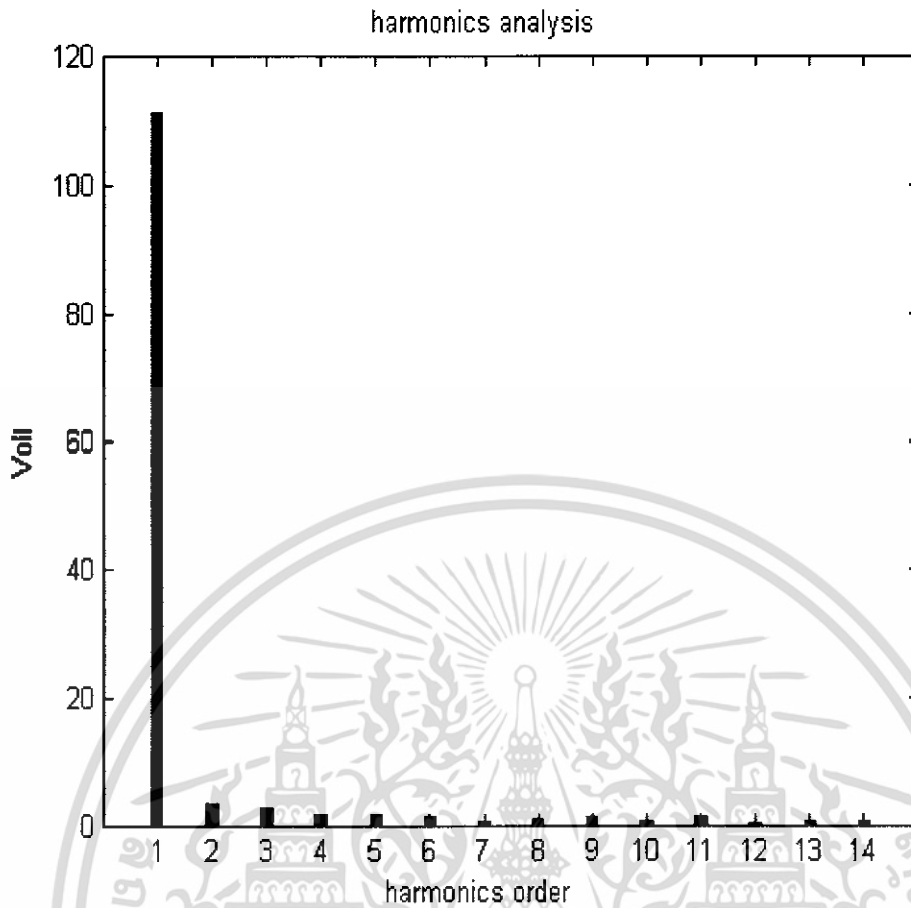


รูปที่ 7-9 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่คาปาซิเตอร์

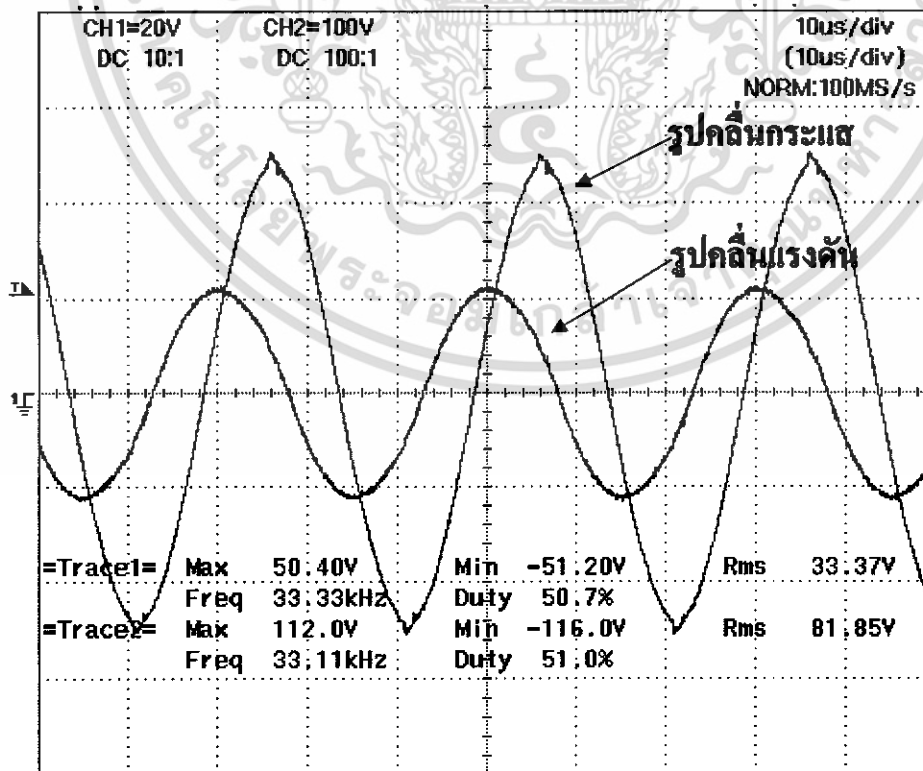


รูปที่ 7-10 ฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่คาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

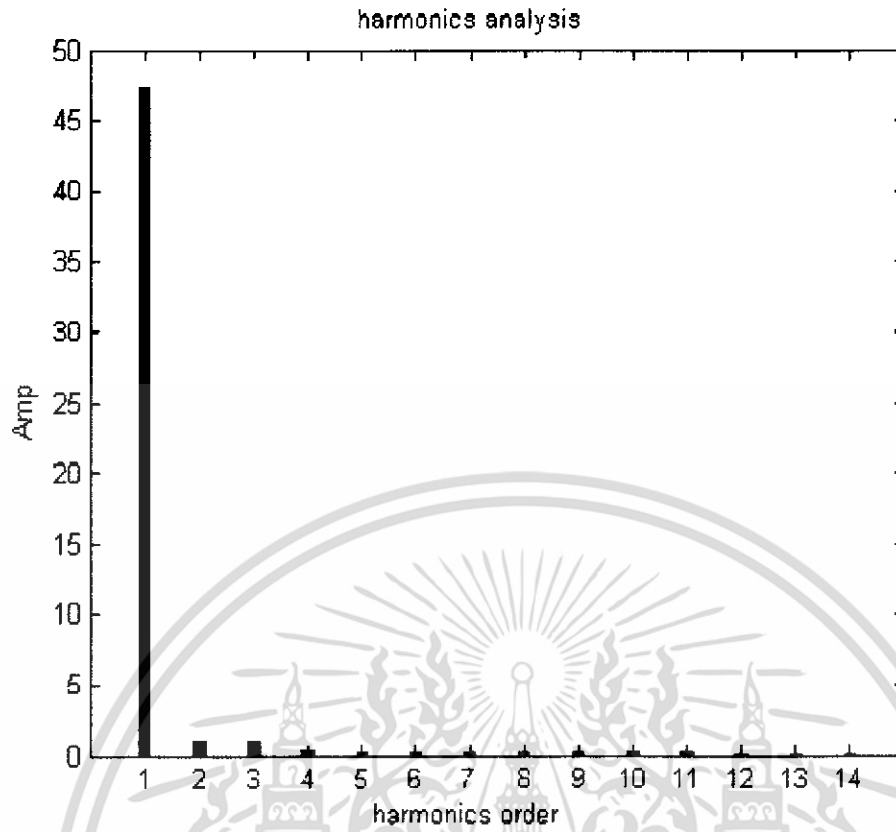


รูปที่ 7-11 ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่คาปาซิเตอร์

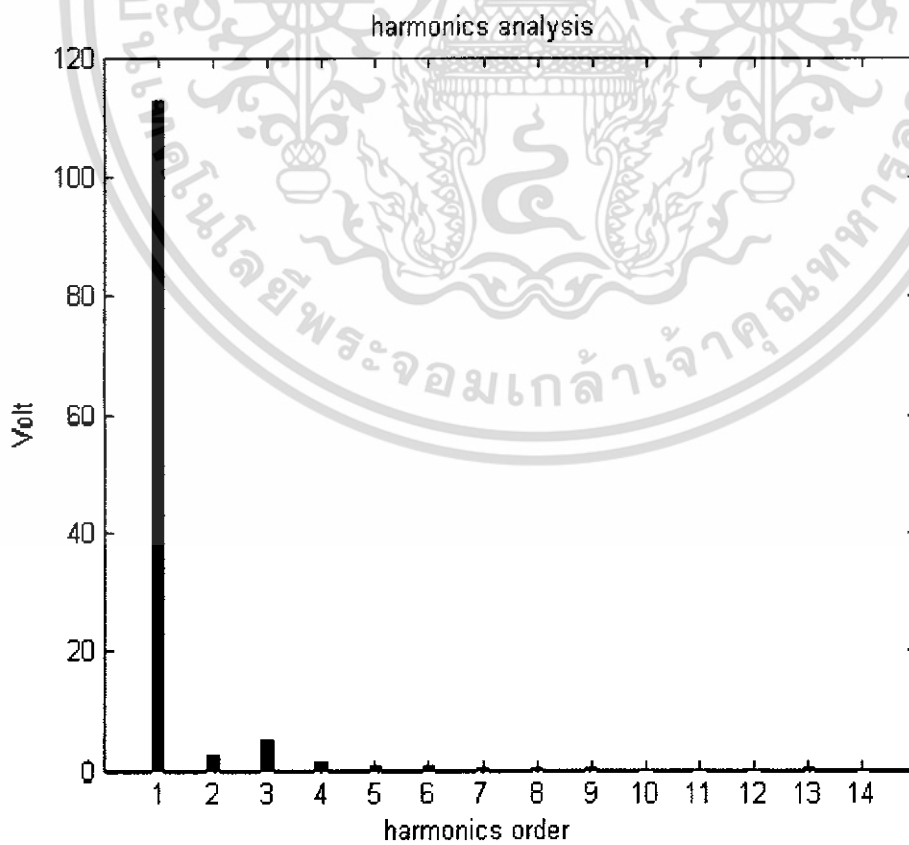


รูปที่ 7-12 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำ

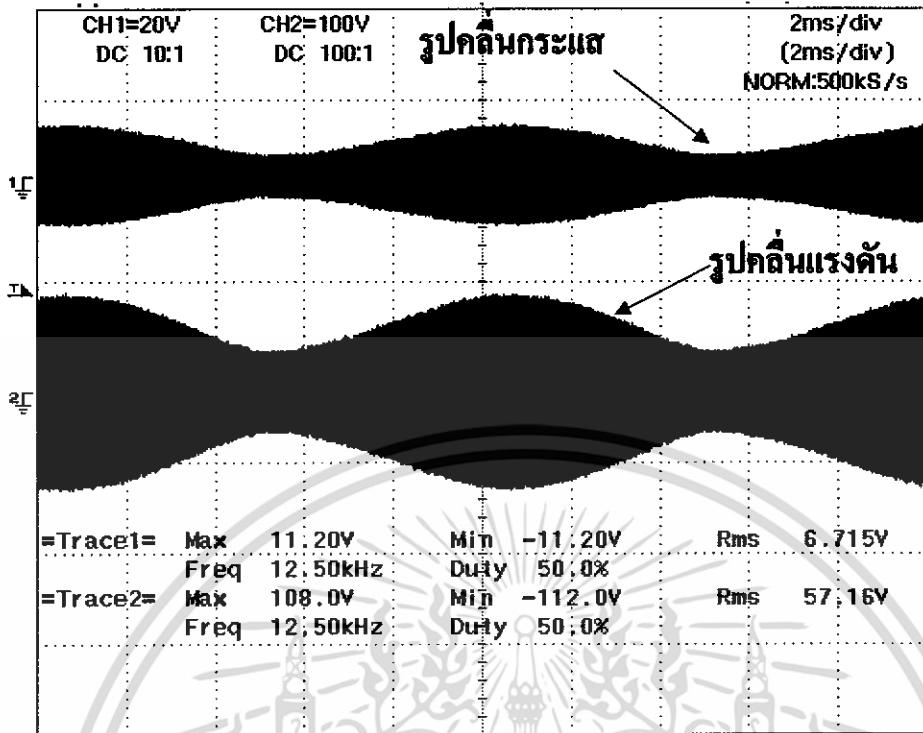
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



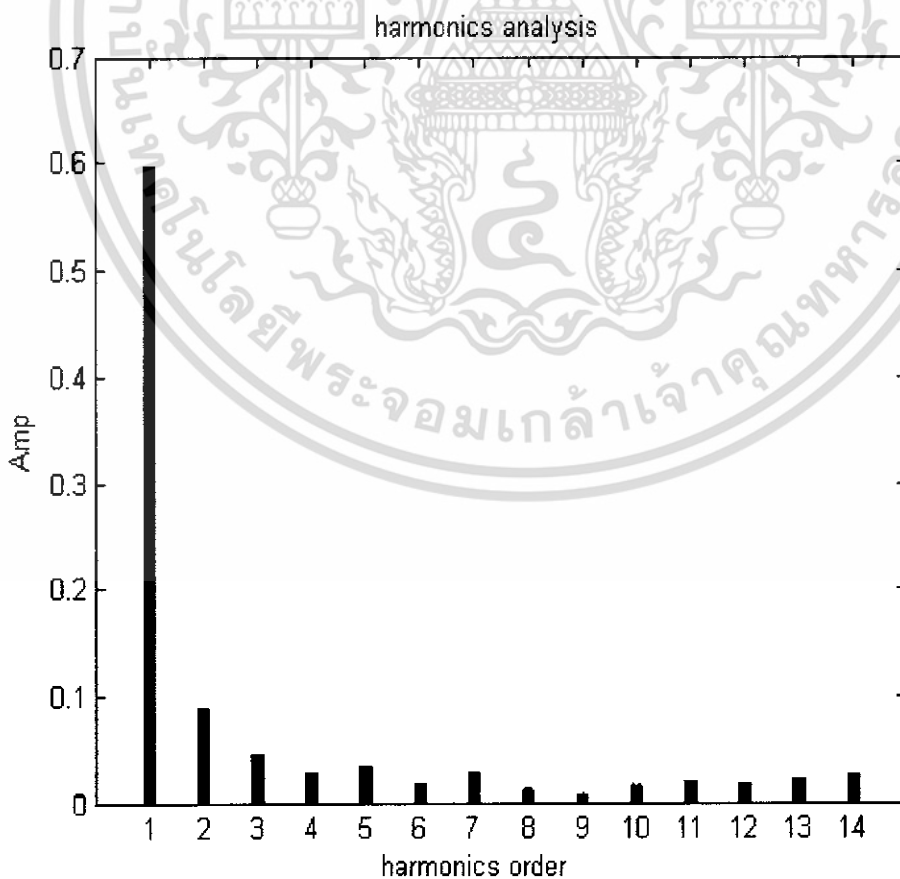
รูปที่ 7-13 ฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **รูปที่ 7-14** ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

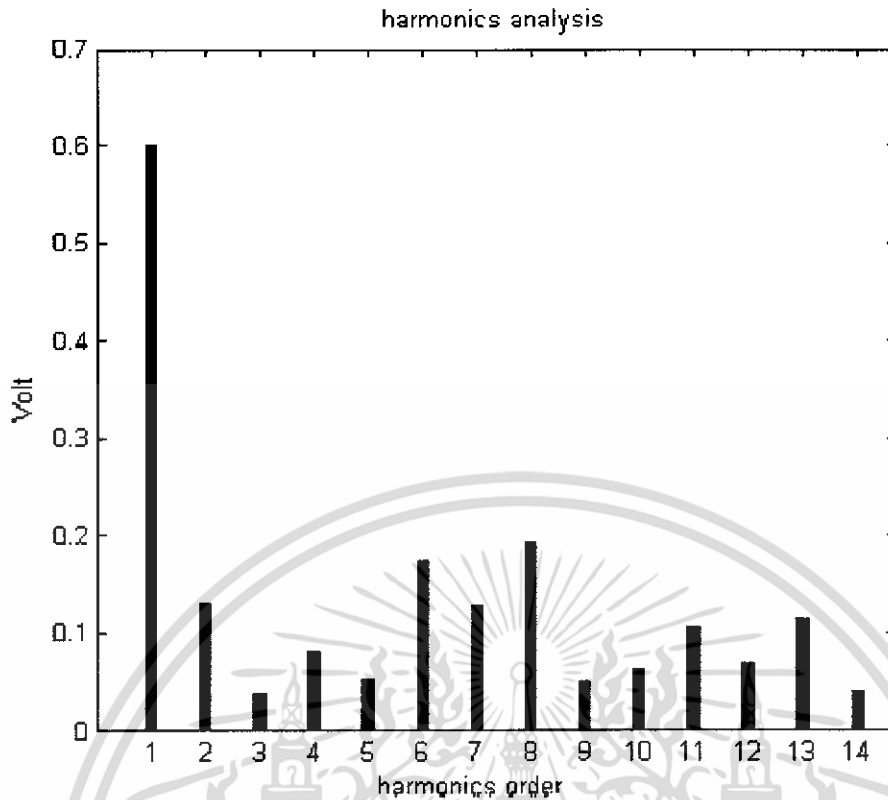


รูปที่ 7-15 รูปแรงดันและกระแสที่โหลดเมื่อเทียบกับ Fundamental



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 7-16 ฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่โหลดเมื่อเทียบกับ Fundamental ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

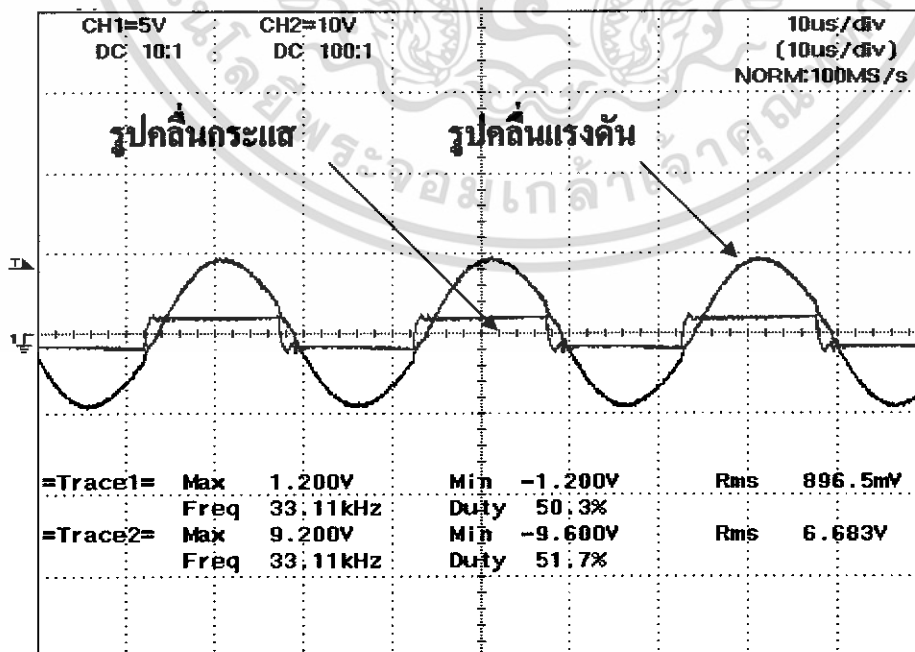
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



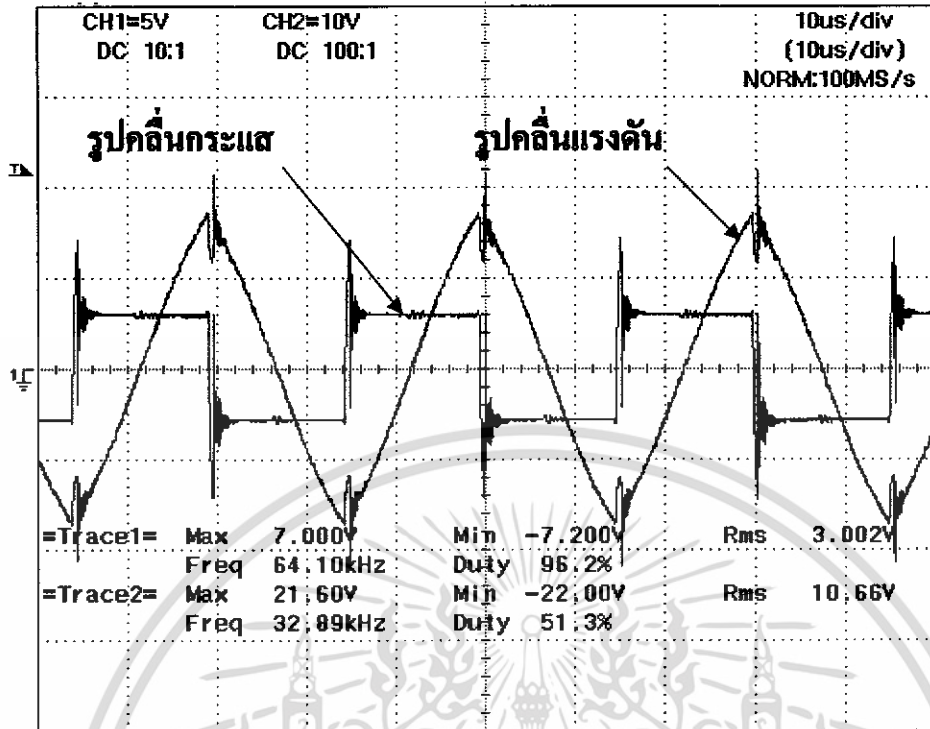
รูปที่ 7-17 ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่โหลดเมื่อเทียบกับ Fundamental

7.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองขณะมีโหลดกับไม่มีโหลด

จากผลการทดลองเป็นการเปรียบเทียบกำลังทางด้านเอาต์พุตของวงจร เมื่อวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดหนึ่งมีโหลดและอีกชุดหนึ่งไม่มีโหลด ที่แหล่งจ่ายเท่ากับที่ 10 โวลต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **รูปที่ 7-18** สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขณะมีโหลด วัตถุประสงค์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-19 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขณะไม่มีโหลด

7.6 การทดลองเปรียบเทียบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในกรณีความถี่ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่เรโซแนนท์

7.6.1 การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนท์

การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนท์ จะทำให้โหลดมีลักษณะที่เป็นอินดักทีฟ โหลด กระแสจะล่าหลังแรงดัน ทำให้แรงดันตกคร่อมสวิตช์ตัวที่เปิดวงจรอยู่เป็นลบ ทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้ จะต้องรอให้สวิตช์ตัวหยุดนำกระแสเสียก่อน

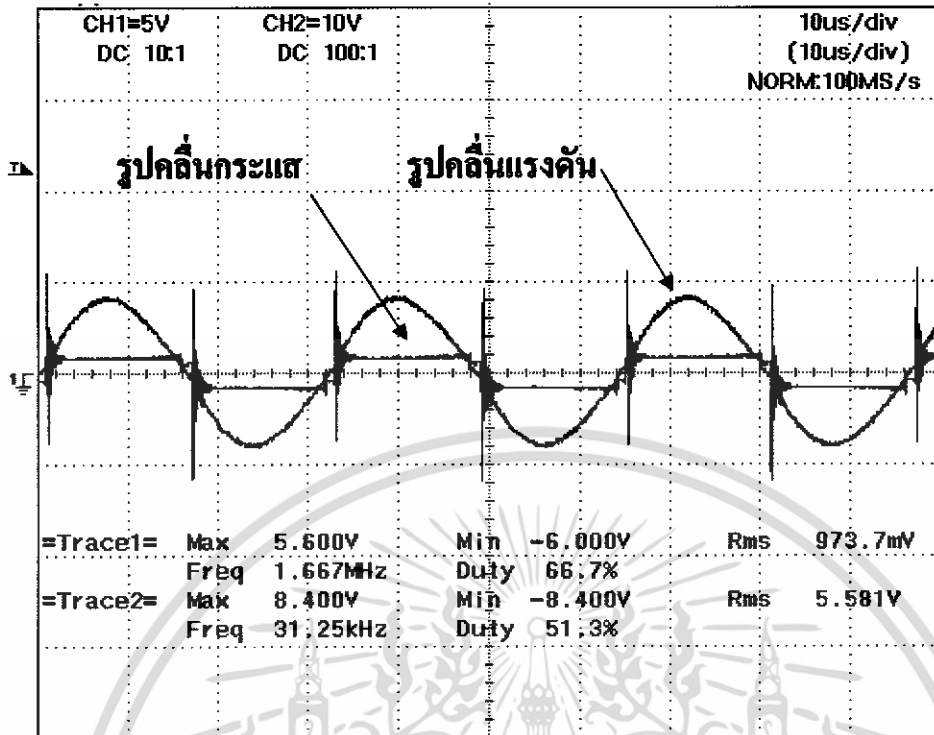
จากผลการทดลองที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนท์ จะเห็นได้ว่าที่จุดที่เปลี่ยนสถานะของสวิตช์จะเกิดแรงดันยอดสูง (Spike Voltage) ขึ้นที่สวิตช์ ดังรูปที่ 7-20 เนื่องจากการที่สวิตช์นำกระแสไม่ต่อเนื่องกัน ในช่วงการสับเปลี่ยนการนำกระแสของสวิตช์จะเห็นได้ว่ากระแสในช่วงดังกล่าวมีความไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งการที่สวิตช์ยังไม่เสียหายเพราะขนาดของกระแสในการทดลองยังมีค่าต่ำ แต่ในการทำงานจริงอาจเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์สวิตช์ เนื่องจากแรงดันสูงเกินได้

7.6.2 การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์

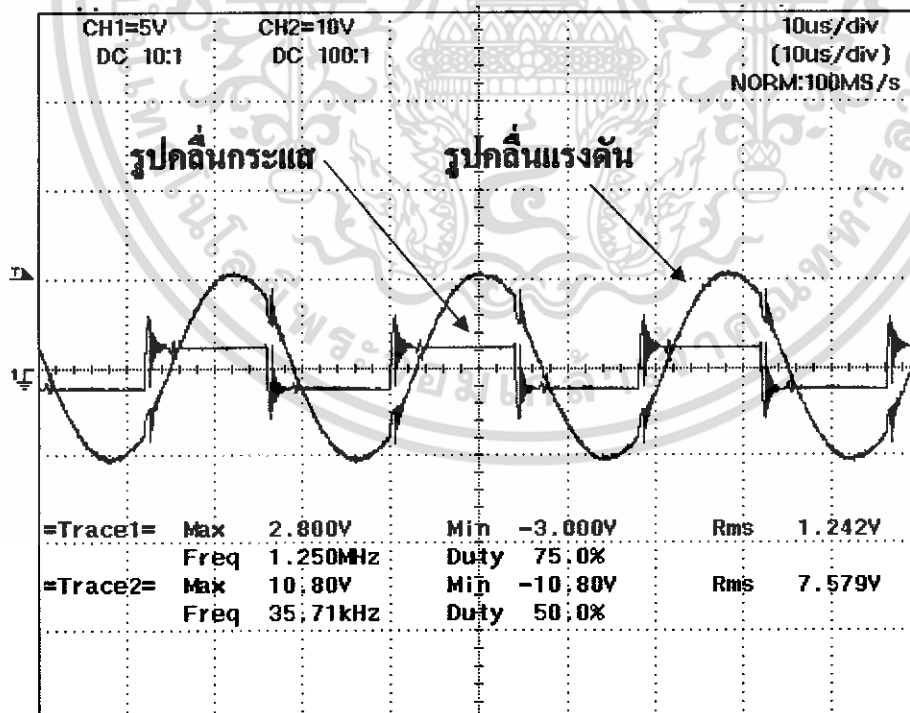
การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์ จะทำให้โหลดมีลักษณะที่เป็นคาปาซิทีฟ โหลด กระแสจะนำหน้าแรงดันและสวิตช์จะทำงานในลักษณะประกบคู่

ซึ่งผลการทดลองที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์ จะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นดังรูปที่ 7-21 ซึ่งจะไม่มีการเกิดแรงดันยอดสูงเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-20 รูปกระแสและแรงดันที่ไหลในขณะทำงานต่ำกว่าความถี่เรโซแนนท์



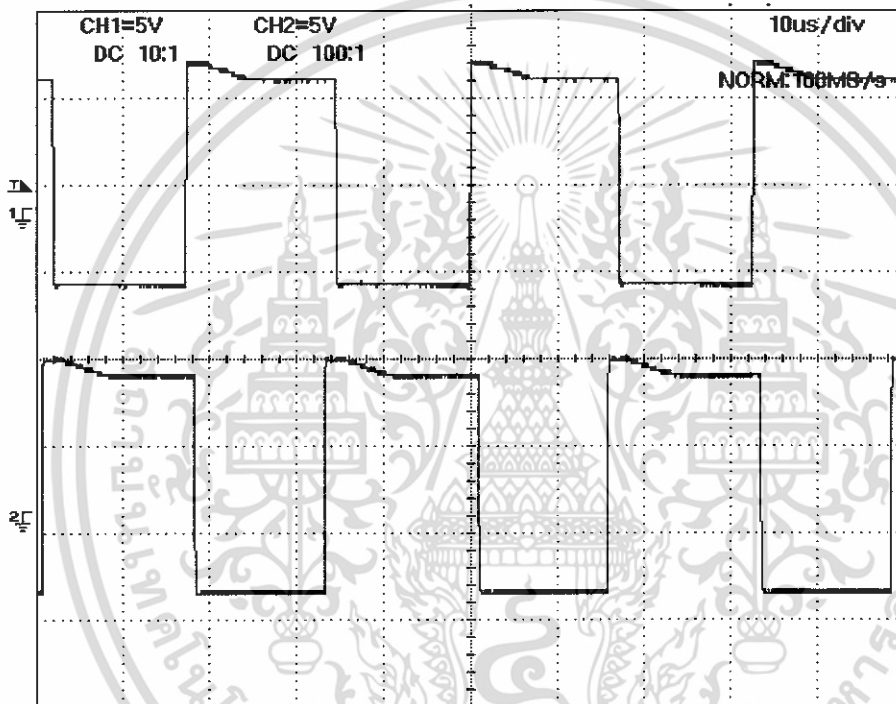
รูปที่ 7-21 รูปกระแสและแรงดันที่ไหลในขณะทำงานสูงกว่าความถี่เรโซแนนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงการสับเปลี่ยนการนำกระแสของสวิตช์จะเห็นได้ว่ากระแสในช่วงดังกล่าวมีความต่อเนื่องกัน คือในขณะที่กระแสตัวหนึ่งกำลังลดลงเป็นศูนย์ กระแสอีกตัวหนึ่งก็จะเพิ่มขึ้นในเวลาเดียวกัน ทำให้การทำงานของสวิตช์เป็นลักษณะคู่ประกบกัน ทำให้ไม่เกิดการเปิดวงจรของแหล่งจ่ายกระแส

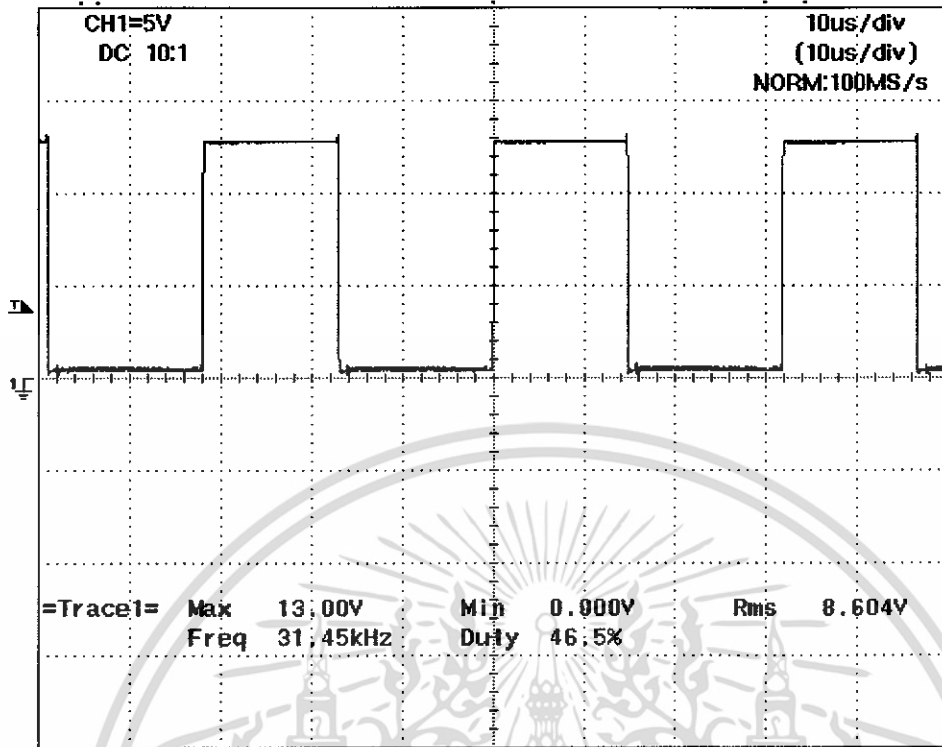
7.7 รูปสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ของชุดควบคุม

ชุดควบคุมเป็นชุดที่สร้างสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งแสดงไว้ดังรูปต่อไปนี้

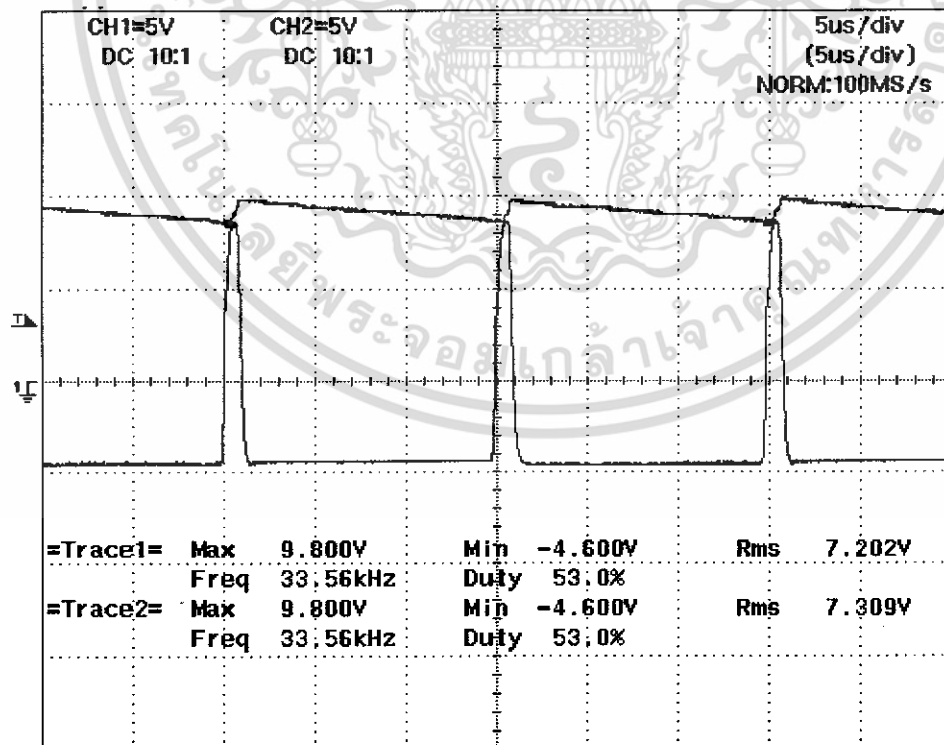


รูปที่ 7-22 สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL 494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

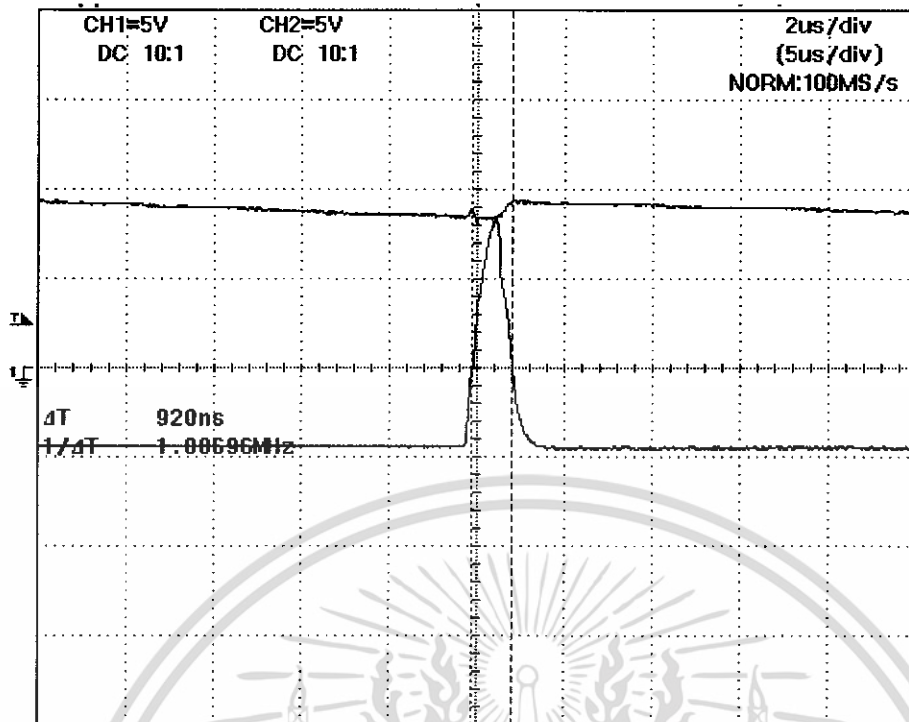


รูปที่ 7-23 สัญญาณอินพุตของไอซีเบอร์ TLP 250



รูปที่ 7-24 สัญญาณเอาต์พุตของชุดขับที่ใช้ขับนำมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-25 ภาพขยายสัญญาณเอาต์พุตของชุดขับที่ใช้ขับนำมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการคำนวณวิเคราะห์ และทดลองเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสเพื่อใช้ในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง สามารถสรุปประเด็นสำคัญต่างๆได้ดังนี้

1) สามารถเข้าใจหลักการคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูลและค่าความเหนี่ยวนำสมมูล เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจร เช่น แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ความถี่สูงได้

2) สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง รวมทั้งค่าประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้ โดยได้นำผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

3) ในการทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง จะเห็นได้ว่าในแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน เช่นควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับ Duty และการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับที่แหล่งจ่าย

4) การลดความถี่เรโซแนนท์ จะทำได้โดยการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต การลดความถี่นี้จะทำให้ผลของ skin depth และกระแสไหลที่ผิวลึกลงเข้าไปในชิ้นงานมากขึ้น การทำเช่นนี้ทำให้ความต้านทานต่ำลง กระแสที่ไหลในกันภาชนะก็จะมากขึ้น

5) เนื่องจากงานวิจัยนี้วิเคราะห์แต่ทางด้านภาคเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เท่านั้น โดยไม่ได้คำนึงถึงผลทางด้านภาคอินพุตของซดเรกติฟายเออร์ ดังนั้นปัญหานี้จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการพิจารณาว่าจะทำอย่างไรในการแก้ไขกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต ตลอดจนฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบต่อไป

เอกสารอ้างอิง

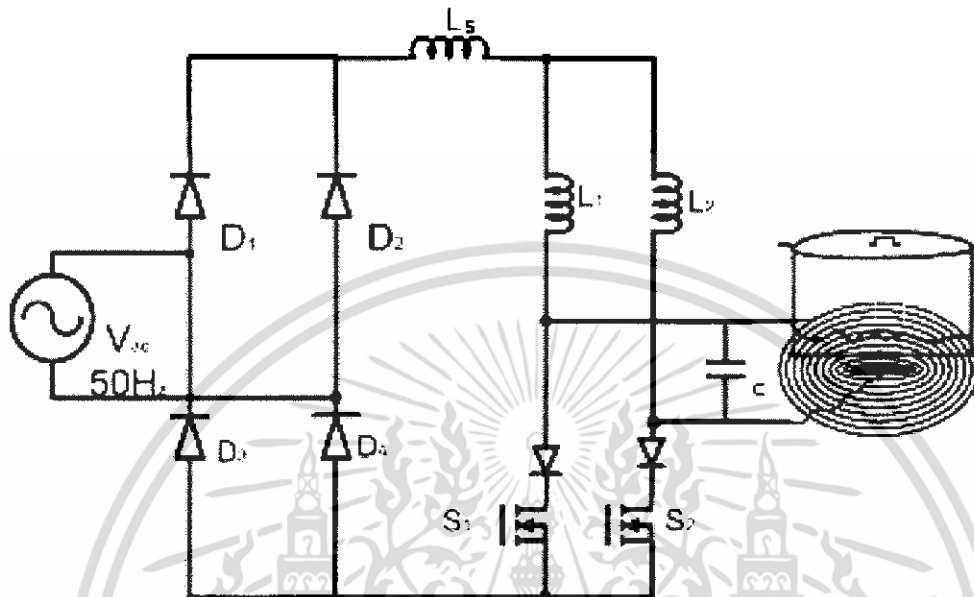
- [1] Marian K. Kazimierzuk. Senior Member, "Current-Source Parallel-Resonant DC/AC Inverter with Transformer," **IEEE Transaction on Power Electronics**, VOL.11, NO.2, March 1996. pp. 275-284.
- [2] N. Mohan, T. M. Underland, and W.P. Robins, **Power Electronics Converter, Application and Design**, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [3] Zhu Jiahua. Loa Fang Lin, "Analysis of a Bipolar Current Source Power Inverter," **IEEE Transaction on Power Electronics** 2003. pp. 1448-1553.
- [4] วีระเชษฐ ชันเงิน, วุฒิพล ชาราธิ์เรษฐ, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**, พิมพ์ครั้งที่ 1, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [5] โชคชัย ชื่นวัฒนาประณี, ชยันต์ คุ่มภัย และ วีระพล โมณะกุล, 2545, "เครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแสครึ่งบริดจ์สำหรับงานทุบขึ้นรูปโลหะ", **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 25**, 21-21 พฤศจิกายน 2545, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 97-101.
- [6] โธมัส ธรรมาธิฐาน, "การประยุกต์ใช้วงจรรีโซแนนท์ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ทำงานที่ถี่โวลต์เดจสวิตซ์ซึ่ง ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการเลื่อนเฟสเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าความถี่สูง," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [7] ศักดา พรหมเหมือน, "การวิเคราะห์เคาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีการปรับปรุงแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าสายไฟสลัปให้เป็นหนึ่ง," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเตาหุงต้มเหนียวนำความถี่สูง



สเปกอุปกรณ์ของเตาหุงต้มเหนียวนำความถี่สูง

ขดลวดเหนียวนำ	ลวดทองแดงเบอร์ 28 S.W.G. จำนวน 80 เส้น ขดเป็นรูปก้นหอยชั้นเดียว
ภาชนะหุงต้ม	ภาชนะสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 cm.
ระยะ Gap	0.6 mm.
อุปกรณ์สวิตช์อินเวอร์เตอร์ : S1,S2	MOSFET IRFP 460
IC Drive	TL 494
คาปาซิเตอร์เรโซแนนท์	2 uF
Bridge Rectifier	CM 3508

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, NCV494

SWITCHMODE™ Pulse Width Modulation Control Circuit

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

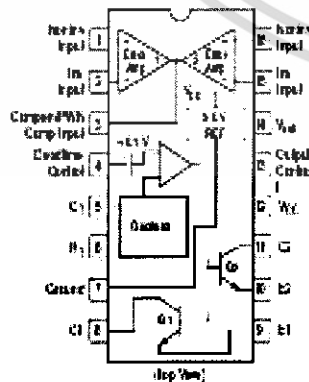
- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator with Master or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifier
- On-Chip 5.0 V Reference
- Adjustable Deadtime Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 100 mA Source or Sink
- Output Control for Push-Pull or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout
- NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Site and Control Changes

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

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	42	V
Collector Output Voltage	V_{CE} V_{CC}	42	V
Collector Output Current (Each transistor) (Note 1)	I_{OL} , I_{OS}	500	mA
Amplifier Input Voltage Range	V_{IN}	-0.5 to +42	V
Power Dissipation @ $T_A = 45^\circ\text{C}$	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}	-65 to +125	$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	T_A	-40 to +125 0 to +70 -40 to +65 -40 to +125	$^\circ\text{C}$
TL494B TL494C TL494I NCV494-E			
Derating Ambient Temperature	T_A	45	$^\circ\text{C}$

1. Maximum thermal limit must be observed.

PIN CONNECTIONS



© Semiconductor Components Industries, LLC, 2004
April 2004 - Rev. 5

1

Publication Order Number:
TL494/D



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

MARKING DIAGRAMS



Y = E, D or I
A = Assembly Location
AL L = Water Lot
YY Y = Year
WW W = Work Week

This marking diagram also applies to NCV494.

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping†
TL494BD	SO-16	48 Units/Reel
TL494BDPD	SO-16	2500 Tape & Reel
TL494CD	SO-16	48 Units/Reel
TL494CDPD	SO-16	2500 Tape & Reel
TL494CN	FDIP-16	28 Units/Reel
TL494IN	FDIP-16	28 Units/Reel
NCV494B0R2	SO-16	2500 Tape & Reel

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specification Brochure, BRD8011.D.

†NCV494: $T_{STG} = -47^\circ\text{C}$, $T_{op} = +125^\circ\text{C}$
Guaranteed by design. NCV prefix is for automotive and other applications requiring site and change control.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, NCV494

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	V_{CE}/V_{CC}	-	30	40	V
Collector Output Current (Each transistor)	i_{C}/i_{EE}	-	-	200	mA
Amplified Input Voltage	V_I	-0.3	-	$V_{CC} - 2.0$	V
Current into Feedback Terminal	i_b	-	-	0.3	mA
Reference Output Current	i_W	-	-	10	mA
Timing Resistor	R_T	1.5	30	500	Ω
Timing Capacitor	C_T	0.0047	0.001	10	μF
Oscillator Frequency	f_{osc}	1.0	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15V$, $C_T = 0.01\mu F$, $R_T = 10k\Omega$, unless otherwise noted.)

For typical values $T_J = 25^\circ C$, for minimum/maximum values T_J is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
REFERENCE SECTION					
Reference Voltage ($i_W = 1.0mA$)	V_{ref}	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation ($V_{CC} = 7.0V$ to $40V$)	$\Delta V_{ref}/\Delta V_{CC}$	-	0.0	0.5	mv
Load Regulation ($i_W = 1.0mA$ to $10mA$)	$\Delta V_{ref}/\Delta i_W$	-	0.0	1.5	mv
Short Circuit Output Current ($V_{CE} = 0V$)	i_{OC}	15	35	75	mA
OUTPUT SECTION					
Collector Off-State Current ($V_{CC} = 40V$, $V_{CE} = 40V$)	$i_{C(off)}$	-	20	100	μA
Emitter Off-State Current ($V_{CC} = 40V$, $V_E = 40V$, $V_I = 3V$)	$i_{E(off)}$	-	-	-100	μA
Collector-Emitter Saturation Voltage (Note 2): Common-Emitter ($V_E = 0V$, $i_C = 200mA$) Emitter-Follower ($V_C = 15V$, $i_E = 200mA$)	$V_{CE(sat)}$ $V_{CE(sat)}$	-	1.1 1.5	1.3 2.5	V
Output Control Pin Current: Low State ($V_{CC} = 3.4V$) High State ($V_{CC} = V_{CC}$)	$i_{OC(ON)}$ $i_{OC(OFF)}$	-	10 0.2	- 3.5	μA 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, NCV494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 10\ \text{k}\Omega$ unless otherwise noted.)For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for minimum values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
ERROR AMPLIFIER SECTION					
Input Offset Voltage ($V_{IO}(\text{max}) = 2.5\text{ V}$)	V_{IO}	-	2.0	3.0	mV
Input Offset Current ($I_{IO}(\text{max}) = 2.5\ \mu\text{A}$)	I_{IO}	-	5.0	25.0	μA
Input Bias Current ($I_{IB}(\text{max}) = 2.5\ \mu\text{A}$)	I_{IB}	-	-0.7	-1.0	μA
Input Common-Mode Voltage Range ($V_{ICM} = 40\ \text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	V_{ICM}	-0.3 to $V_{CC} - 2.0$			V
Open-Loop Voltage Gain (A_{OL}) ($V_O = 2.0\ \text{V}$, $V_I = 0.5\ \text{V}$ to $3.5\ \text{V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	A_{OL}	70	55	-	dB
Unity-Gain Crossover Frequency (f_u) ($V_O = 0.5\ \text{V}$ to $3.5\ \text{V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	f_u	-	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_T	-	65	-	deg
Common-Mode Rejection Ratio ($V_{CM} = 40\ \text{V}$)	CMRR	55	90	-	dB
Power-Supply Rejection Ratio ($V_{CM} = 35\ \text{V}$, $V_O = 2.5\ \text{V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	PSRR	-	100	-	dB
Output Sink Current ($I_{OS}(\text{max}) = 0.7\ \text{A}$)	I_{OS}	0.5	0.7	-	mA
Output Source Current ($I_{OS}(\text{max}) = 3.5\ \text{V}$)	I_{OS}	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 Slew Current ($V_{TH}(\text{max}) = 0.7\ \text{V}$)	I_{TH}	0.5	0.7	-	mA
DEADTIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 11)					
Input Bias Current (Pin 4) ($V_{TH} = 0\ \text{V}$ to $5.25\ \text{V}$)	$I_{B}(\text{off})$	-	-2.0	-1.0	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ($V_{TH} = 0\ \text{V}$, $C = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 10\ \text{k}\Omega$) ($V_{TH} = 0\ \text{V}$, $C = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	DC_{max}	45	45	50	%
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	V_{TH}	-	2.5	3.5	V
OSCILLATOR SECTION					
Frequency ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	f_{osc}	-	40	-	kHz
Standard Deviation of Frequency ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	$\sigma_{f_{\text{osc}}}$	-	3.0	-	%
Frequency Change with Voltage ($V_{CC} = 7.0\ \text{V}$ to $40\ \text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	$\Delta f_{\text{osc}}/\Delta V_{CC}$	-	3.1	-	%
Frequency Change with Temperature ($T_A = T_{\text{min}}$ to T_{typ}) ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 10\ \text{k}\Omega$)	$\Delta f_{\text{osc}}/\Delta T$	-	-	1.0	%
UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION					
Turn-On Threshold (V_{CC} increasing, $I_{UV} = 1.0\ \text{mA}$)	V_{UV}	5.5	5.43	7.0	V
TOTAL DEVICE					
Standby Supply Current (Pin 5 at V_{CC} , All other inputs and outputs open) ($V_{CC} = 15\ \text{V}$) ($V_{CC} = 40\ \text{V}$)	I_{CC}	-	5.5	1.0	mA
Average Supply Current ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 10\ \text{k}\Omega$, $V_{TH} = 2.0\ \text{V}$) ($V_{CC} = 15\ \text{V}$) (See Figure 12)		-	7.0	-	mA

* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula:

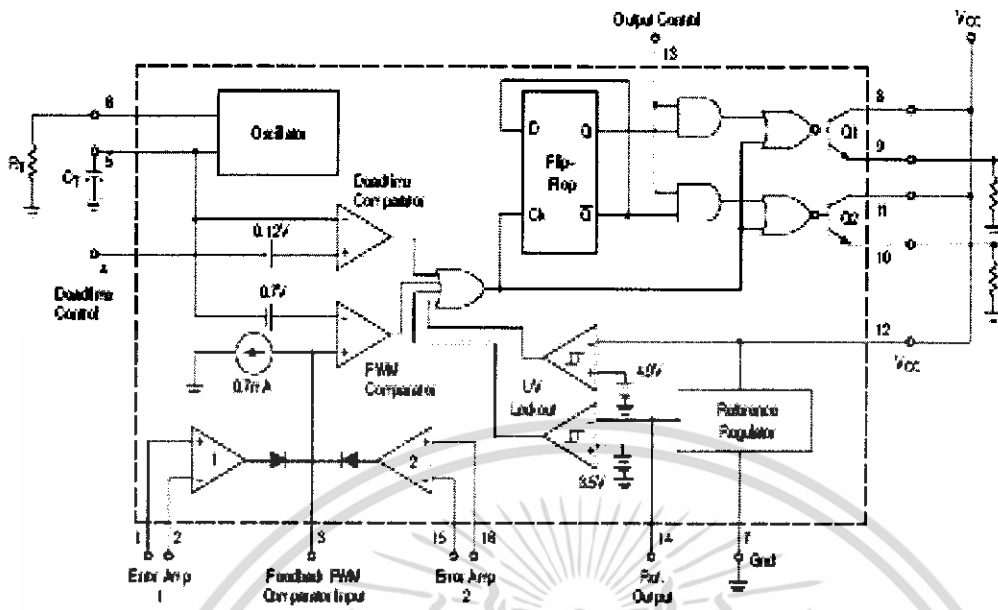
$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}}{n-1}$$

http://onsemi.com

A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, NCV494



This device contains 46 active transistors.

Figure 1. Representative Block Diagram

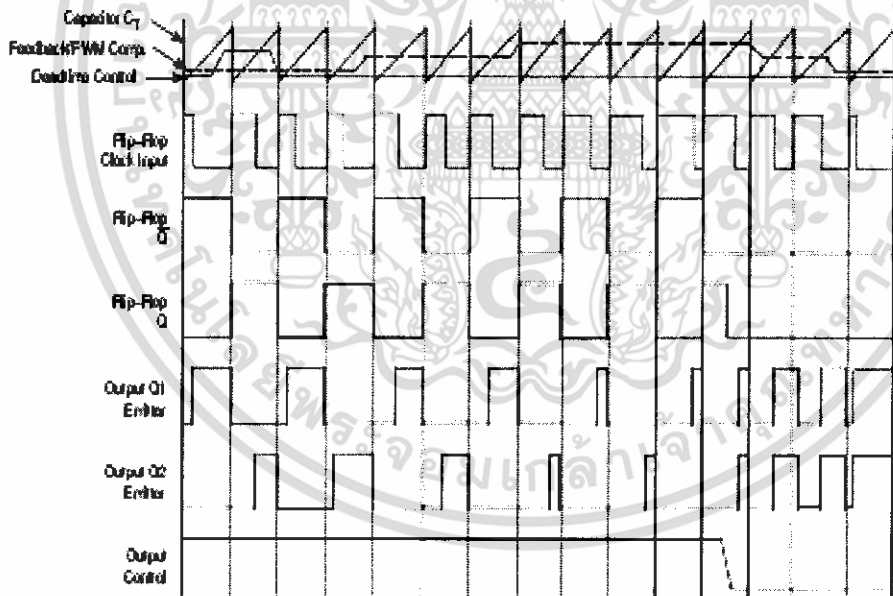


Figure 2. Timing Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, NCV494

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:

$$f_{osc} \approx \frac{1}{R_T \cdot C_T}$$

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 45% 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	$\frac{V_{out}}{V_{ref}} =$
Grounded	Single-ended PWM @ Q1 and Q2	1/2
@ V _{ref}	Push-pull Operator	3/2

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifier 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 -0.5 V to ($V_{CC} - 1V$), 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 drives can also be taken from Q1 or Q2, when single-ended operation with a maximum cut-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 $\pm 2.0\%$ with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0° to 50°C.

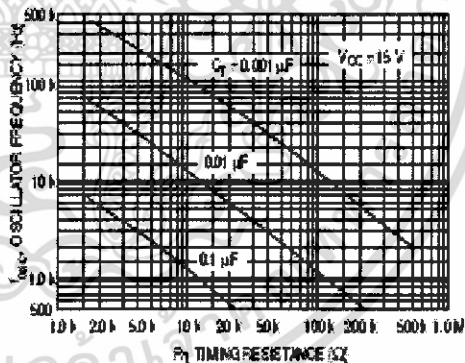


Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance

TL494, NCV494

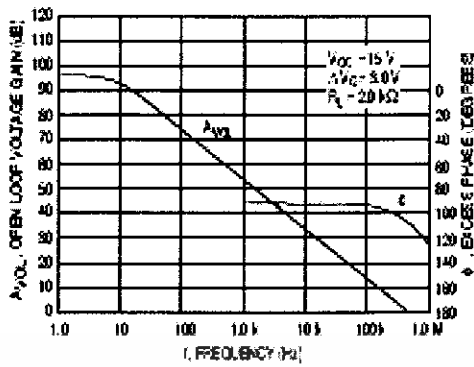


Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

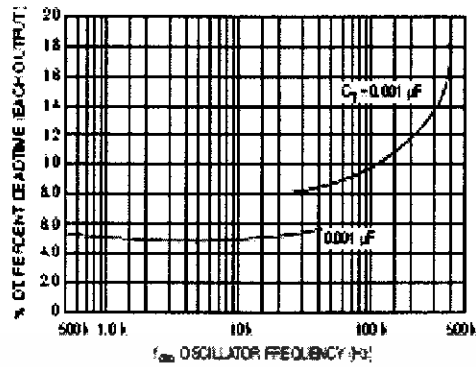


Figure 6. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

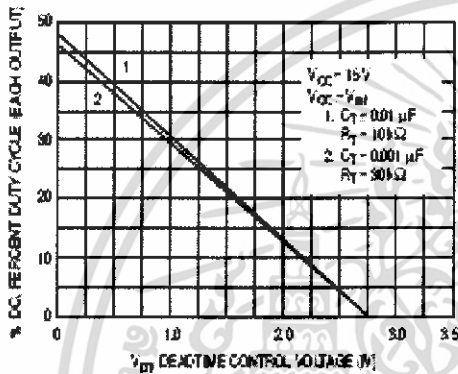


Figure 8. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

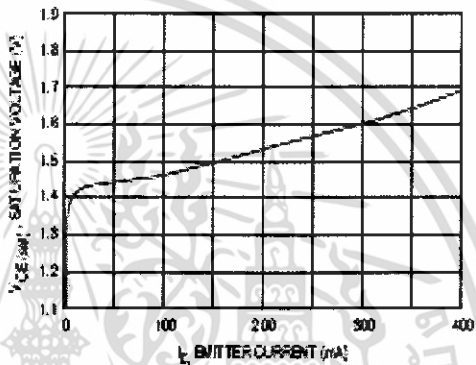


Figure 7. Emitter-Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

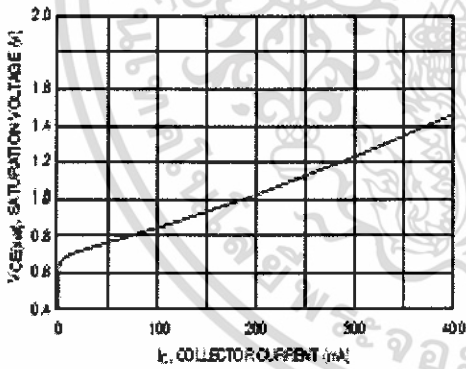


Figure 8. Common-Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

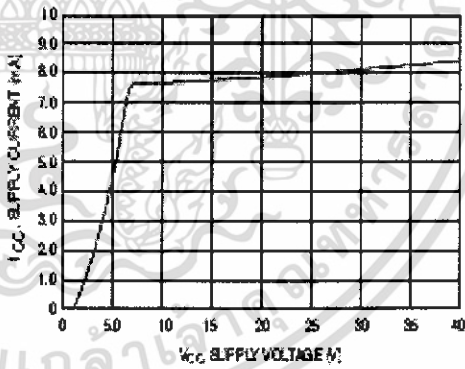


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, NCV494

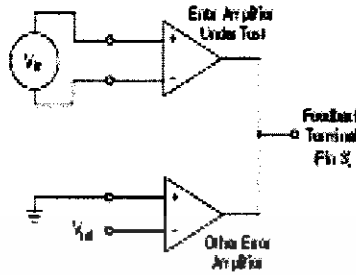


Figure 10. Error-Amplifier Characteristics

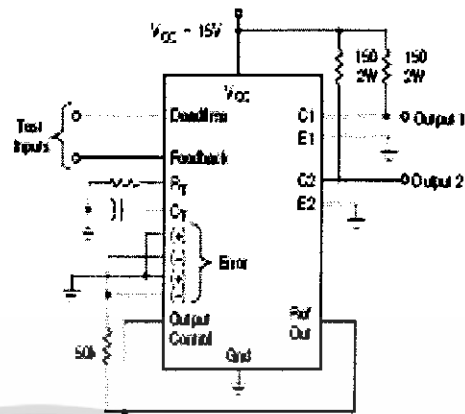


Figure 11. Deadtime and Feedback Control Circuit

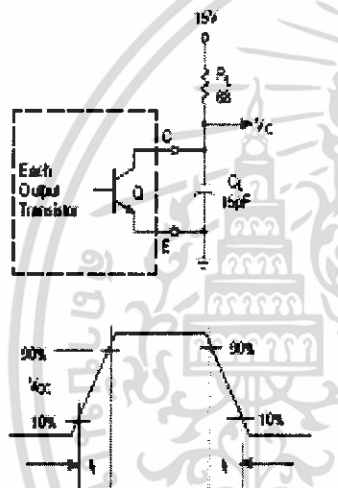


Figure 12. Common-Emitter Configuration Test Circuit and Waveform

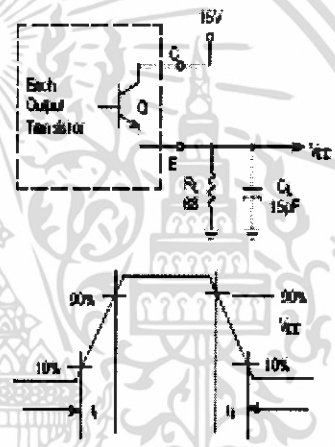


Figure 13. Emitter-Follower Configuration Test Circuit and Waveform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, NCV494

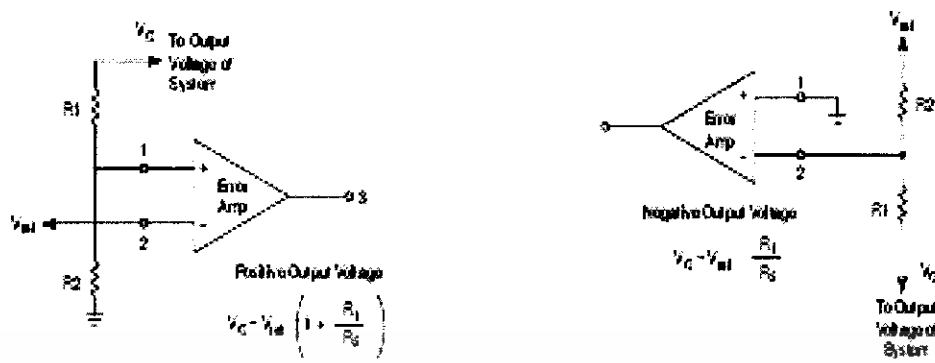


Figure 14. Error-Amplifier Sensing Techniques

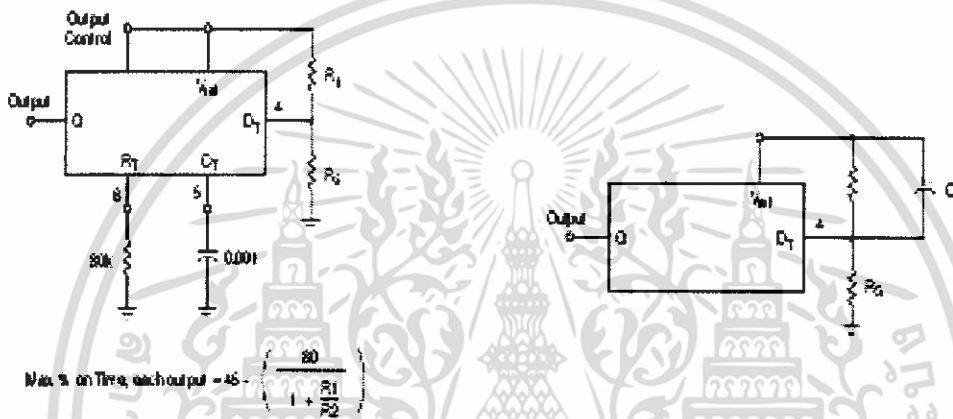


Figure 15. Deadtime Control Circuit

Figure 16. Soft-Start Circuit

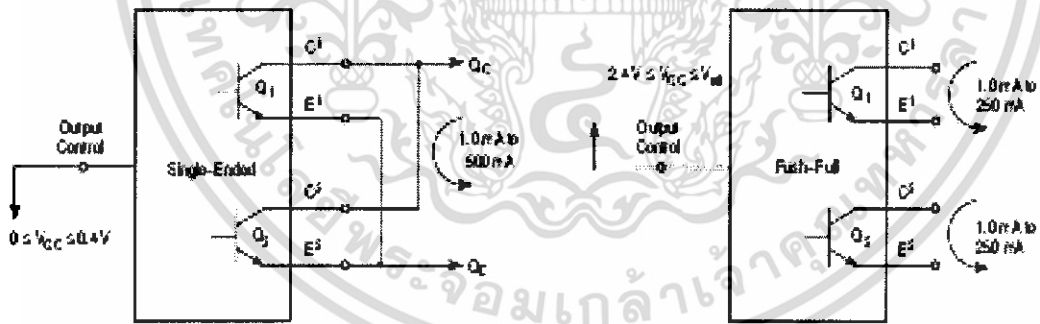


Figure 17. Output Connections for Single-Ended and Push-Pull Configurations

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, NCV494

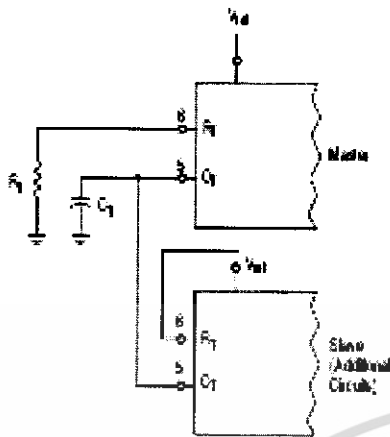


Figure 18. Slaving Two or More Control Circuits

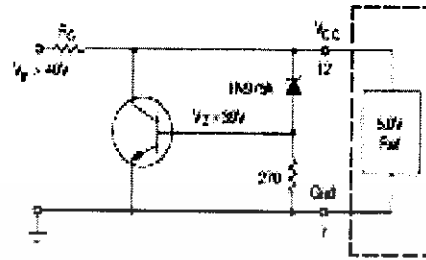


Figure 19. Operation with $V_{ref} > 4.0V$ Using External Zener

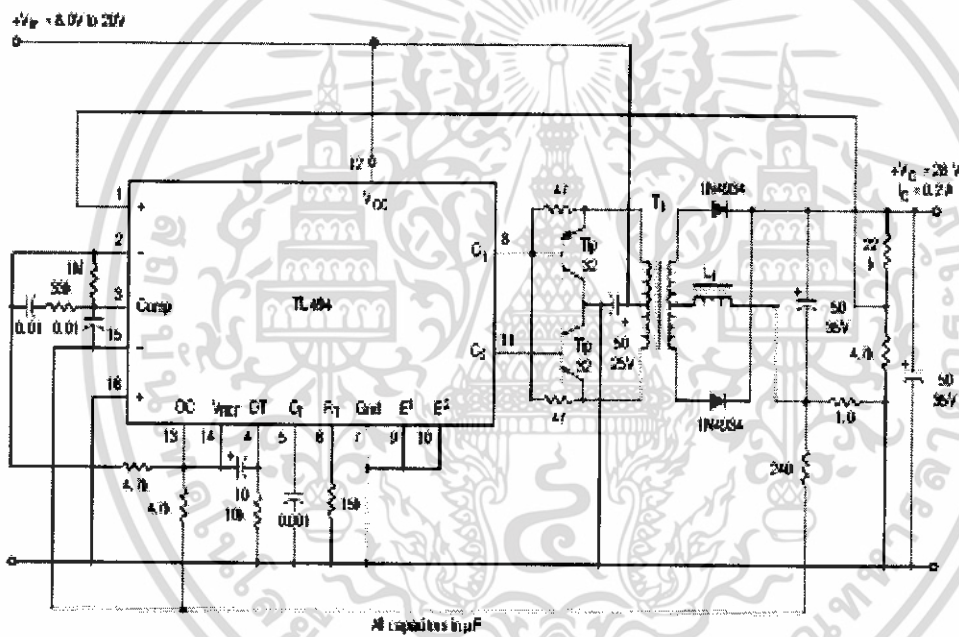


Figure 20. Pulse Width Modulated Push-Pull Converter

Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 10V$ to $40V$	14 mV (0.05%)
Load Regulation	$V_{in} = 28V$, $I_o = 1.0mA$ to $1.0A$	1.0 mV (0.005%)
Output Ripple	$V_{in} = 28V$, $I_o = 1.0A$	55 mV p-p P.A.R.D
Short Circuit Current	$V_{in} = 28V$, $R_L = 0.1\Omega$	1.5A
Efficiency	$V_{in} = 28V$, $I_o = 1.0A$	71%

L1 - 3.5mH @ 0.5A
 T1 - Primary 20T C.T. #28AWG
 Secondary 120T C.T. #36AWG
 Core: Ferrite 140P-100-50B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, NCV494

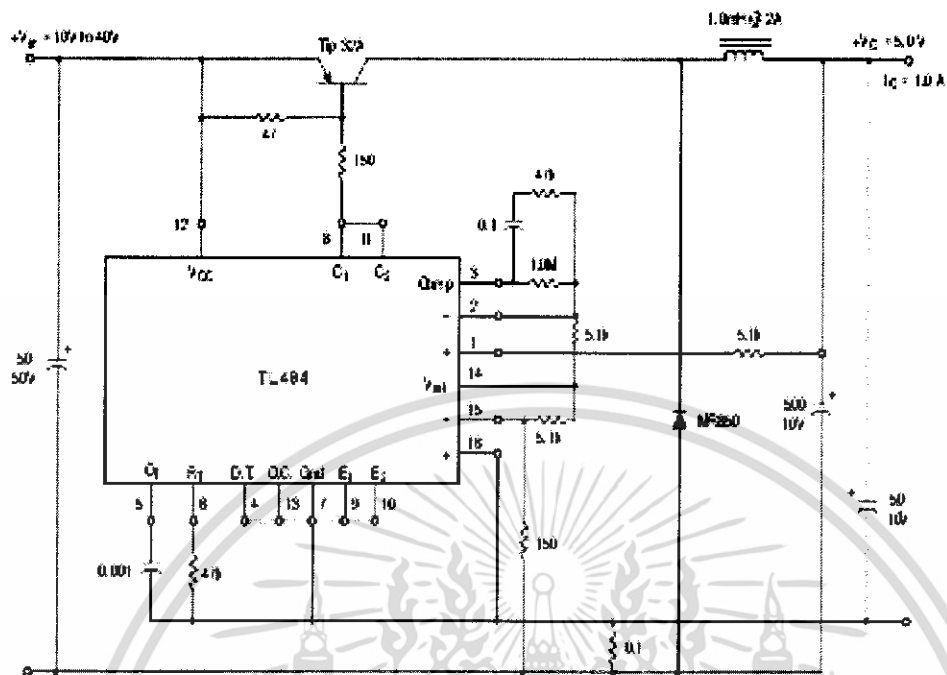


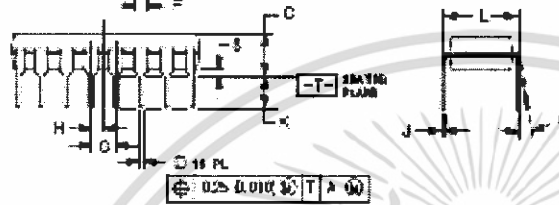
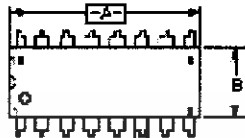
Figure 21. Pulse Width Modulated Step-Down Converter

Test	Conditions	Results
Line Regulator	$V_{in} = 9\text{ V to }40\text{ V}$	$50\text{ mV } 0.01\%$
Load Regulator	$V_{in} = 12.6\text{ V, } I_o = 0.2\text{ mA to }200\text{ mA}$	$50\text{ mV } 0.02\%$
Output Ripple	$V_{in} = 12.6\text{ V, } I_o = 200\text{ mA}$	40 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 12.6\text{ V, } R_L = 0\text{ }\Omega$	350 mA
Efficiency	$V_{in} = 12.6\text{ V, } I_o = 200\text{ mA}$	72%

TL494, NCV494

PACKAGE DIMENSIONS

PDIP-18
N BUFF-X
CASE 648-06
ISSUE R

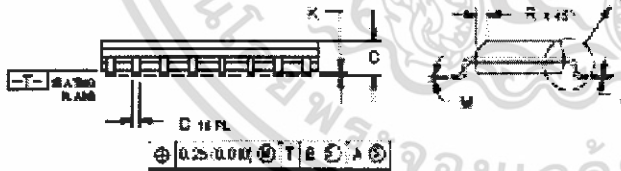
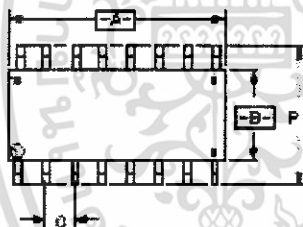


NOTE:

1. DIMENSIONS AND TOLERANCES FOR ALL TYPICALS
2. CASE PULLING DIMENSION IS MAXIMUM
3. DIMENSIONS A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, AB, AC, AD, AE, AF, AG, AH, AI, AJ, AK, AL, AM, AN, AO, AP, AQ, AR, AS, AT, AU, AV, AW, AX, AY, AZ, BA, BB, BC, BD, BE, BF, BG, BH, BI, BJ, BK, BL, BM, BN, BO, BP, BQ, BR, BS, BT, BU, BV, BW, BX, BY, BZ, CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, CH, CI, CJ, CK, CL, CM, CN, CO, CP, CQ, CR, CS, CT, CU, CV, CW, CX, CY, CZ, DA, DB, DC, DD, DE, DF, DG, DH, DI, DJ, DK, DL, DM, DN, DO, DP, DQ, DR, DS, DT, DU, DV, DW, DX, DY, DZ, EA, EB, EC, ED, EE, EF, EG, EH, EI, EJ, EK, EL, EM, EN, EO, EP, EQ, ER, ES, ET, EU, EV, EW, EX, EY, EZ, FA, FB, FC, FD, FE, FF, FG, FH, FI, FJ, FK, FL, FM, FN, FO, FP, FQ, FR, FS, FT, FU, FV, FW, FX, FY, FZ, GA, GB, GC, GD, GE, GF, GG, GH, GI, GJ, GK, GL, GM, GN, GO, GP, GQ, GR, GS, GT, GU, GV, GW, GX, GY, GZ, HA, HB, HC, HD, HE, HF, HG, HH, HI, HJ, HK, HL, HM, HN, HO, HP, HQ, HR, HS, HT, HU, HV, HW, HX, HY, HZ, IA, IB, IC, ID, IE, IF, IG, IH, II, IJ, IK, IL, IM, IN, IO, IP, IQ, IR, IS, IT, IU, IV, IW, IX, IY, IZ, JA, JB, JC, JD, JE, JF, JG, JH, JI, JJ, JK, JL, JM, JN, JO, JP, JQ, JR, JS, JT, JU, JV, JW, JX, JY, JZ, KA, KB, KC, KD, KE, KF, KG, KH, KI, KJ, KK, KL, KM, KN, KO, KP, KQ, KR, KS, KT, KU, KV, KW, KX, KY, KZ, LA, LB, LC, LD, LE, LF, LG, LH, LI, LJ, LK, LL, LM, LN, LO, LP, LQ, LR, LS, LT, LU, LV, LW, LX, LY, LZ, MA, MB, MC, MD, ME, MF, MG, MH, MI, MJ, MK, ML, MM, MN, MO, MP, MQ, MR, MS, MT, MU, MV, MW, MX, MY, MZ, NA, NB, NC, ND, NE, NF, NG, NH, NI, NJ, NK, NL, NM, NN, NO, NP, NQ, NR, NS, NT, NU, NV, NW, NX, NY, NZ, OA, OB, OC, OD, OE, OF, OG, OH, OI, OJ, OK, OL, OM, ON, OO, OP, OQ, OR, OS, OT, OU, OV, OW, OX, OY, OZ, PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG, PH, PI, PJ, PK, PL, PM, PN, PO, PP, PQ, PR, PS, PT, PU, PV, PW, PX, PY, PZ, QA, QB, QC, QD, QE, QF, QG, QH, QI, QJ, QK, QL, QM, QN, QO, QP, QQ, QR, QS, QT, QU, QV, QW, QX, QY, QZ, RA, RB, RC, RD, RE, RF, RG, RH, RI, RJ, RK, RL, RM, RN, RO, RP, RQ, RR, RS, RT, RU, RV, RW, RX, RY, RZ, SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SI, SJ, SK, SL, SM, SN, SO, SP, SQ, SR, SS, ST, SU, SV, SW, SX, SY, SZ, TA, TB, TC, TD, TE, TF, TG, TH, TI, TJ, TK, TL, TM, TN, TO, TP, TQ, TR, TS, TT, TU, TV, TW, TX, TY, TZ, UA, UB, UC, UD, UE, UF, UG, UH, UI, UJ, UK, UL, UM, UN, UO, UP, UQ, UR, US, UT, UY, UZ, VA, VB, VC, VD, VE, VF, VG, VH, VI, VJ, VK, VL, VM, VN, VO, VP, VQ, VR, VS, VT, VU, VV, VW, VX, VY, VZ, WA, WB, WC, WD, WE, WF, WG, WH, WI, WJ, WK, WL, WM, WN, WO, WP, WQ, WR, WS, WT, WU, WV, WW, WX, WY, WZ, XA, XB, XC, XD, XE, XF, XG, XH, XI, XJ, XK, XL, XM, XN, XO, XP, XQ, XR, XS, XT, XU, XV, XW, XX, XY, XZ, YA, YB, YC, YD, YE, YF, YG, YH, YI, YJ, YK, YL, YM, YN, YO, YP, YQ, YR, YS, YT, YU, YV, YW, YX, YY, YZ, ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF, ZG, ZH, ZI, ZJ, ZK, ZL, ZM, ZN, ZO, ZP, ZQ, ZR, ZS, ZT, ZU, ZV, ZW, ZX, ZY, ZZ

DIM	MILS		MMS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.25	0.27	0.25	0.25
B	0.200	0.215	0.20	0.215
C	0.145	0.155	0.145	0.145
D	0.135	0.145	0.135	0.145
E	0.130	0.140	0.130	0.140
F	0.125	0.135	0.125	0.135
G	0.120	0.130	0.120	0.130
H	0.115	0.125	0.115	0.125
I	0.110	0.120	0.110	0.120
J	0.105	0.115	0.105	0.115
K	0.100	0.110	0.100	0.110
L	0.200	0.210	0.20	0.21
M	0.15	0.16	0.15	0.16
N	0.145	0.155	0.145	0.155
O	0.140	0.150	0.140	0.150
P	0.135	0.145	0.135	0.145
Q	0.130	0.140	0.130	0.140
R	0.125	0.135	0.125	0.135
S	0.120	0.130	0.120	0.130

SO-18
D BUFF-X
CASE 795-05
ISSUE J



NOTE:

1. DIMENSIONS AND TOLERANCES FOR ALL TYPICALS
2. CASE PULLING DIMENSION IS MAXIMUM
3. DIMENSIONS A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, AB, AC, AD, AE, AF, AG, AH, AI, AJ, AK, AL, AM, AN, AO, AP, AQ, AR, AS, AT, AU, AV, AW, AX, AY, AZ, BA, BB, BC, BD, BE, BF, BG, BH, BI, BJ, BK, BL, BM, BN, BO, BP, BQ, BR, BS, BT, BU, BV, BW, BX, BY, BZ, CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, CH, CI, CJ, CK, CL, CM, CN, CO, CP, CQ, CR, CS, CT, CU, CV, CW, CX, CY, CZ, DA, DB, DC, DD, DE, DF, DG, DH, DI, DJ, DK, DL, DM, DN, DO, DP, DQ, DR, DS, DT, DU, DV, DW, DX, DY, DZ, EA, EB, EC, ED, EE, EF, EG, EH, EI, EJ, EK, EL, EM, EN, EO, EP, EQ, ER, ES, ET, EU, EV, EW, EX, EY, EZ, FA, FB, FC, FD, FE, FF, FG, FH, FI, FJ, FK, FL, FM, FN, FO, FP, FQ, FR, FS, FT, FU, FV, FW, FX, FY, FZ, GA, GB, GC, GD, GE, GF, GG, GH, GI, GJ, GK, GL, GM, GN, GO, GP, GQ, GR, GS, GT, GU, GV, GW, GX, GY, GZ, HA, HB, HC, HD, HE, HF, HG, HH, HI, HJ, HK, HL, HM, HN, HO, HP, HQ, HR, HS, HT, HU, HV, HW, HX, HY, HZ, IA, IB, IC, ID, IE, IF, IG, IH, II, IJ, IK, IL, IM, IN, IO, IP, IQ, IR, IS, IT, IU, IV, IW, IX, IY, IZ, JA, JB, JC, JD, JE, JF, JG, JH, JI, JJ, JK, JL, JM, JN, JO, JP, JQ, JR, JS, JT, JU, JV, JW, JX, JY, JZ, KA, KB, KC, KD, KE, KF, KG, KH, KI, KJ, KK, KL, KM, KN, KO, KP, KQ, KR, KS, KT, KU, KV, KW, KX, KY, KZ, LA, LB, LC, LD, LE, LF, LG, LH, LI, LJ, LK, LL, LM, LN, LO, LP, LQ, LR, LS, LT, LU, LV, LW, LX, LY, LZ, MA, MB, MC, MD, ME, MF, MG, MH, MI, MJ, MK, ML, MM, MN, MO, MP, MQ, MR, MS, MT, MU, MV, MW, MX, MY, MZ, NA, NB, NC, ND, NE, NF, NG, NH, NI, NJ, NK, NL, NM, NN, NO, NP, NQ, NR, NS, NT, NU, NV, NW, NX, NY, NZ, OA, OB, OC, OD, OE, OF, OG, OH, OI, OJ, OK, OL, OM, ON, OO, OP, OQ, OR, OS, OT, OU, OV, OW, OX, OY, OZ, PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG, PH, PI, PJ, PK, PL, PM, PN, PO, PP, PQ, PR, PS, PT, PU, PV, PW, PX, PY, PZ, QA, QB, QC, QD, QE, QF, QG, QH, QI, QJ, QK, QL, QM, QN, QO, QP, QQ, QR, QS, QT, QU, QV, QW, QX, QY, QZ, RA, RB, RC, RD, RE, RF, RG, RH, RI, RJ, RK, RL, RM, RN, RO, RP, RQ, RR, RS, RT, RU, RV, RW, RX, RY, RZ, SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SI, SJ, SK, SL, SM, SN, SO, SP, SQ, SR, SS, ST, SU, SV, SW, SX, SY, SZ, TA, TB, TC, TD, TE, TF, TG, TH, TI, TJ, TK, TL, TM, TN, TO, TP, TQ, TR, TS, TT, TU, TV, TW, TX, TY, TZ, UA, UB, UC, UD, UE, UF, UG, UH, UI, UJ, UK, UL, UM, UN, UO, UP, UQ, UR, US, UT, UY, UZ, VA, VB, VC, VD, VE, VF, VG, VH, VI, VJ, VK, VL, VM, VN, VO, VP, VQ, VR, VS, VT, VU, VV, VW, VX, VY, VZ, WA, WB, WC, WD, WE, WF, WG, WH, WI, WJ, WK, WL, WM, WN, WO, WP, WQ, WR, WS, WT, WU, WV, WW, WX, WY, WZ, XA, XB, XC, XD, XE, XF, XG, XH, XI, XJ, XK, XL, XM, XN, XO, XP, XQ, XR, XS, XT, XU, XV, XW, XX, XY, XZ, YA, YB, YC, YD, YE, YF, YG, YH, YI, YJ, YK, YL, YM, YN, YO, YP, YQ, YR, YS, YT, YU, YV, YW, YX, YY, YZ, ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF, ZG, ZH, ZI, ZJ, ZK, ZL, ZM, ZN, ZO, ZP, ZQ, ZR, ZS, ZT, ZU, ZV, ZW, ZX, ZY, ZZ


DIM	MILS		MMS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.10	0.10	0.10	0.10
B	0.10	0.10	0.10	0.10
C	0.10	0.10	0.10	0.10
D	0.10	0.10	0.10	0.10
E	0.10	0.10	0.10	0.10
F	0.10	0.10	0.10	0.10
G	0.10	0.10	0.10	0.10
H	0.10	0.10	0.10	0.10
I	0.10	0.10	0.10	0.10
J	0.10	0.10	0.10	0.10
K	0.10	0.10	0.10	0.10
L	0.10	0.10	0.10	0.10
M	0.10	0.10	0.10	0.10
N	0.10	0.10	0.10	0.10
O	0.10	0.10	0.10	0.10
P	0.10	0.10	0.10	0.10
Q	0.10	0.10	0.10	0.10
R	0.10	0.10	0.10	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, NCV494



SiN100-AFICE is a trademark of Semiconductor Components Industries, LLC.

ON Semiconductor and  are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILC). SCILC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILC assume any liability for any damage or loss of any kind or for any consequences arising from the application of the products, or from the use of the information contained in this document, or from the use of the information contained in this document in any system or equipment, or from the use of the information contained in this document in any system or equipment, or from the use of the information contained in this document in any system or equipment. Typical parameters which may be provided in SCILC data sheets and/or specifications are and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including Typical, must be verified for each customer application by customer's technical experts. SCILC does not assume any liability for any damage or loss of any kind or for any consequences arising from the application of the products, or from the use of the information contained in this document, or from the use of the information contained in this document in any system or equipment, or from the use of the information contained in this document in any system or equipment. SCILC products are not designed, intended, or authorized for use in applications or systems intended for implantation into the body of any individual, or for any other application in which the failure of the SCILC product could create a situation where personal injury or death may occur. Check before purchase or use SCILC products for any such intended or unintended application. Buyer shall indemnify and hold SCILC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney's fees arising out of, or in connection with, any claim or litigation, or in connection with any such intended or unintended application. SCILC was registered regarding the design or manufacture of this part. SCILC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to applicable copyright law and it is not to be retransmitted in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

<p>LITERATURE FULFILLMENT Literature Distribution Center for ON Semiconductor P.O. Box 5168, Dallas, Texas 75217 USA Phone: 972-822-7275 or 800-368-9736 Toll Free USA/Canada Fax: 972-822-7278 or 800-368-9737 Toll Free USA/Canada Email: orderlit@onsemi.com</p>	<p>N. American Technical Support: 800-368-9736 or 972-822-7275 USA/Canada Japan: ON Semiconductor Japan Customer Focus Center 1-3-1 Kamagishi, Meguro-ku, Tokyo Japan 152-8588 Phone: 81-3-5773-3830</p>	<p>ON Semiconductor Website: http://www.onsemi.com Order Literature: http://www.onsemi.com/order For additional information, please contact your local Sales Representative</p>
--	--	--

TL494/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Infrared & Photo-IC

TLP250

Transistor Inverter
 Inverter For Air Conditioner
 IGBT Gate Drive
 Power MOS FET Gate Drive

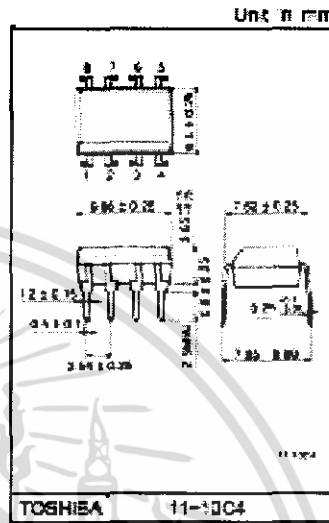
The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetection.
 This unit is 9-lead DIP package.
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: $I_{T1} \leq 4 \text{ (max.)}$
- Supply current (I_{CC}): 11 mA (max.)
- Supply voltage (V_{CC}): $10 \sim 55 \text{ V}$
- Output current (I_O): $\pm 1.5 \text{ A (max.)}$
- Switching time (t_{r1}, t_{f1}): $1.5 \mu\text{s (max.)}$
- Isolation voltage: 2500 V (min.)
- UL recognized: ULL1577, EIS No. E97349
- Option (D4) type

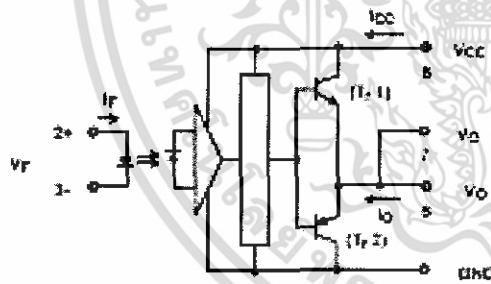
VDE approved: DIN VDE 0884-09, CE certificate No. 76925
 Maximum operating insulation voltage: 5500 V (k)
 Highest permissible over voltage: 4000 V (k)

(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

- Creepage distance: 0.4 mm (min.)
- Clearance: 0.4 mm (min.)

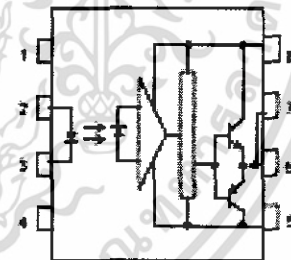


Schematic



A 0.1 μF bypass capacitor must be connected between pins 8 and 5 (See Note 5)

Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 : V_O (Output)
- 7 : V_O
- 8 : V_{CC}

Truth Table

		I_{T1}	I_{T2}
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA

TLP250

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
ULC	Forward current	I_F	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	-0.38	mA/°C	
	Peak transient forward current (Note 1)	I_{FPT}	1	A	
	Reverse voltage	V_R	5	V	
	Junction temperature	T_J	125	°C	
Collector	“H” peak output current (P _W ≤ 2.5µs, f ≤ 150kHz) (Note 2)	I_{OPEH}	-1.5	A	
	“L” peak output current (P _W ≤ 2.5µs, f ≤ 150kHz) (Note 2)	I_{OPL}	+1.5	A	
	Output voltage	(Ta ≤ 70°C)	V_O	95	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Supply voltage	(Ta ≤ 70°C)	V_{CC}	95	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_O / \Delta T_a$	-0.73	V/°C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_{CC} / \Delta T_a$	-0.73	V/°C	
	Junction temperature	T_J	125	°C	
Operating frequency (Note 3)	f	25	kHz		
Operating temperature range	T_{op}	-20-85	°C		
Storage temperature range	T_{stg}	-55-125	°C		
Lead soldering temperature (10 s)	T_{sl}	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min, RH ≤ 80%) (Note 4)	BV_{ig}	2500	Vrms		

(Note 1) Pulse width P_W ≤ 1µs, 300bps

(Note 2) Exponential waveform

(Note 3) Exponential waveform, I_{OPEH} ≤ -1.0A, ≤ 2.5µs, I_{OPL} ≤ +1.0A, ≤ 2.5µs

(Note 4) Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

(Note 5) A ceramic capacitor(0.1µF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Input current, on	I_{IOH}	7	9	10	mA
Input voltage, off	$V_{I(OFF)}$	0	—	0.8	V
Supply voltage	V_{CC}	15	—	30, 20	V
Peak output current	I_{OPEH}/I_{OPL}	—	—	±0.5	A
Operating temperature	T_{op}	-20	25	70, 85	°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA

TLP250

Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min	Typ*	Max	Unit
Input forward voltage		V _F	—	I _F = 10 mA, T _a = 25°C	—	1.8	1.6	V
Temperature coefficient of forward voltage		ΔV _F /ΔT _a	—	I _F = 10 mA	—	-2.0	—	mV/°C
Input reverse current		I _R	—	V _R = 5V, T _a = 25°C	—	—	10	μA
Input capacitance		C _T	—	V = 0, f = 1 MHz, T _a = 25°C	—	45	250	pF
Output current	"H" level	I _{OH}	3	V _{CC} = 30V V _{OL} = 4V I _F = 10 mA	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level	I _{OL}	2	V _{CC} = 30V V _{OH} = 2.5V I _F = 0	0.5	2	—	A
Output voltage	"H" level	V _{OH}	4	V _{CC} = +15V, V _{EE} = -15V R _L = 200Ω, I _F = 5mA	11	12.6	—	V
	"L" level	V _{OL}	5	V _{CC} = +15V, V _{EE} = -15V R _L = 200Ω, V _F = 0.8V	—	-14.2	-12.5	V
Supply current	"H" level	I _{OH}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA T _a = 25°C	—	7	—	mA
	"L" level	I _{CL}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 0mA T _a = 25°C	—	7.5	—	mA
		I _{CS}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 0mA	—	—	11	mA
Threshold input current	"Output L→"	I _{FLH}	—	V _{CC} = +15V, V _{EE} = -15V R _L = 200Ω, V _O = 0V	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→"	V _{FHL}	—	V _{CC} = +15V, V _{EE} = -15V R _L = 200Ω, V _O = 0V	0.8	—	—	V
Supply voltage		V _{CC}	—	—	10	—	25	V
Capacitance (input-output)		C _S	—	V _S = 0, f = 1MHz T _a = 25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance (input-output)		R _S	—	V _S = 50V, T _a = 25°C R.H. ≤ 80%	1×10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁴	—	Ω

* All typical values are at Ta = 25°C (1): Duration of I_O time ≤ 50μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

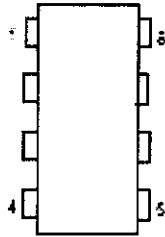
TOSHIBA**TLP250****Switching Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)**

Characteristic	Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min	Typ ¹	Max	Unit	
Propagation delay time	L→H	tpLH	I _F = 3mA V _{CC1} = +15V, V _{CC2} = -15V R _L = 200Ω	—	9.15	9.5	ns	
	H→L			tpHL	—	9.15		9.5
Output rise time	t _r	—		—	—	ns		
Output fall time	t _f	—		—	—			
Common mode transient immunity at high level output	CMIH	r		V _{CM} = 200V, I _C = 3mA V _{CC} = 20V, Ta = 25°C	-5000	—	—	V/μs
Common mode transient immunity at low level output	CML	r		V _{CM} = 500V, I _C = 0mA V _{CC} = 20V, Ta = 25°C	5000	—	—	V/μs

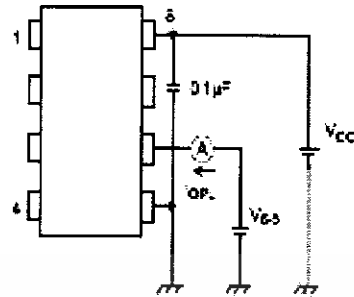
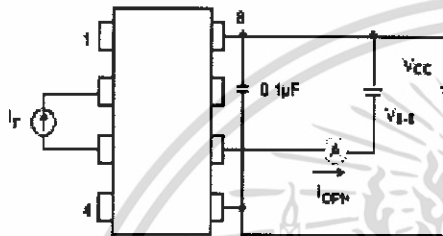
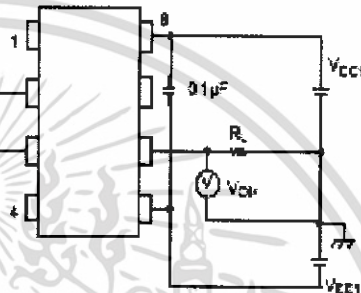
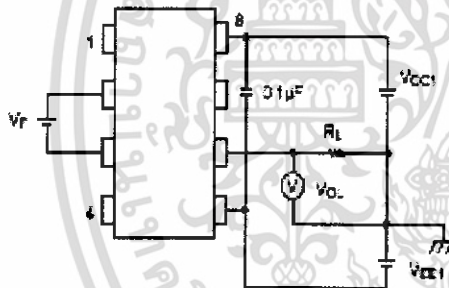
¹All typical values are at Ta = 25°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuit 1:

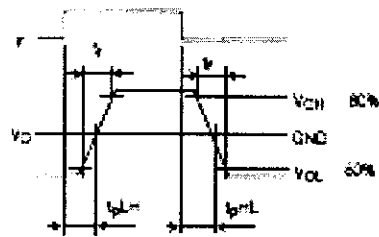
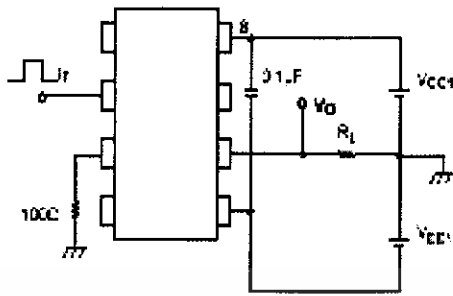


Test Circuit 2: OP.

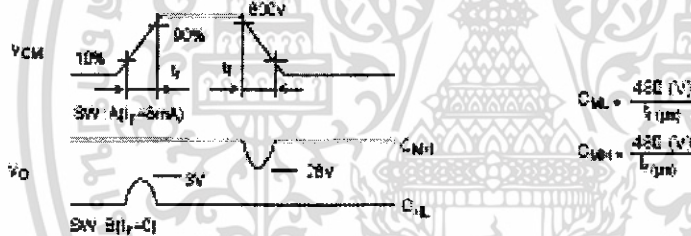
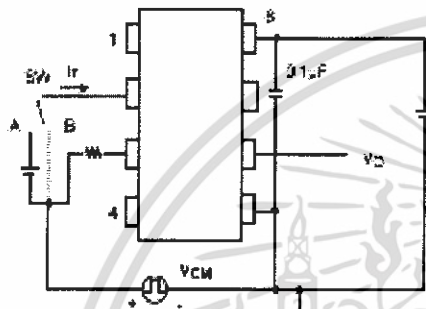
Test Circuit 3: I_{OPH}Test Circuit 4: V_{OH}Test Circuit 5: V_{OL}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuit 6 I_{OL} , I_{PH} , V_{OL}

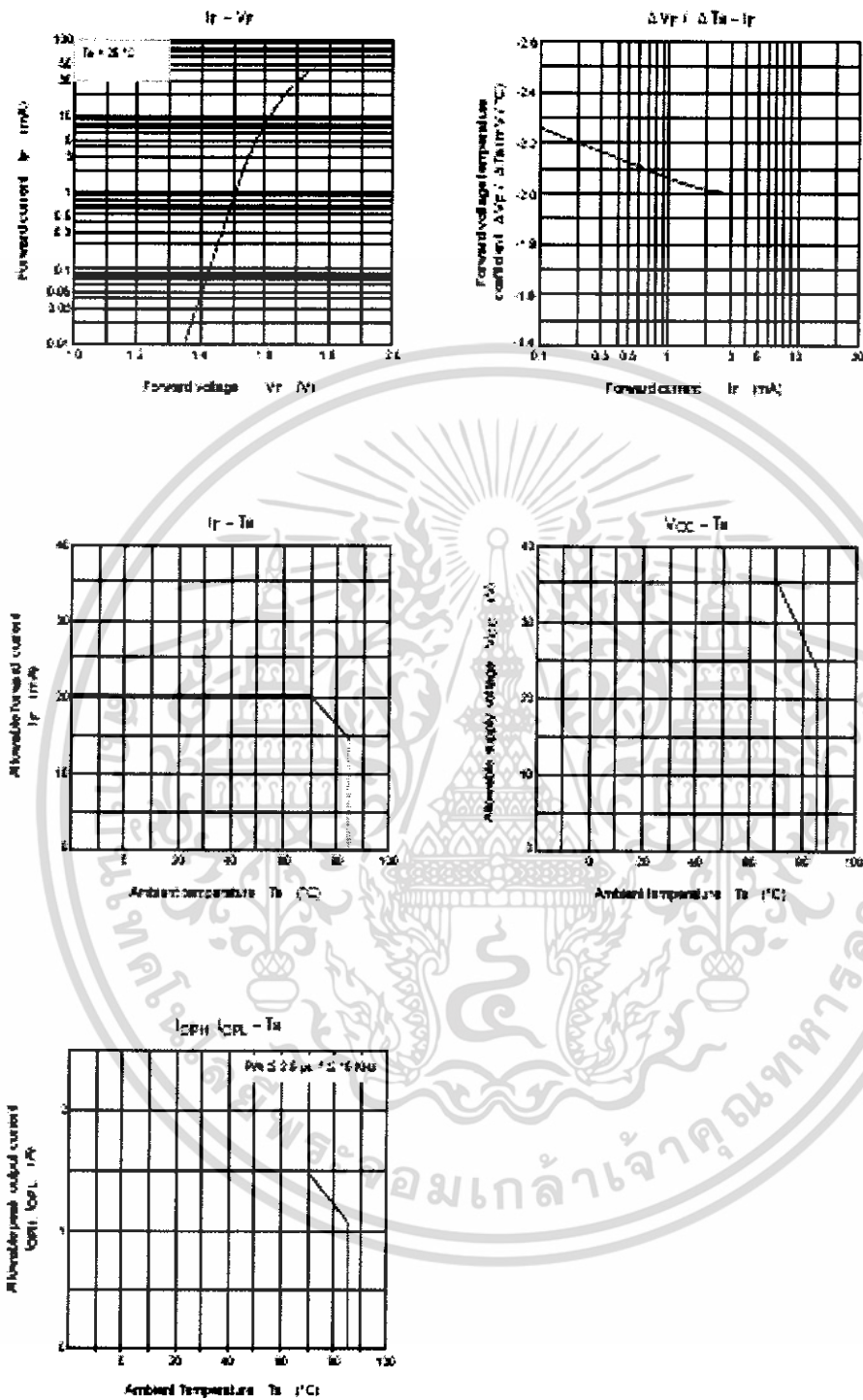


Test Circuit 7 C_{MHL} , C_{MHL}



$C_{ML}(C_{MH})$ is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



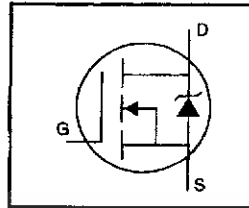
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property. In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc.
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- Gallium arsenide (GaAs) is a substance used in the products described in this document. GaAs dust and fumes are toxic. Do not break, cut or pulverize the product, or use chemicals to dissolve them. When disposing of the products, follow the appropriate regulations. Do not dispose of the products with other industrial waste or with domestic garbage.
- The products described in this document are subject to the foreign exchange and foreign trade laws.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice.

HEXFET® Power MOSFET

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



$$V_{DSS} = 500V$$

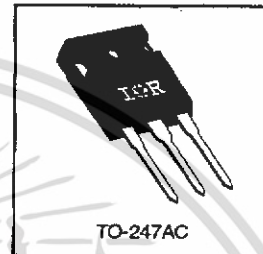
$$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$$

$$I_D = 20A$$

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 @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	20	A
I_D @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	13	
I_{DM}	80	
P_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	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)	
	10 lbf·in (1.1 N·m)	

Thermal Resistance


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

1025


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	$V_{GS}=0V, I_D=250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D=1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	$V_{GS}=10V, I_D=12A$ ①
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	13	—	—	S	$V_{DS}=50V, I_D=12A$ ②
I_{loss}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS}=500V, V_{GS}=0V$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS}=20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS}=-20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	210	nC	$I_D=20A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29	nC	$V_{DS}=400V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110	nC	$V_{GS}=10V$ See Fig. 6 and 13 ③
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	$V_{DD}=250V$
t_r	Rise Time	—	59	—	ns	$I_D=20A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	110	—	ns	$R_G=4.3\Omega$
t_f	Fall Time	—	58	—	ns	$R_D=13\Omega$ 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	—	nH	
C_{iss}	Input Capacitance	—	4200	—	pF	$V_{GS}=0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	870	—	pF	$V_{DS}=25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—	pF	$f=1.0\text{MHz}$ 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	A	
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=20A, V_{GS}=0V$ ②
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	$T_J=25^\circ\text{C}, I_F=20A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	μC	$di/dt=100A/\mu s$ ③
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) ③ $I_{SD} \leq 20A, di/dt \leq 160A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 150^\circ\text{C}$
- ② $V_{DD}=50V, \text{starting } T_J=25^\circ\text{C}, L=4.3\text{mH}, R_G=25\Omega, I_{AS}=20A$ (See Figure 12) ④ Pulse width $\leq 300\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRFP460

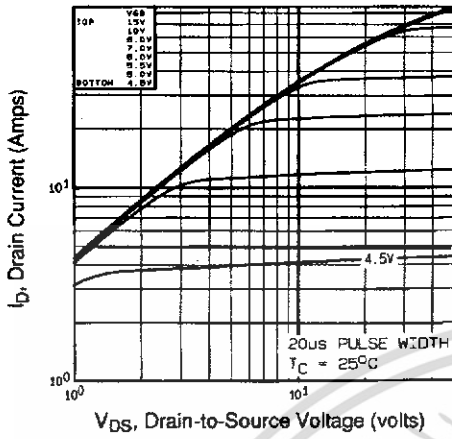


Fig 1. Typical Output Characteristics, $T_C=25^\circ\text{C}$

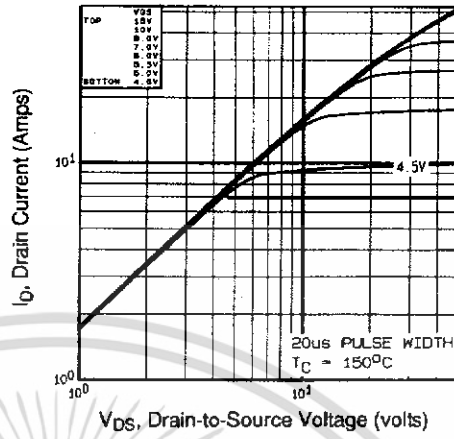


Fig 2. Typical Output Characteristics, $T_C=150^\circ\text{C}$

DATA SHEETS

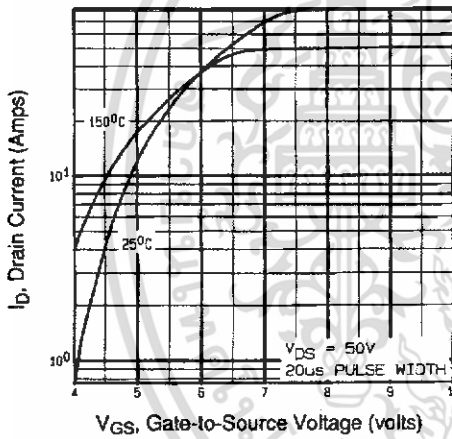


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

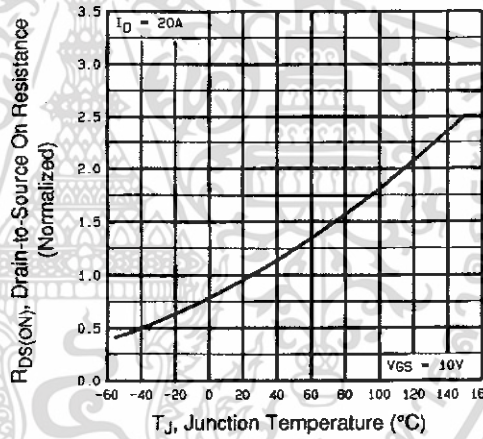


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

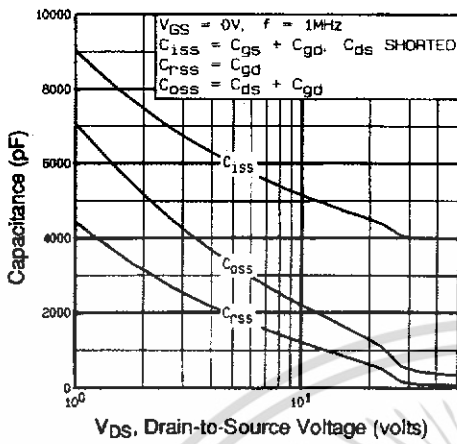


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

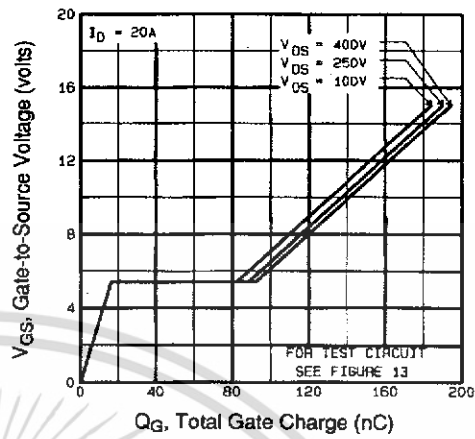


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

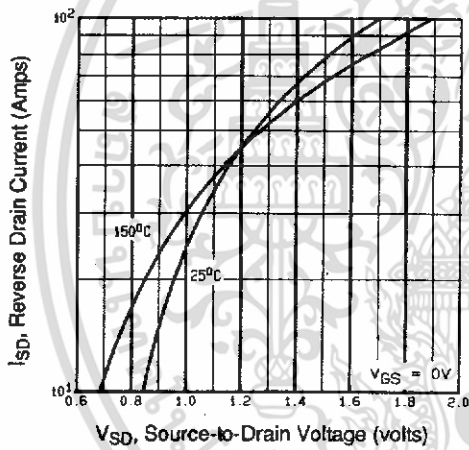


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

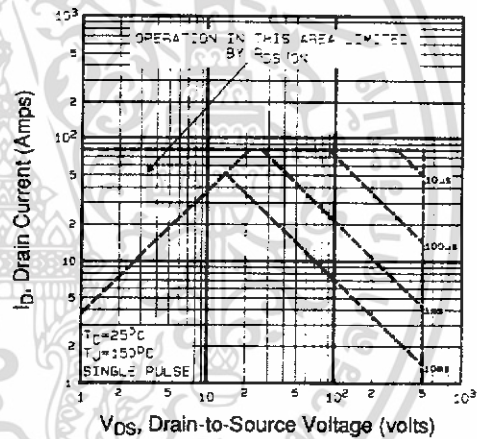


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRFP460

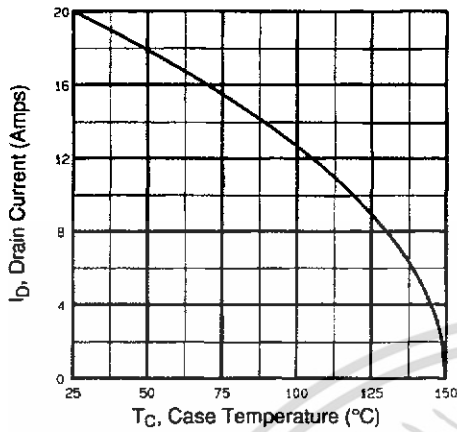


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

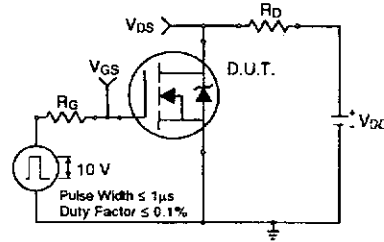


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

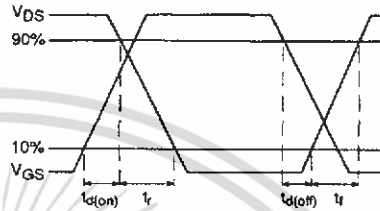


Fig 10b. Switching Time Waveforms

DATA SHEETS

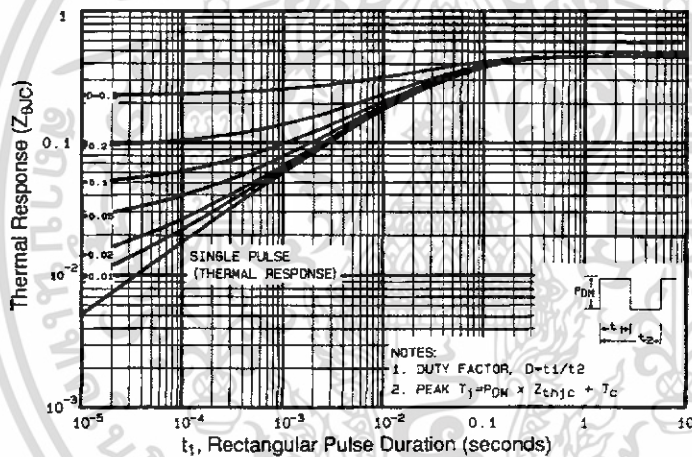


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

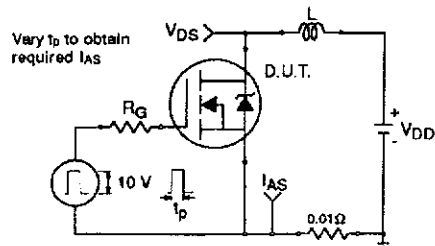


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

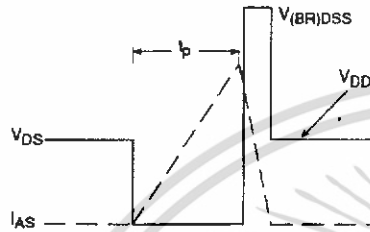


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

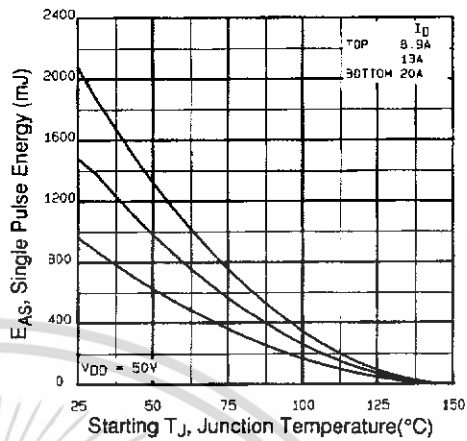


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

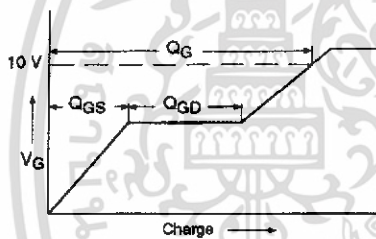


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

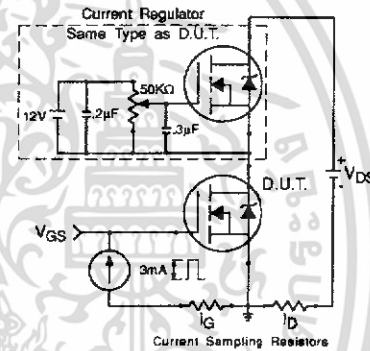


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

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
IRF Rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้