

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเต็ม  
บริดจ์

An Induction Heater Using a Full-Bridge Current-Fed Inverter

นาย เจนณรงค์ เสนามนตรี  
น.ส. เนตรนภางค์ พรหมคีรี  
นาย สมชาย ศรีพงษ์พันธุ์กุล  
นาย สุธิ อุประวรรณา

๑๐๖  
๑๖/๕๓  
๒๕๔๘

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 62374

วัน,เดือน,ปี 16 ส.ค. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์**  
**An Induction Heater Using a Full-Bridge Current-Fed Inverter**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2548


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เรื่อง เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเต็ม  
บริดจ์

An Induction Heater Using a Full-Bridge Current-Fed Inverter

ผู้จัดทำ

1. นาย เจนณรงค์ เสนามนตรี
2. น.ส. เนตรนภาวงศ์ พรหมคีรี
3. นาย สมชาย ศรีพงษ์พันธ์กุล
4. นาย สุธี อู่ประวรรณา

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์

นาย เจนณรงค์	เสนามนตรี	46015090
น.ส. เนตรนภางค์	พรหมคีรี	46015102
นาย สมชาย	ศรีพงษ์พันธุ์กุล	46015155
นาย สุธี	อุประวรรณ	46015161
รศ.ดร.วิริยะ	พิเชษฐจำเริญ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548		

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการสร้าง เครื่องให้ความร้อนแบบเหนียว นำความถี่สูง สำหรับการให้ความร้อนแก่แท่งเหล็ก โดยใช้ฟูลบริดจ์เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบขนาน ใน วงจรอินเวอร์เตอร์นี้ ใช้มอสเฟตอนุกรมกับไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ และใช้หลักการป้อนไฟฟ้า กระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ พร้อมกับการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องทางทฤษฎี โดยจะทำการ ทดสอบในช่วงความถี่ 18 กิโลเฮิรทซ์

## An Induction Heater Using a Full-Bridge Current-Fed Inverter

Jennarong Senamontree

Neatnapang Promkeeree

Somchai Sripongpankul

Suthee Ouprawanna

Assoc.Prof.Dr.Viriya Pichetchumrun Advisor

2005

### ABSTRACT

This thesis presents an analysis of high frequency induction application heating up for iron, using a full-bridge parallel resonant inverter. This inverter circuit using MOSFETs in series with diode as a switching device and become high values by the principle of DC current supply to full-bridge inverter circuit. The theoretical results of which are also verified by experiment and simulation which operates in the switching frequency range of 18 kHz.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินงานต่าง ๆ จาก รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ ที่ให้คำปรึกษาเรื่องเครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนาโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์ ซึ่งท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา คณะผู้จัดทำซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบคุณอาจารย์ยงยุทธ นารามภูรี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม อาจารย์ศักดา พรหมเหมือน,พีชธรรมจักร กงวิรัตน์ ,พีณัฐภูมิ พลชะติน ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำทุก ๆ อย่าง ไม่ว่าจะเป็นความรู้เกี่ยวกับวงจรขับ แหล่งข้อมูล โปรแกรม MATLAB รวมถึงการสร้างเครื่องทดสอบ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคน ที่ช่วยเหลือทั้งร่างกาย และแรงใจ จนชิ้นงานนี้สำเร็จลงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คณะอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้และแนวความคิดต่าง ๆ จนคณะผู้จัดทำได้เป็นวิศวกรที่ดี มีคุณภาพ ขอขอบคุณบิดา มารดา ที่ให้กำเนิด

ความรู้และประโยชน์ที่มีในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบแต่ท่านผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญรูป.....	III
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	1
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเบื้องต้น.....	3
2.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของขดเหนี่ยวนำ.....	5
2.3 ผลทางอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน.....	6
2.3.1 ค่าความร้อนจำเพาะของชิ้นงาน.....	6
2.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะตามอุณหภูมิ.....	7
2.3.3 ความซึมซาบแม่เหล็กของโลหะกับอุณหภูมิ.....	9
2.4 ขดเหนี่ยวนำและวงจรสมมูล.....	9
2.5 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์.....	14
2.5.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของโหลดเรโซแนนซ์ขนาน ที่มีต่อกระแสพัลส์สี่เหลี่ยม.....	15
2.5.2 การวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า.....	16
2.6 การทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	17
2.6.1 การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์.....	17
2.6.2 การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์.....	18
บทที่ 3 ส่วนประกอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	21
3.1 ขดเหนี่ยวนำ.....	21
3.1.1 การออกแบบขดเหนี่ยวนำ.....	21
3.1.2 พารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำและหม้อแปลง.....	22
3.2 รายละเอียดของวงจรและการออกแบบวงจรภาคกำลัง.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.3 แหล่งจ่ายกระแส.....	25
3.3.1 วงจรเรียงกระแส.....	25
3.4 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์.....	26
3.4.1 การขั้มนำมอสเฟต.....	26
3.5 อุปกรณ์สวิตช์.....	28
3.6 ภาคหม้อแปลงความถี่สูง.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	30
4.1 การจำลองการทำงาน.....	30
4.2 ผลการทดลองจากชุดทำงานจริง.....	33
บทที่ 5 บทสรุป.....	39
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูล	3
(ก) วงจรสมมูลอย่างง่ายของหม้อแปลง	3
(ข) วงจรสมมูลของขดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน	3
2.2 โครงสร้างอย่างง่ายของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	4
2.3 กราฟแสดงถึงช่วงความถี่และกำลังของการใช้งานเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	6
2.4 ความจุความร้อนของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 20°C	7
2.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะกับอุณหภูมิ	8
2.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์กับอุณหภูมิ	8
2.7 แสดงฟลักซ์แม่เหล็กที่คล่องผ่านส่วนต่าง ๆ ของขดเหนี่ยวนำและเฟสเซอร์ไดอะแกรม	9
2.8 วงจรสมมูลทางแม่เหล็กของขดเหนี่ยวนำ	11
2.9 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ	12
2.10 การเปลี่ยนวงจรอนุกรมเป็นวงจรแบบขนาน	13
2.11 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์	15
2.12 วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจร	15
2.13 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันที่โหลด	17
2.14 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ( $\xi < 1$ )	18
2.15 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและอุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ( $\xi < 1$ )	19
3.1 ขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบและสร้าง	22
3.2 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ	22
3.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	23
3.4 วงจรสมมูลของขดเหนี่ยวนำและหม้อแปลงไฟฟ้า	23
3.5 วงจรสมมูลในลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์ขนาน	24
3.6 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการวิจัย	25
3.7 วงจรขับสวิตช์	27
3.8 ตำแหน่งการต่อวงจรขับ	27
3.9 วิธีการสร้างสัญญาณให้มีการเหลื่อมคลื่น	28
3.10 ลักษณะของสัญญาณขับนำไอจีบีทีทั้งสองคู่	28
3.11 กระแสกับแรงดันที่ตัวสวิตช์	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.12	หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงใช้แกนเหล็กเฟอร์ไรต์	29
4.1	วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส เต็มบริดจ์โหลดกระแสนำหน้าแรงดันไฟฟ้า	30
4.2	รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด	30
4.3	แสดงรูปคลื่นของแรงดันที่ได้จากวงจรขับ	31
4.4	วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส เต็มบริดจ์โหลดกระแสล่าหลังแรงดันไฟฟ้า	31
4.5	รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด	32
4.6	วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส เต็มบริดจ์โหลดกระแสอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้า	32
4.7	รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด	33
4.8	รูปคลื่นของสัญญาณที่ได้จาก IC TL494	33
4.9	รูปคลื่นของสัญญาณที่ผ่าน IC CD4009	34
4.10	รูปคลื่นของสัญญาณที่ผ่าน TLP250	34
4.11	รูปคลื่นของสัญญาณที่นำไปขับ	35
4.12	เปรียบเทียบรูปคลื่นของสัญญาณที่นำไปขับให้เห็นว่าเกิด Overlap กัน	35
4.13	รูปคลื่นของกระแสที่โหลด	36
4.14	รูปคลื่นของกระแสที่โหลด	36
4.15	รูปคลื่นของแรงดันที่โหลด	37
4.16	รูปคลื่นของแรงดันที่โหลด	37
4.17	รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในงานชุบแข็งแบบให้ความร้อนกับโลหะโดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้จะก่อให้เกิดปัญหาขึ้น 3 ประการคือ 1. ในด้านมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม 2. ความปลอดภัย 3. ความร้อนไม่ทั่วถึง แต่การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์จะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม มีความปลอดภัย และให้ความร้อนได้ทั่วถึง

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อนมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น แบบแหล่งจ่ายแรงดันครึ่งบริดจ์, แบบแหล่งจ่ายแรงดันเต็มบริดจ์, แบบแหล่งจ่ายกระแสครึ่งบริดจ์ และแบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์ ฯลฯ สำหรับโครงการนี้ใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์ ซึ่งมีข้อดีคือ ระบบมีความเชื่อถือได้สูง ระบบมีการป้องกันการเกิดกระแสสูงในขณะเกิดการลัดวงจร และในสภาวะไม่มีชิ้นงานไม่ทำให้เกิดกระแสสูงเนื่องจากถูกจำกัดที่แหล่งจ่ายกระแส

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อนำความรู้ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้ในงานจริง
2. เพื่อศึกษาหลักการทั่วไปของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง
3. เพื่อศึกษาหลักการของเรโซแนนอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสความถี่สูง
4. เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบ

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ออกแบบและสร้างเรโซแนนอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบเต็มบริดจ์ความถี่สูง
2. นำเครื่องต้นแบบไปจ่ายโหลดได้
3. ทดสอบสมรรถภาพเครื่องต้นแบบที่ความถี่ต่างๆ

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์
2. ทำการสร้างชุดทดลองเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์
3. ทดสอบเพื่อปรับปรุงระบบให้ได้ตามวัตถุประสงค์
4. เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลให้สอดคล้องกับทฤษฎี
5. จัดทำรูปเล่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

สามารถนำเครื่องต้นแบบไปพัฒนาในโรงงานอุตสาหกรรมได้และเพื่อการศึกษา รวมทั้งการพัฒนาการใช้อินเทอร์เน็ตแบบเต็มบริดจ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเบื้องต้น

หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสามารถอธิบายได้ชัดเจนโดยเปรียบเทียบกับหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1 (ก) ซึ่งประกอบไปด้วยขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (primary and secondary winding) โดยขดเหนี่ยวนำเปรียบเสมือนขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง และชิ้นงานก็เปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิ 1 รอบที่ลัดวงจรไว้ โดย  $I_p$  เป็นกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ  $I_s$  เป็นกระแสที่ไหลในชิ้นงาน ดังวงจรสมมูลในรูปที่ 2.1 (ข)

ดังนั้นกำลังที่ชิ้นงาน

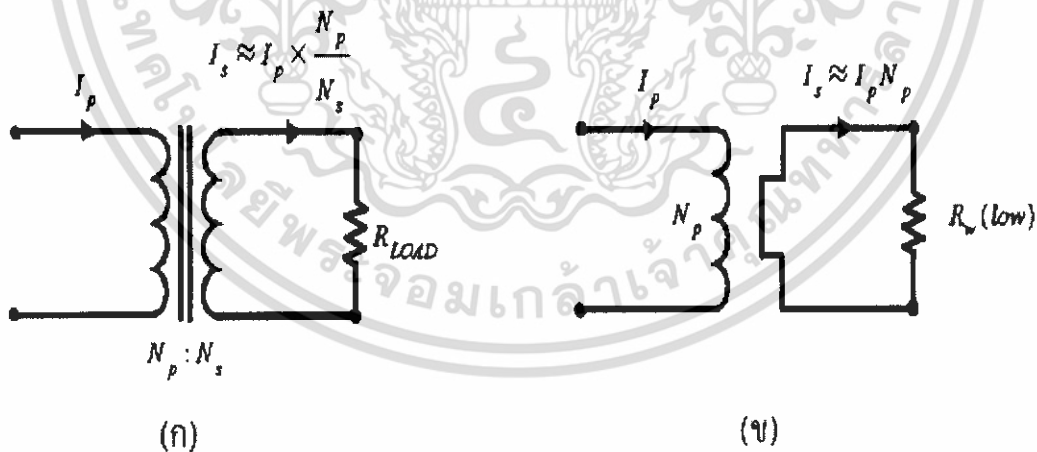
$$P_w = I_s^2 R_w \tag{2.1}$$

แทนค่า  $I_s = I_p N_p$  จะได้  $P_w = I_p^2 N_p^2 R_w$

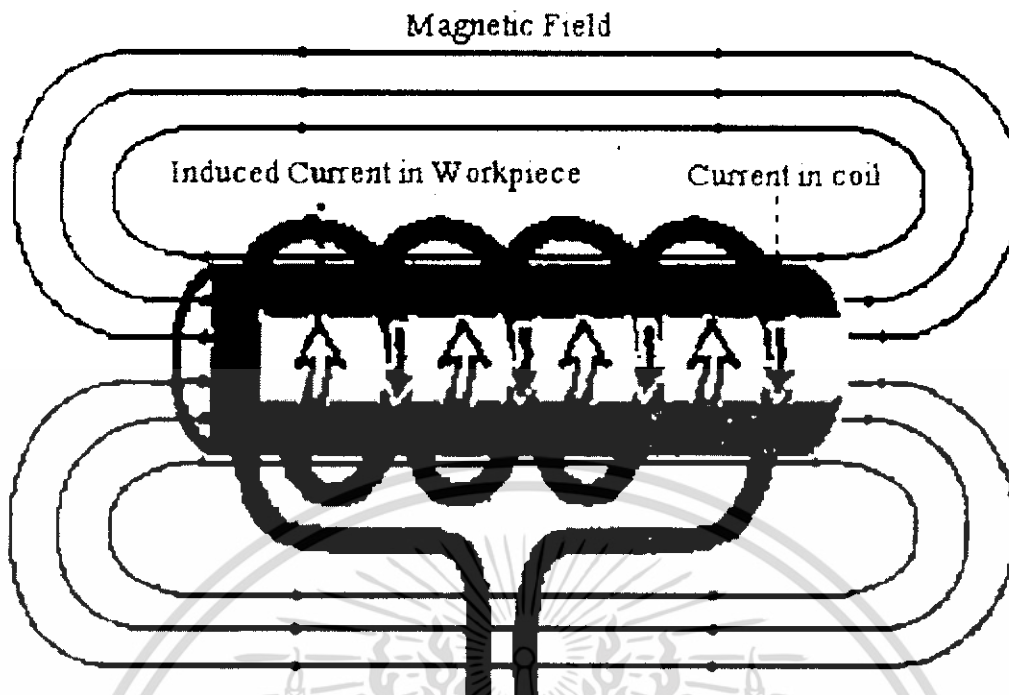
โดย

$P_w$  คือ กำลังที่ชิ้นงาน (W)

$R_w$  คือ ความต้านทานสมมูลของชิ้นงาน ( $\Omega$ )



**รูปที่ 2.1** (ก) วงจรสมมูลอย่างง่ายของหม้อแปลง (ข) วงจรสมมูลของขดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างอย่างง่ายของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ลักษณะโครงสร้างของระบบการให้ความร้อนเหนี่ยวนำได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 เมื่อขดเหนี่ยวนำได้รับไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับคล่องผ่านชิ้นงานทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างกระแสไหลวนที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานได้ และเนื่องจากกระแสที่ป้อนให้กับขดเหนี่ยวนำมีปริมาณที่สูงมาก จึงต้องมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำภายในขดเหนี่ยวนำเพื่อลดกำลังสูญเสียที่ขดลวดเหนี่ยวนำ

ในหลักการดังกล่าวกระแสไหลวนจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่บริเวณผิวของชิ้นงาน เนื่องจากผลของปรากฏการณ์พื้นผิว (Skin Effect) และความหนาแน่นของกระแสลดลงมาเป็นประมาณ 0.368 เท่าของค่าความหนาแน่นกระแสที่ผิวของชิ้นงานที่ค่าความลึกผิว (Skin Depth) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.2

$$\text{Skin Depth, } \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} \quad (2.2)$$

โดย

$\delta$  คือ ความลึกผิว (m)

$\rho$  คือ ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน ( $\Omega\text{m}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\mu$  คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน (H/m)

$f$  คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับ (Hz)

จากสมการที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าค่าความลึกผิวขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของกระแสไฟสลับที่จ่ายให้ขดลวดเหนี่ยวนำ, ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability), และความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) ของชิ้นงาน

## 2.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของขดเหนี่ยวนำ

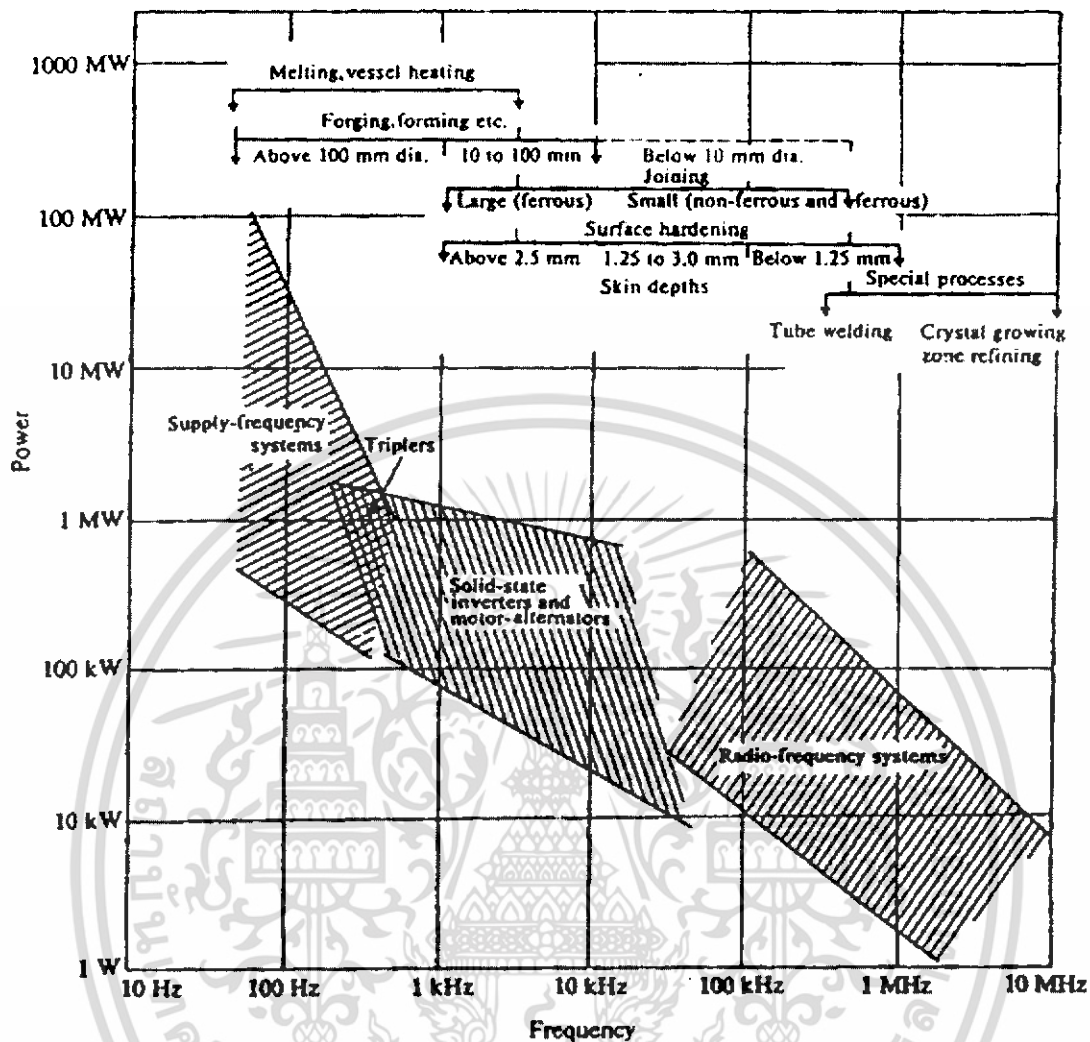
ในทางปฏิบัติลักษณะงานที่แตกต่างกันก็มีความต้องการค่าความลึกผิวและกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เช่น การชุบแข็งที่ผิวชิ้นงานจะต้องการค่าความลึกผิวที่ต่ำจึงต้องใช้ความถี่สูง ทำให้มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่สูง

จากรูปที่ 2.3 แสดงช่วงความถี่การทำงาน และระดับกำลังออกของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแต่ละแบบ โดยขึ้นกับแหล่งกำเนิดไฟสลับที่จ่ายให้กับเครื่องและยังขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร รวมทั้งแสดงความถี่การประยุกต์ใช้งานในแต่ละช่วงด้วยระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ในปัจจุบันจำแนกได้ดังนี้

1. แหล่งจ่ายกำลังจากการไฟฟ้าโดยตรง เป็นระบบที่ใช้ความถี่จากสายส่งโดยตรง (50 to 60 Hz) แรงดันไฟฟ้ามีความถี่ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ค่าความลึกผิวในการให้ความร้อนมีค่ามากโดยค่าความลึกผิวจะมีค่าสูงตั้งแต่ 10 ถึง 100 มิลลิเมตร เครื่องให้ความร้อนแบบนี้นิยมใช้งานหลอมโลหะ มีระดับกำลังที่สูงเป็นหลายเมกะวัตต์

2. แหล่งจ่ายกำลังจากระบบวงจรแปลงผันที่ใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยมีการจัดวงจรได้หลายลักษณะ ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้ เอสซีอาร์ ทรานซิสเตอร์กำลัง และมอสเฟตกำลัง เป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยมีย่านความถี่ตั้งแต่ 500 Hz ถึง 50 kHz การใช้งานมีหลายลักษณะ เช่น ที่ความถี่ต่ำมักจะเป็นงานหลอมโลหะ ความถี่ปานกลางสำหรับงานทอบขึ้นรูปโลหะ ความถี่สูงสำหรับงานชุบแข็งผิว เป็นต้น

3. แหล่งจ่ายกำลังย่านความถี่วิทยุ (50 kHz ถึง 10 MHz) สำหรับความถี่ไม่เกิน 100 kHz ยังสามารถใช้พวกมอสเฟตกำลังได้ แต่ที่ความถี่สูงมาก ๆ นิยมใช้หลอดสุญญากาศ เพราะสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำยังมีสมรรถนะในการใช้งานที่ความถี่สูงไม่เพียงพอ โดยค่าความลึกผิวมีค่า 0.1-2 มิลลิเมตร เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ จะให้กำลังค่อนข้างต่ำในหลายสิบกิโลวัตต์ เนื่อง จากทำงานในย่านความถี่สูง เหมาะที่จะใช้ในงานเชื่อมประสานและการชุบแข็งผิว

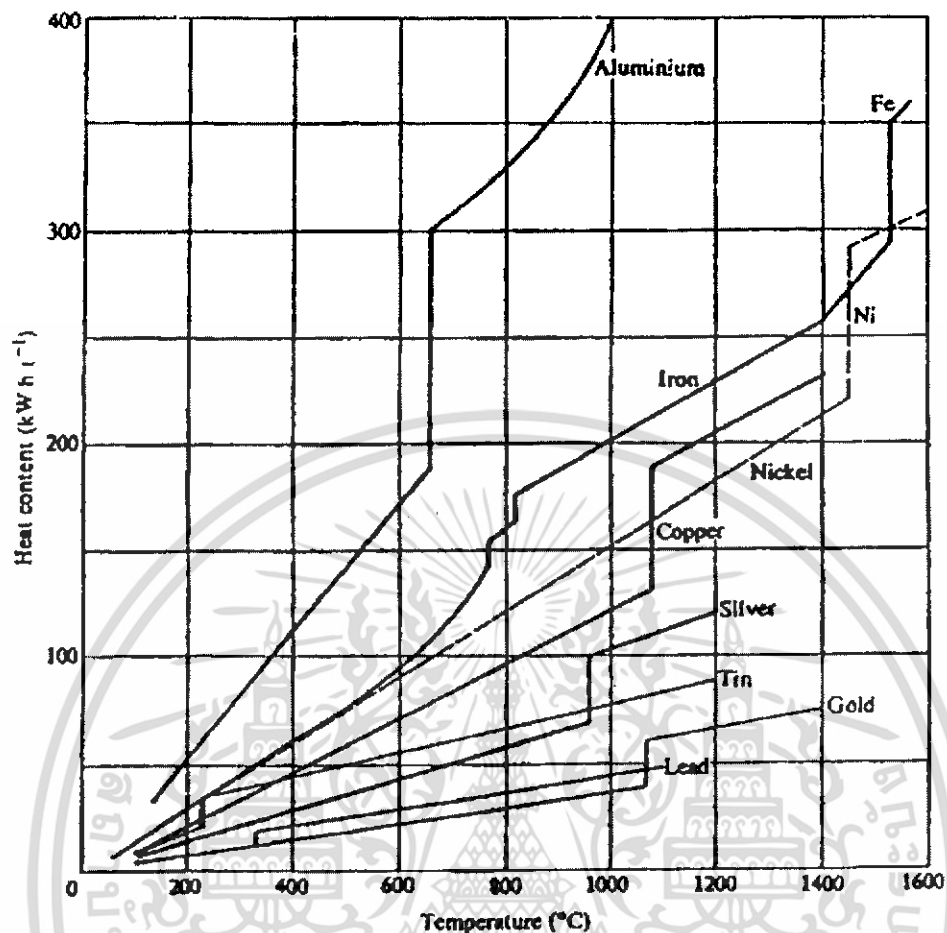


รูปที่ 2.3 กราฟแสดงถึงช่วงความถี่และกำลังของการใช้งานเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

## 2.3 ผลทางอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน

**2.3.1 ค่าความร้อนจำเพาะของชิ้นงาน** ในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจำเป็นต้องมีพลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิตามที่ต้องการ โดยพลังงานจำนวนนั้นสามารถคำนวณได้จากค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat,  $c$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็น watt-seconds per kilogram per kelvin แต่ในทางปฏิบัตินิยมใช้ค่าความจุความร้อน (Heat Content) ซึ่งมีหน่วยเป็น kilowatt-hours per tone สำหรับการคำนวณ เมื่อพิจารณาจากค่าความจุความร้อนจะเห็นว่าพลังงานที่ต้องการในการให้ความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการนั้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของชิ้นงาน ชนิดของวัสดุ และระยะเวลาที่ต้องการ ค่าความจุความร้อนของวัสดุต่างๆ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ความจุความร้อนของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 20°C

**2.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะตามอุณหภูมิ** เมื่ออุณหภูมิของโลหะมีค่าสูงขึ้น ค่าความต้านทานจำเพาะจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิโดยโลหะส่วนใหญ่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นเชิงเส้นในช่วงหนึ่ง ดังนี้

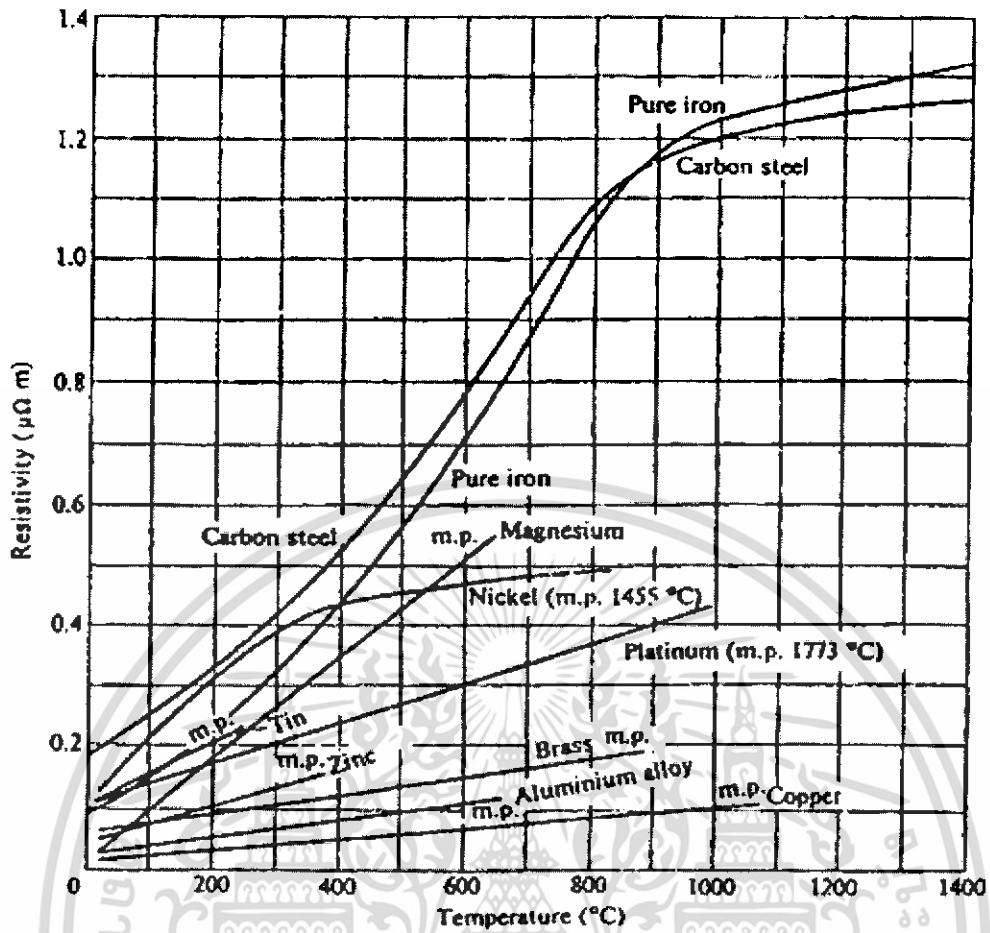
$$\rho_{\theta} = \rho_1 [1 + \alpha(\theta - \theta_1)] \quad (2.3)$$

โดย

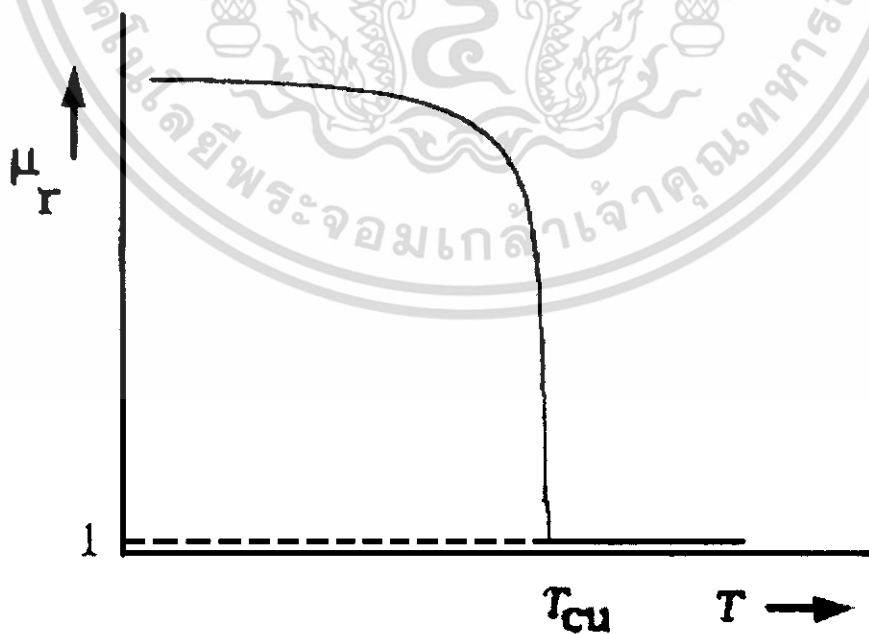
$\rho_{\theta}$  เป็นค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ  $\theta$  ใด ๆ ( $\Omega m$ )

$\rho_1$  เป็นค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ  $\theta_1$  ( $\Omega m$ )

การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะต่าง ๆ เป็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กสัมพัทธ์กับอุณหภูมิ

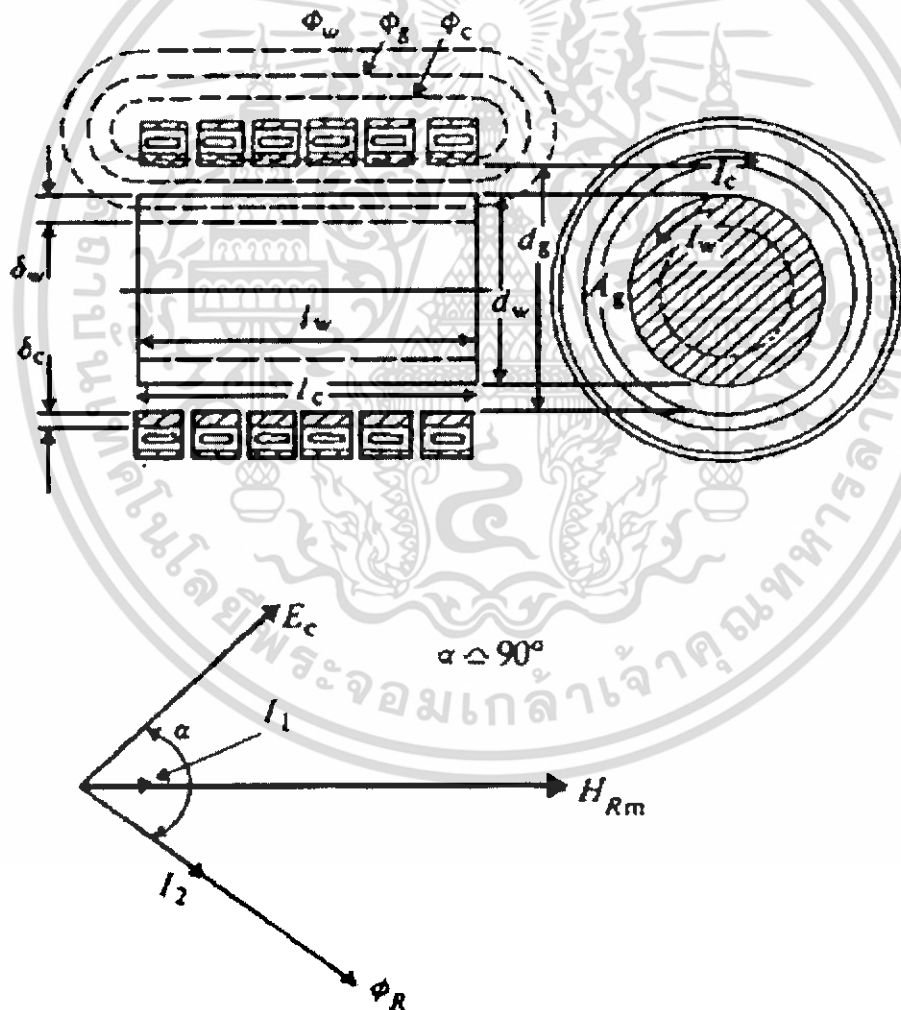
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.3 ความซึมซาบแม่เหล็กของโลหะกับอุณหภูมิ** โลหะที่เป็นสารแม่เหล็กนั้น โดยปกติจะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่ค่อนข้างสูง แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า  $\mu_r$  จะลดลงจนกระทั่งเมื่อถึงอุณหภูมิที่เรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) สารแม่เหล็กจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นสารไม่เป็นแม่เหล็ก มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์เป็น 1 หรือเท่ากับค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศนั่นเอง ( $\mu_r = 1$ )

## 2.4 ขดเหนี่ยวนำและวงจรมมูล

ขดเหนี่ยวนำมีวงจรมมูลประกอบด้วยส่วนที่เป็นค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ ซึ่งโดยปกติแล้วมีการพันเป็นชั้นเดี่ยว (Single Layer) และมีการระบายความร้อนออกจากตัวขดเหนี่ยวนำเพื่อลดความร้อนที่ตัวเหนี่ยวนำในขณะทำงาน

เมื่อผ่านกระแสเข้าไปในขดเหนี่ยวนำก็จะทำให้เกิด ฟลักซ์แม่เหล็กคล่องผ่านส่วนต่าง ๆ ภายในขดเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 2.7



**รูปที่ 2.7** แสดงฟลักซ์แม่เหล็กที่คล่องผ่านส่วนต่าง ๆ ของขดเหนี่ยวนำและเฟสเซอร์ไดอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่  $\phi_w$  คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องชิ้นงาน ( $Wb$ )  
 $\phi_g$  คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องช่องว่างอากาศ ( $Wb$ )  
 $\phi_c$  คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องขดลวดเหนี่ยวนำ ( $Wb$ )

**Working flux ( $\phi_w$ )** เป็นฟลักซ์แม่เหล็กในส่วนของชิ้นงานทำให้เกิดกระแสไหลวนในชิ้นงานที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้น โดยค่ากำลังที่ชิ้นงาน ( $P_w$ ) ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดเหนี่ยวนำและค่าแฟกเตอร์  $p$  (แฟกเตอร์  $p$  และ  $q$  แสดงในภาคผนวก ข) ดังสมการที่ 2.4

$$P_w = \mu \pi f H_{Rm}^2 (I_w A_w) p \quad (2.4)$$

และค่าฟลักซ์แม่เหล็กคล้องผ่านชิ้นงานคำนวณได้จาก

$$\phi_{wm} = \mu H_{Rm} A_w (q - jp) \quad (2.5)$$

โดยที่  $P_w$  คือ กำลังที่เกิดขึ้นที่ชิ้นงาน ( $W$ )  $H_{Rm}$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวชิ้นงาน ( $A_m^{-1}$ )  $\phi_w$  คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านชิ้นงาน  $A_w$  และ  $I_w$  คือ พื้นที่หน้าตัดและความยาวของชิ้นงาน  $m^2 \cdot m$

**Air-gap flux ( $\phi_g$ )** ในการออกแบบขดเหนี่ยวนำนั้น จำเป็นต้องเผื่อระยะห่างระหว่างตัวขดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน เพื่อให้เราสามารถใส่ชิ้นงานได้สะดวกและใช้อากาศเป็นฉนวนความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนจากชิ้นงานสู่ขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงมีฟลักซ์แม่เหล็กตัดผ่านในส่วนช่องว่างอากาศนี้ด้วย ดังสมการที่ 2.6 ซึ่งมีผลต่อค่าตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ

$$\phi_{gm} = \mu_0 H_{Rm} A_g \quad (2.6)$$

โดยที่  $A_g$  คือ พื้นที่หน้าตัดในส่วนที่เป็นช่องอากาศ ( $m^2$ )

**Coil flux ( $\phi_c$ )** เป็นฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านตัวขดเหนี่ยวนำเองและทำให้เกิดผลปรากฏการณ์พื้นผิวเช่นเดียวกับที่ชิ้นงาน โดยมีปริมาณฟลักซ์ที่ตัดผ่านดังสมการที่ 2.7

$$\phi_{cm} = k_r \frac{\mu_0 \delta_c \pi d_c}{2} H_{om} (1 - j) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $k_r$  คือ Correction factor ที่เกิดจากขดเหนี่ยวนำมีระยะห่างระหว่างกันในแต่ละรอบ ซึ่งโดยปกติจะมีค่าประมาณ 1.15 และ  $d_c$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดเหนี่ยวนำ ( $m$ ) ดังนั้นผลรวมของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นดังนี้

$$\phi_{0m} = \phi_{wm} + \phi_{gm} + \phi_{cm} \quad (2.8)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ 2.5, 2.6 และ 2.7 ลงในสมการที่ 2.8 จะได้

$$\phi_{0m} = \mu_0 H_{0m} \left[ \left( A_g + \mu_r q A_w + k_r \frac{\pi d_c \delta_c}{2} \right) - j \left( \mu_r p A_w + k_r \frac{\pi d_c \delta_c}{2} \right) \right] \quad (2.9)$$

โดยที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

$$H_{0m} = \sqrt{2} I_c N_c / l_c \quad (2.10)$$

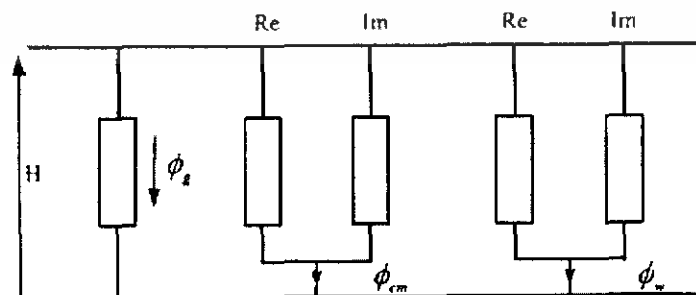
และค่าแรงดันที่ขดเหนี่ยวนำคือ

$$E_c = j \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_c \phi_{0m} \quad (2.11)$$

แทนสมการที่ 2.9 และ 2.10 ลงในสมการที่ 2.11 ทำให้ได้สมการเป็น

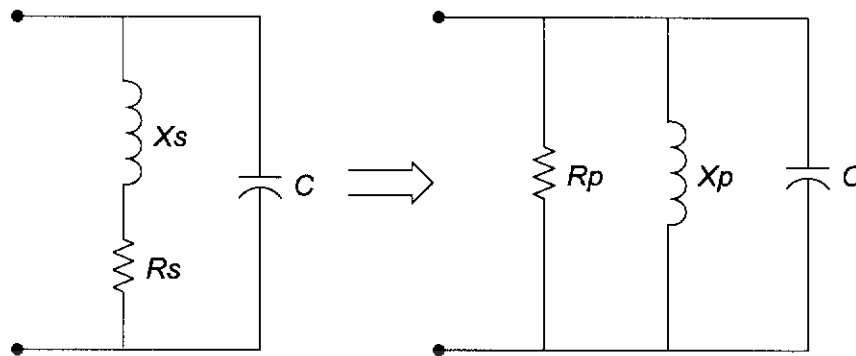
$$E_c = \frac{2\pi f \mu_0 N_c^2}{l_c} I_c \left[ \left( \mu_r p A_w + \frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) + j \left( A_g + \mu_r q A_w + \frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) \right] \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.9 และ 2.12 สามารถนำไปเขียนวงจรสมมูลทางแม่เหล็กและทางไฟฟ้าของขดเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ



**รูปที่ 2.8** วงจรสมมูลทางแม่เหล็กของขดเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.9** วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ

โดยที่

$$Z = (R_w + R_c) + j(X_g + X_w + X_c) \quad (2.13)$$

ความต้านทานของชิ้นงาน

$$R_w = K(\mu_r p A_w) \quad \text{โอห์ม} \quad (2.14)$$

ความต้านทานจากขดลวด

$$R_c = K \left( \frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) \quad \text{โอห์ม} \quad (2.15)$$

รีแอกแตนซ์ของช่องว่างอากาศ

$$X_g = K(A_g) \quad \text{โอห์ม} \quad (2.16)$$

รีแอกแตนซ์ของชิ้นงาน

$$X_w = K(\mu_r q A_w) \quad \text{โอห์ม} \quad (2.17)$$

รีแอกแตนซ์ของขดลวด

$$X_c = K \left( \frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) \quad \text{โอห์ม} \quad (2.18)$$

โดยที่  $K = 2\pi f \mu_0 \left( \frac{N_c^2}{I_c} \right)$

จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติของขดเหนี่ยวนำได้ดังนี้  
ประสิทธิภาพของขดเหนี่ยวนำ

$$\eta = \frac{R_w}{R_w + R_c} \quad (2.19)$$

ตัวประกอบกำลังของขดเหนี่ยวนำ

$$\cos \theta = \frac{R_w + R_c}{Z} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานที่ขดเหนี่ยวนำ

$$P_c = \frac{P_w}{\eta} \quad (2.21)$$

จากสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ของขดเหนี่ยวนำ เมื่อนำมาเชื่อมโยงจะพบว่า

- ค่าประสิทธิภาพของขดเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานที่ต้องการให้ความร้อนโดยหากค่าความต้านทาน  $R_w$  กับ  $R_c$  มีค่าใกล้เคียงกันจะทำให้ประสิทธิภาพมีค่าประมาณ 50% จึงสามารถสรุปได้ว่า ถ้ากำหนดขนาดชิ้นงานที่เท่ากัน ชิ้นงานที่มีความต้านทานจำเพาะที่สูงกว่าจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของขดเหนี่ยวนำมีค่าสูงกว่า

- การที่มีช่องว่างอากาศระหว่างชิ้นงานกับขดเหนี่ยวนำที่สูง จะทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูงมีผลทำให้ตัวประกอบกำลังของขดเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ ดังนั้นค่าช่องว่างอากาศควรมีค่าที่เหมาะสม กล่าวคือเมื่อใส่ฉนวนความร้อนกันแล้วยังสามารถป้อนชิ้นงานเข้าไปภายในขดเหนี่ยวนำได้สะดวก

จากสมการที่ (2.13-2.18) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานสมมูลขึ้นอยู่กับค่าต่าง ๆ และนอกจากนี้ค่า  $\mu_r$  ของชิ้นงานซึ่งอยู่ในตระกูลเหล็กจะมีค่าสูงแต่ค่า  $\mu_r$  จะมีค่าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิจนเมื่อถึงอุณหภูมิคูรี ชิ้นงานจะมีค่า  $\mu_r = 1$  ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานของขดเหนี่ยวนำ ( $R_s$ ) ขณะที่เริ่มใส่ชิ้นงานมีค่าสูงกว่าขณะที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิคูรีโดยที่ค่า  $R_s = R_c + R_w$ ,  $X_s = X_c + X_w + X_g$  วงจรในรูปที่ 2.10 (ก) สามารถเปลี่ยนไปเป็นวงจรในรูปที่ 2.10 (ข)



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนวงจรอนุกรมเป็นวงจรแบบขนาน

$$Z(f) = \frac{R_p}{1 + jQ_p \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $R_p, X_p$  คือค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์แบบขนานที่แหล่งจ่ายมองเห็น  $Q_p$  คือค่า Quality factor ของวงจรแบบขนาน และ  $f_0$  คือค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร เนื่องจากขดเหนี่ยวนำมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำทำให้สามารถประเมินได้ว่า

$$R_p = (X_s^2 / R_s) \quad (2.23)$$

$$X_{p.} = X_s \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.23 จะเห็นได้ว่าค่า  $R_s$  จะมีค่าแปรผกผันกับค่า  $R_p$  จึงสรุปได้ว่า ขณะที่ใส่ชิ้นงานเข้าไปในขดเหนี่ยวนำจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานขนาน ( $R_p$ ) มีค่าลดลง และค่า  $X_p$  มีค่าสูงขึ้น จึงมีผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม มีผลทำให้กำลังที่ด้านออกมีค่าลดลง ดังนั้นจึงควรมีการควบคุมที่แหล่งจ่ายกระแสตรงให้สามารถปรับกำลังเพิ่มขึ้นอัตโนมัติขณะที่ค่า  $R_p$  มีค่าลดลงและควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์ แต่ในโครงการนี้เป็นการใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์ให้ความร้อนกับโลหะเท่านั้น

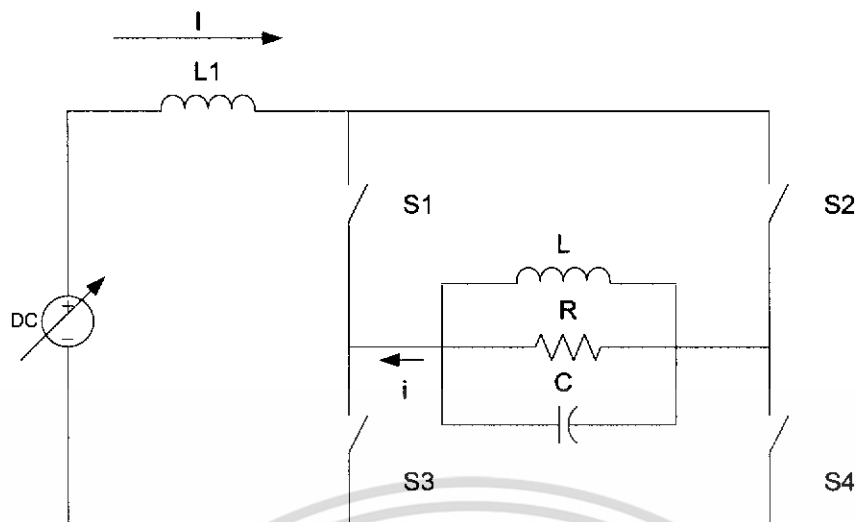
## 2.5 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์

อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟตรงคงที่ (Constant Current-Source) ซึ่งในทางปฏิบัติก็สามารถทำได้โดยการต่อแหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้อินทรมกับอินดักเตอร์ขนาดใหญ่ ( $L_1$ ) เพื่อกรองให้กระแสเรียบ (Current Regulator) สวิตช์จะต้องเป็นชนิดที่สามารถปิดกั้นแรงดันได้สองทาง เช่น เอสซีอาร์, ทรานซิสเตอร์อินทรมกับไดโอด, ไอจีบีที อินทรมกับไดโอด เป็นต้น และเพื่อให้เกิดกระแสพัลส์สลับที่ไหล การทำงานของสวิตช์จะต้องทำงานในลักษณะคู่ประกอบดังนี้

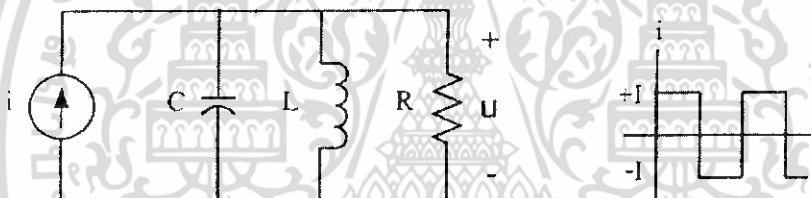
$$S1, S4 \text{ ON, } S2, S3 \text{ OFF} \quad i = +I \quad 0 < t < T/2 \quad (2.25)$$

$$S1, S4 \text{ OFF, } S2, S3 \text{ ON} \quad i = -I \quad T/2 < t < T \quad (2.26)$$

สำหรับแรงดันที่โหลดมีลักษณะเกือบจะเป็น Sine wave ในกรณีที่โหลดมีค่า Damping factor ที่ต่ำ และความถี่ในการทำงานใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อให้สะดวกในการวิเคราะห์สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 อินเวอร์เตอร์โร้ตอร์ไรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจร

**2.5.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของโพลดิโร้ตอร์ไรโซแนนซ์ขนานที่มีต่อกระแสพัลส์สี่เหลี่ยม**  
จากวงจรรูปที่ 4 ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟจะได้

$$C \frac{du}{dt} + i_L + \frac{u}{R} = i \quad (2.27)$$

แทนค่า  $u = L \frac{di_L}{dt}$  ลงในสมการที่ 2.27

จะได้

$$CL \frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{di_L}{dt} + i_L = i \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.28 ใหม่ จะได้

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{LC} i_L = i \quad (2.29)$$

จากสมการที่ 2.29 จะได้ค่า Natural angular frequency, damping coefficient และ damping factor ตามลำดับ ดังนี้

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

**2.5.2 การวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า** สัญญาณแรงดันของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบขนานจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ โหลดมีค่า Damping Factor ต่ำ โดยสัญญาณกระแสจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นพัลส์สลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

จากรูปที่ 2.1 รูปคลื่นของกระแสมีลักษณะเป็นฟังก์ชันที่องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ต่างๆ ของกระแสพัลส์สี่เหลี่ยมเป็นดังนี้

$$i(t) = I_1 \sin \omega t + I_3 \sin 3\omega t + \dots + I_n \sin n\omega t + \dots \quad (2.30)$$

โดยที่

$$I_1 = \frac{4I_m}{\pi} \quad \text{และ} \quad I_n = \frac{4I_m}{n\pi} \quad n = \text{จำนวนคี่} \quad (2.31)$$

ดังนั้น

$$I_{1,rms} = \frac{4I_m}{\pi\sqrt{2}} \quad (2.32)$$

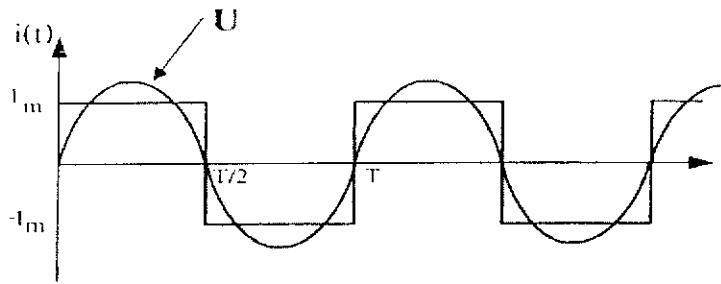
ส่วนแรงดันที่โหลดจะมีลักษณะเป็น Sinusoidal ดังนั้นจึงสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าได้จาก

$$P_{load} = I_{1,rms} \times V_{1,rms} \quad (2.33)$$

เมื่อแทนค่า  $I_{1,rms}$  และ  $V_{1,rms}$  จะได้

$$P_{load} = \frac{2I_m V_m}{\pi} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันที่โหลด

## 2.6 การทำงานของอินเวอร์เตอร์

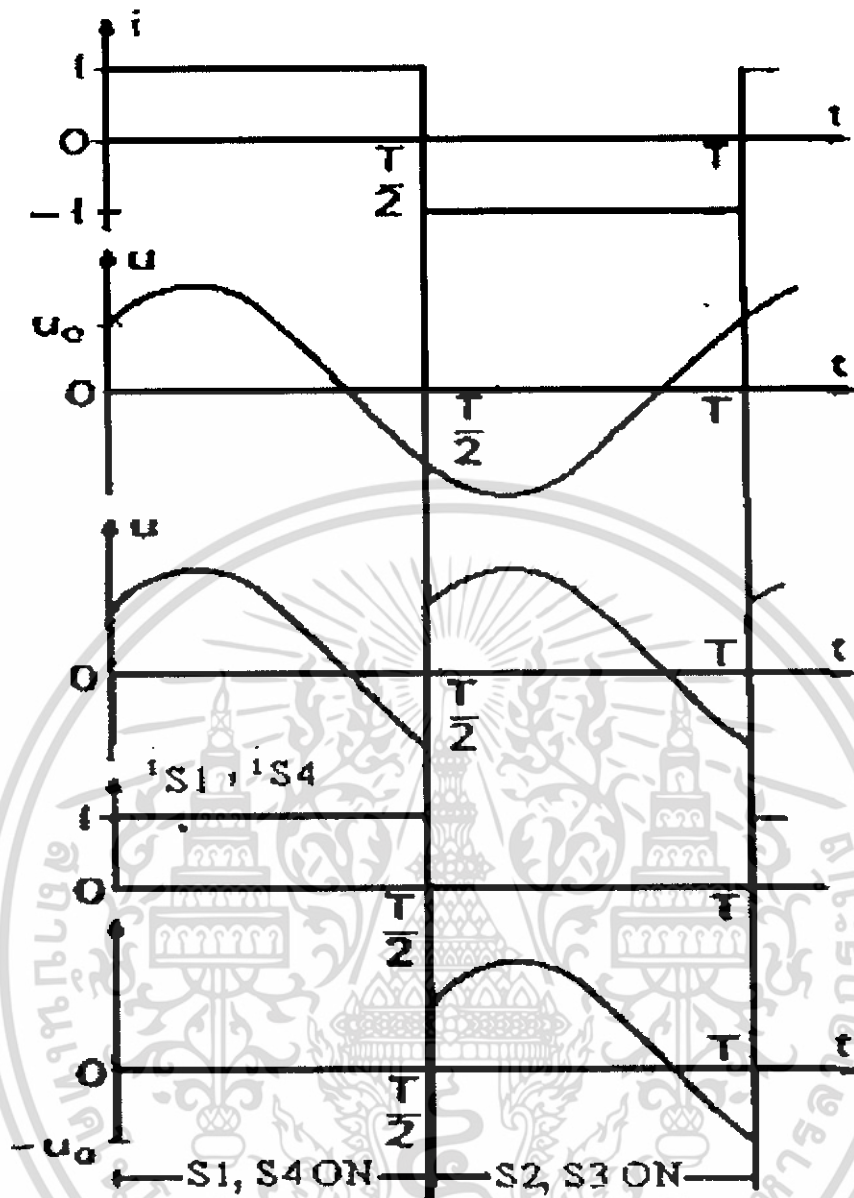
การทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสที่สำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในโครงการนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ และการทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์

**2.6.1 การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์** การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้โหลดมีสภาพเป็นอินดักทีฟโหลด โดยมีรูปคลื่นของแรงดันกับกระแสที่โหลดและสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์ ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 เป็นดังรูปที่ 2.14

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าสวิตช์ตัวนำที่นำกระแสอยู่จะหยุดนำกระแสได้เมื่อหยุดป้อนแรงดันที่เกิดและสวิตช์ที่เปิดวงจรอยู่จะนำกระแสได้ก็ต่อเมื่อสวิตช์อีกตัวนำกระแสไปแล้ว ซึ่งช่วงดังกล่าวอาจทำให้เกิดการทำงานที่ไม่ต่อเนื่องกันของสวิตช์ จึงทำให้เกิดสภาวะเปิดวงจรออกของตัวเหนี่ยวนำกรองกระแส (L1) ทำให้เกิดแรงดันยอดสูง (Spike Voltage) ขึ้นที่สวิตช์ อาจทำให้สวิตช์เสียหายได้ สำหรับการปิดกั้นแรงดันของสวิตช์นั้นในช่วงที่แรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นบวกไอจีบีทีจะปิดกั้นแรงดันไว้และเมื่อแรงดันเป็นลบไดโอดจะทำหน้าที่ปิดกั้นแรงดันแทน

62374

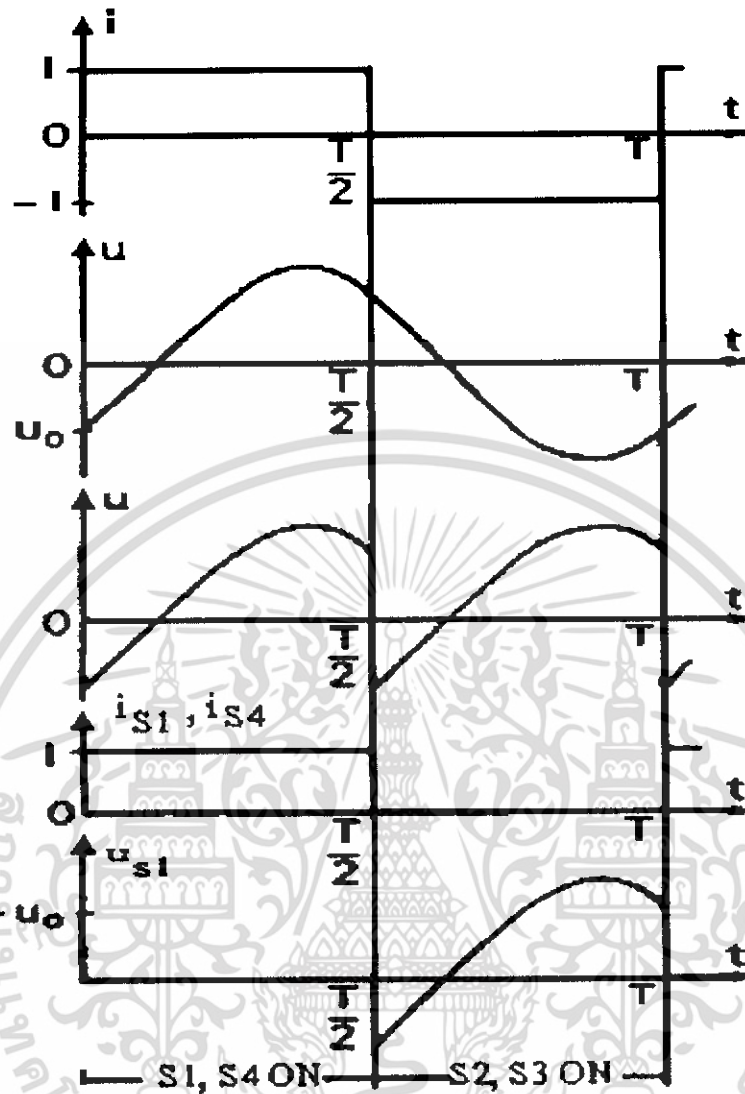
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ( $\xi < 1$ )

**2.6.2 การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์** การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้โหลดมีสภาพเป็นคาปาซิทีฟโหลด โดยมีรูปคลื่นของแรงดันกับกระแสที่โหลดและสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แหล่งจ่ายกระแสแบบเต็มบริดจ์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 เป็นดังรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.15** รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและอุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ( $\xi < 1$ )

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าการสั่งให้สวิตช์ตัวที่เปิดวงจรอยู่ให้นำกระแสจะทำให้สวิตช์ตัวที่นำกระแสอยู่ได้รับแรงดันรีเวอร์สไบอัสจึงหยุดนำกระแส ดังนั้นการทำงานของสวิตช์จะเป็นไปอย่างต่อเนืองกันหรือเรียกว่าเป็นแบบคู่ประกบกัน (Complementary Switch) สำหรับการปิดกันแรงดันของสวิตช์นั้นในช่วงที่แรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นบวกไอจีบีทีจะปิดกันแรงดันไว้ และเมื่อแรงดันเป็นลบไดโอดจะทำหน้าที่ปิดกันแรงดันแทน

จากการทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ จะมีการสูญเสียในช่วงการตัดวงจรของไดโอดและไอจีบีทีที่ต่อวงจร ส่วนการตัดวงจรของไอจีบีทีและการต่อวงจรของไดโอดจะเกิดขึ้นที่แรงดันศูนย์ จึงไม่มีการสูญเสีย ในกรณีทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ จะมี

การสูญเสียในช่วงการตัดวงจรของไอจีบีทีและไดโอดต่อวงจร ส่วนการต่อวงจรของไอจีบีทีและการตัดวงจรของไดโอดเกิดขึ้นที่แรงดันสูงจึงไม่เกิดการสูญเสีย เมื่อพิจารณาการทำงานที่ความถี่ทั้ง 2 แบบ จึงเลือกให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อย เพื่อให้กำลังผ่านไปที่โหลดมีค่าสูงและไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์เนื่องจากแรงดันยอดสูง (Spike Voltage)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ส่วนประกอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

จากการศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้เป็นแบบแหล่งจ่ายกระแส ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบส่วนประกอบต่างๆ และการควบคุมการทำงานของระบบ ระบบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยส่วนย่อยๆ ดังนี้

1. โหลดต่อในลักษณะวงจรเรโซแนนซ์ขนานประกอบด้วย ขดเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวเก็บประจุเพื่อแก้ตัวประกอบกำลังของขดเหนี่ยวนำที่มีค่าต่ำมาก

2. แหล่งจ่ายกระแส ประกอบด้วยหม้อแปลงรับไฟสลับเปลี่ยนเป็นไฟตรงโดยวงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอด 4 ตัว ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่พอที่สามารถรักษากระแสให้เรียบ

3. อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์ใช้มอสเฟตอนุกรมกับไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตช์ในการเปลี่ยนกระแสตรงให้เป็นพัลส์กระแสสลับรูปสี่เหลี่ยม ที่มีความถี่สูงที่ต้องการ

4. หม้อแปลงความถี่สูง ใช้ในการเพิ่มกระแสให้สูงขึ้น

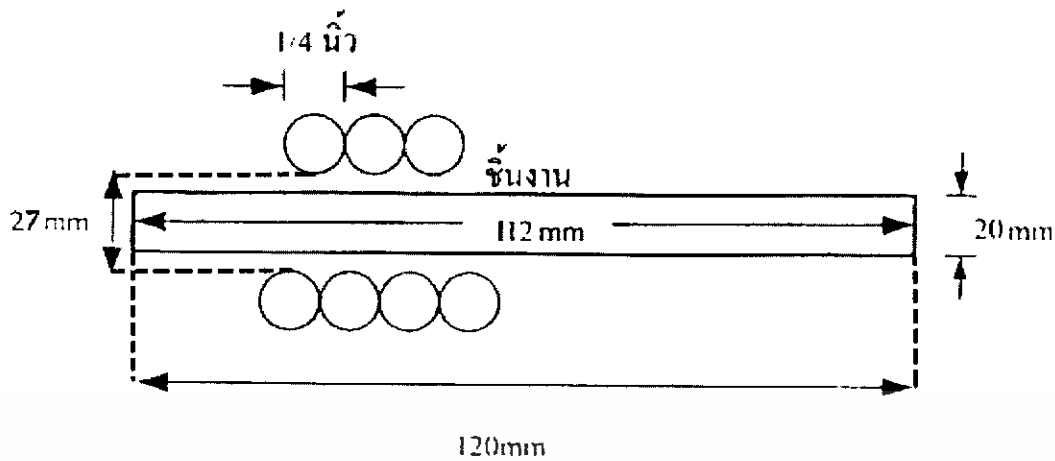
สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบต้นแบบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์

#### 3.1 ขดเหนี่ยวนำ

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ขดเหนี่ยวนำจะประกอบไปด้วยค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับคาร์แอคแตนซ์ ดังนั้นในการเลือกวัสดุที่ใช้จึงจำเป็นต้องเลือกที่วัสดุที่มีความต้านทานต่ำเพื่อให้ประสิทธิภาพของขดเหนี่ยวนำมีค่าสูง และรวมไปถึงการออกแบบรูปร่างให้เหมาะสมกับงาน ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.1.1

**3.1.1 การออกแบบขดเหนี่ยวนำ** กำหนดชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการให้ความร้อนเป็นเหล็กตันทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้มีชิ้นงานภายในขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 1 ชิ้น ในระหว่างให้ความร้อนรวมความยาวของชิ้นงานเป็น 112 มิลลิเมตร แล้วกำหนดให้ขดลวดเหนี่ยวนำมีความยาว 20 มิลลิเมตร และเพื่อลดอัตราการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมดังนั้นจึงต้องใส่ฉนวนความร้อนกันระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน จึงกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขดลวดเหนี่ยวนำเป็น 27 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อใส่ฉนวนความร้อนแล้วจะทำให้มีช่องว่างเพียงพอที่จะใส่ชิ้นงานได้สะดวก ท่อทองแดงที่ใช้ทำขดลวดเหนี่ยวนำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1/4 นิ้ว หนา 1 มิลลิเมตร สามารถพันได้ทั้งหมด 3.5 รอบ จากนั้นนำไปเชื่อมต่อกับแท่งทองแดงเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้า และให้นำระบายความร้อนภายในขดลวดทองแดง เนื่องจากกระแสที่ขดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ขดเหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ขดลวดเหนียวนำที่ได้ออกแบบและสร้าง

**3.1.2 พารามิเตอร์ของขดลวดเหนียวนำและหม้อแปลง** จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ขดลวดเหนียวนำมีวงจรมุมลที่ประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน ( $R_w$ ) และค่ารีแอคแตนซ์ ( $X_w$ ) โดยค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนียวนำที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบมีอยู่ 2 ชุด คือ ค่าพารามิเตอร์ในขดลวดเหนียวนำ และในหม้อแปลงไฟฟ้า ผลที่ได้เป็นดังนี้

#### ในขดลวดเหนียวนำ

ความต้านทานของขดลวดเหนียวนำ	$R_w = 0.048$	โอห์ม
รีแอคแตนซ์ของขดลวดเหนียวนำ	$X_w = 0.95$	โอห์ม



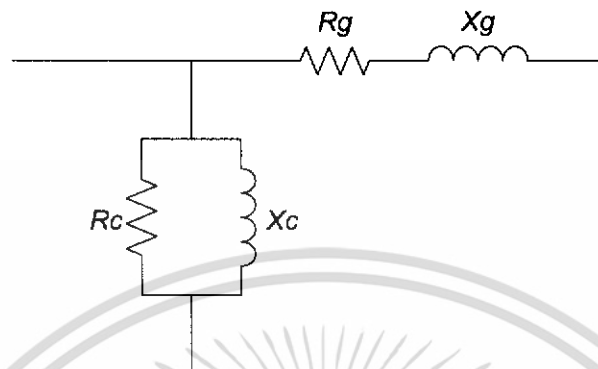
รูปที่ 3.2 วงจรมุมลของขดลวดเหนียวนำ

#### ในหม้อแปลงไฟฟ้า

ความต้านทานจากขดลวดหม้อแปลง	$R_g = 0.012$	โอห์ม
-----------------------------	---------------	-------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

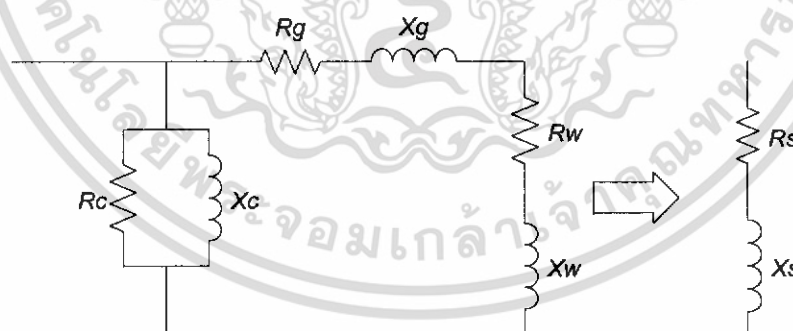
ความต้านทานในแกนเหล็กหม้อแปลง	$R_c = 2500$	โอห์ม
รีแอกแตนซ์จากขดลวด	$X_g = 145.1$	โอห์ม
รีแอกแตนซ์ในแกนเหล็ก	$X_c = 6.84$	โอห์ม



**รูปที่ 3.3** วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

นำค่าพารามิเตอร์ของขดเหนี่ยวนำและหม้อแปลงไฟฟ้ารวมกันจะได้ดังรูปที่ 3.4 โดย

ค่าอิมพีแดนซ์	$Z_c = 0.187 + j6.837$	โอห์ม
ค่าอิมพีแดนซ์	$Z_g = 0.06 + j146.05$	โอห์ม
ค่าความต้านทาน	$R_s = 0.17$	โอห์ม
ค่ารีแอกแตนซ์	$X_s = 6.52$	โอห์ม



**รูปที่ 3.4** วงจรสมมูลของขดเหนี่ยวนำและหม้อแปลงไฟฟ้า

จากพารามิเตอร์ของขดเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ จะพบว่าค่าตัวประกอบกำลังของขดเหนี่ยวนำมีค่าต่ำมาก ซึ่งสามารถใช้คาปาซิเตอร์ต่อขนานเพื่อปรับปรุงตัวประกอบได้ส่วนประสิทธิภาพของขดเหนี่ยวนำมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมแล้วและเพื่อให้สามารถออกแบบโดยใช้ทฤษฎีทางวงจรไฟฟ้าที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ได้ จึงทำการเปลี่ยนแปลงวงจรจากวงจรสมมูลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดเหนี่ยวนำในรูปที่ 3.4 ที่เป็นการต่ออนุกรมระหว่างค่าความต้านทานกับค่ารีแอคแตนซ์ให้กลายเป็นวงจรเรโซแนนซ์ ขนานดังรูปที่ 3.5 โดย

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s}$$

$$X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s}$$

เนื่องจากขดเหนี่ยวนำมีตัวประกอบกำลังต่ำมาก ดังนั้น  $R_p \ll X_s$  ทำให้ประมาณว่า



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลในลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์ขนาน

จากการคำนวณได้ผลดังนี้  $R_p = 250.06 \Omega$ ,  $L_p = 57.82 \mu\text{H}$

### 3.2 รายละเอียดของวงจรและการออกแบบวงจรภาคกำลัง

การออกแบบวงจรภาคกำลังจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของขดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.1.2 โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

#### ข้อกำหนด

ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ยาว 112 มิลลิเมตร

จำนวน 1 ท่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุปรับปรุ้งตัวประกอบกำลัง (เลือกใช้ค่าอินดักแตนซ์ที่พิกัด)

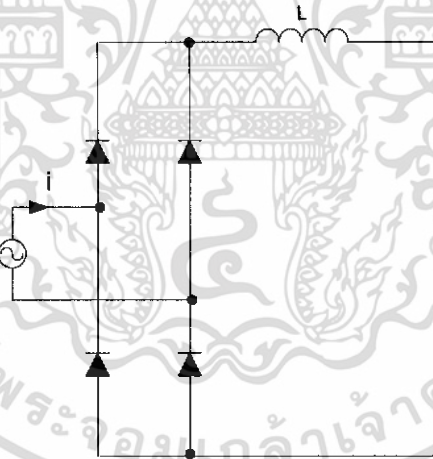
$$C_p = \frac{1}{\omega^2 L_p}$$

$C_p = 1.35 \mu\text{F}$  เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุขนาด  $1.32 \mu\text{F}$  ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงและเป็นมาตรฐานที่มีอยู่

### 3.3 แหล่งจ่ายกระแส

แหล่งจ่ายกระแสประกอบไปด้วยหม้อแปลง นอกจากทำหน้าที่รับไฟสลับจากระบบลดระดับแรงดันให้เหมาะสมกับช่วงการใช้งานแล้วยังทำหน้าที่แยกโดดทางไฟฟ้าเพื่อความปลอดภัย จากนั้นทำการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยวงจรเรียงกระแสใช้ไดโอด 4 ตัว แรงดันไฟตรงที่ได้เมื่อนำมาต่อกับตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่พอที่สามารถรักษากระแสให้เรียบได้

**3.3.1 วงจรเรียงกระแส** วงจรเรียงกระแสสำหรับงานวิจัยนี้มีรูปแบบดังรูปที่ 3.5 โดยค่าแรงดันไฟสลับที่เข้าสู่วงจรเรียงกระแส แล้วใช้ตัวอินดักเตอร์กรองกระแส โดยใช้อินดักเตอร์มีขนาดใหญ่พอที่ทำให้กระแสเรียบ



รูปที่ 3.6 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการวิจัย

ให้แรงดันสามเฟสที่เข้าสู่วงจรเรียงกระแส  $v_{an} = \sqrt{2} V \cos \omega t$   
แรงดันเฉลี่ยที่ขั้วออกของวงจรเรียงกระแสสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V \sin(\omega t) d(\omega t)$$

$$V_{dc} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติแรงดันจะตกคร่อมอยู่กับส่วนต่างๆของวงจร เช่น แรงดันตกคร่อมไดโอด ในช่วงนำกระแสประมาณ 0.7 โวลท์ ขึ้นอยู่กับชนิดของไดโอด, ความต้านทานขดลวดของหม้อแปลงความต้านทานสายไฟและจุดต่อต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นจำเป็นต้องเผื่อค่าแรงดันให้สูงกว่าค่าที่คำนวณได้

### 3.4 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์

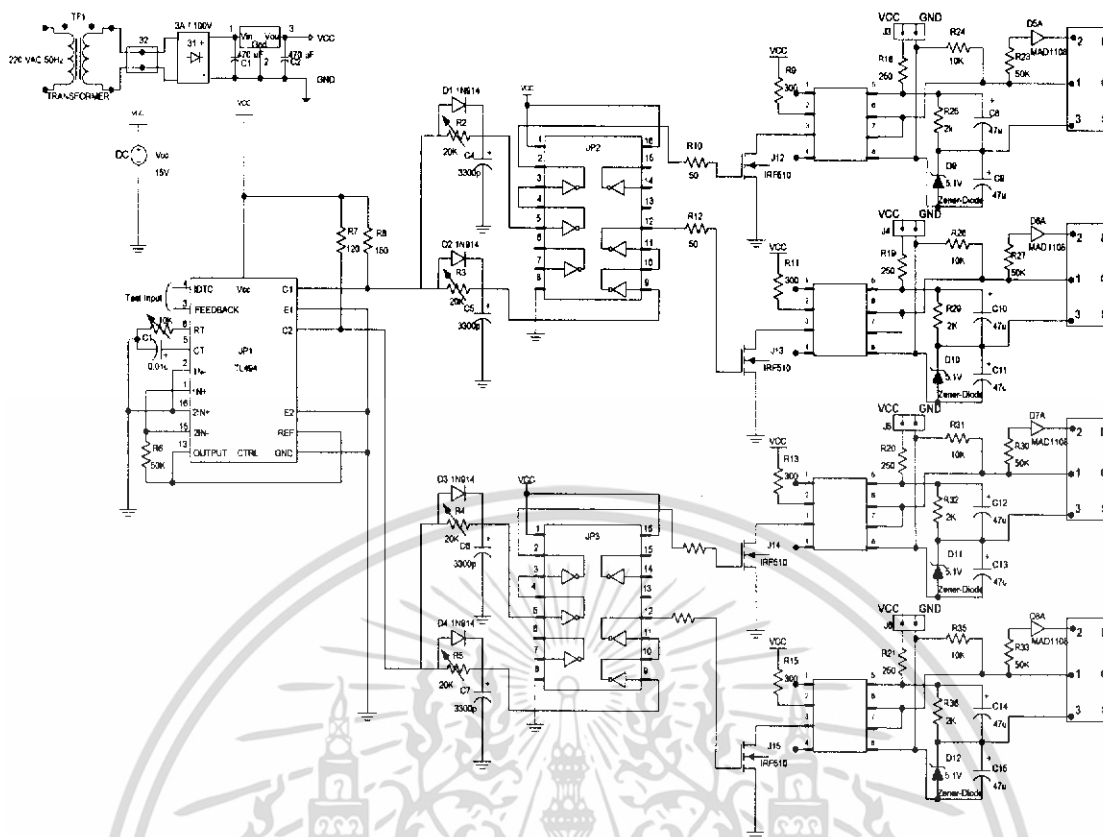
**3.4.1 การขับนำมอสเฟต** ปัจจุบันมอสเฟตกำลังเป็นที่นิยมมากในการใช้เป็นสวิตช์กำลัง ในระบบการควบคุม ทั้งอินเวอร์เตอร์และคอนเวอร์เตอร์ การควบคุมมอเตอร์และระบบจ่ายกำลังสำรอง มอสเฟตต้องการแรงดันมาขับเคลื่อนเพื่อให้มันสามารถทำงานในสภาวะนำกระแสและหยุดนำกระแสได้ ซึ่งวงจรขับที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ไอซี TLP250 เป็นไอซีที่แยกส่วนของสัญญาณขับกับส่วนที่ใช้ขับสวิตช์ดังวงจรรูปที่ 3.7 จากรูป จะต่อความต้านทานอนุกรม ( $R_G = 50 \Omega$ ) เข้าขาเกตของมอสเฟต (หรือมอสเฟส) เพื่อควบคุมเวลาในการ สวิตช์ของมอสเฟต (Switch Time) และต่อซีเนอร์ไดโอดเข้าที่ขาอิมิตเตอร์ของไอจีบีทีเพื่อสร้างแรงดัน (-5 V) ในช่วงหยุดทำงานของสวิตช์สำหรับช่วยให้สวิตช์หยุดทำงานเร็วขึ้น โดยไอซีจะทำงานเมื่อได้รับสัญญาณขับจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะทำให้สวิตช์ Tr1 ต่อยวงจรเพื่อจ่ายแรงดันเข้าขาเกตกับขาอิมิตเตอร์ของมอสเฟต โดยแรงดันตกคร่อมขาเกตและอิมิตเตอร์จะเป็น

$$V_{GE} = V_{CC} - V_Z$$

เมื่อไม่มีสัญญาณขับสวิตช์สวิตช์Tr2จะต่อยวงจรทำให้แรงดันตกคร่อมขาเกตและอิมิตเตอร์มีค่าเท่ากับ

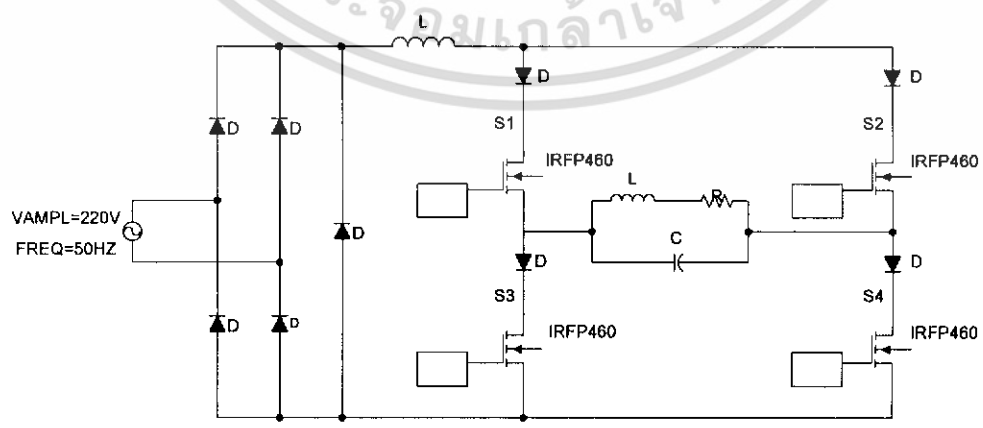
$$V_{GE} = -V_Z$$

ในที่นี้จะใช้ TLP250 จำนวน 4 ตัวสำหรับขับสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 3.7



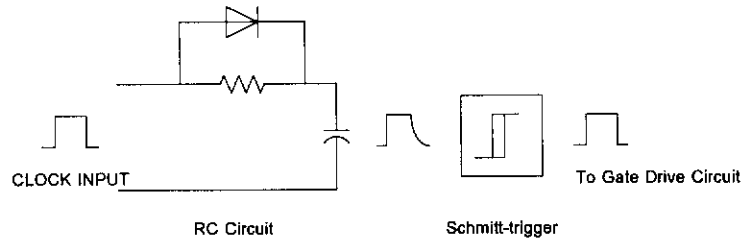
รูปที่ 3.7 วงจรขับสวิตช์

คู่ของสัญญาณขับนำมอสเฟตทั้ง 4 ตัวสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส เต็มบริดจ์นั้นจะต้องมีการเหลื่อม (Overlap) กัน เพื่อป้องกันการเปิดวงจรของแหล่งจ่ายกระแส การเหลื่อมของสัญญาณทำได้โดยการใช้วงจร RC ในการทำให้เกิดการหน่วงเวลาในช่วงขอบางลงของสัญญาณนาฬิกาและใช้วงจรขมิดตทริกเกอร์ในการตัดสัญญาณให้เป็นพัลส์สี่เหลี่ยม โดยมีการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.8

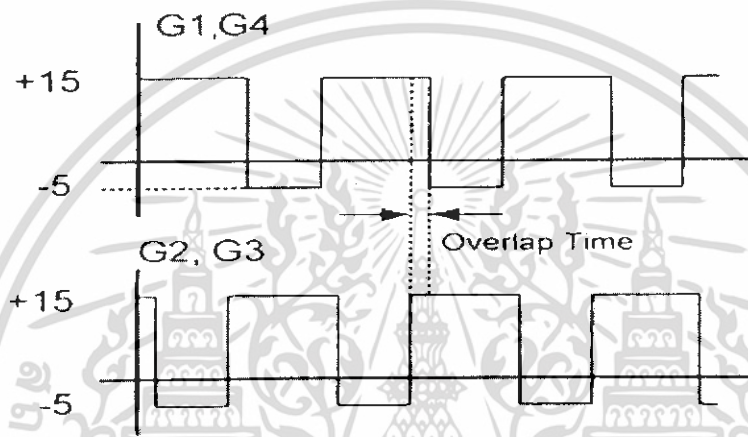


รูปที่ 3.8 ตำแหน่งการต่อวงจรขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



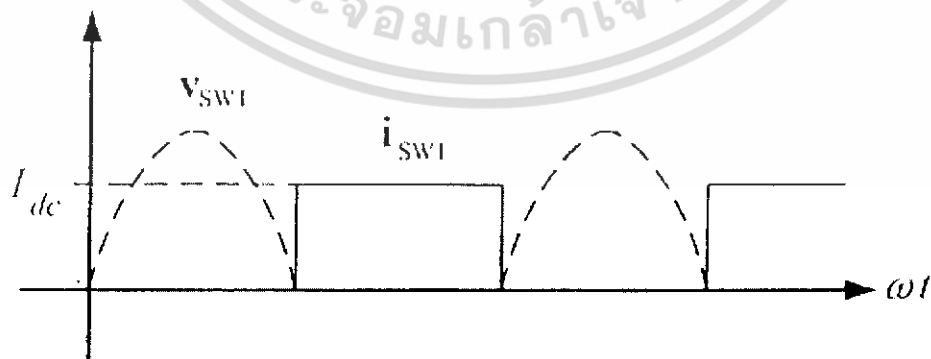
**รูปที่ 3.9** วิธีการสร้างสัญญาณให้มีการเหลี่ยมคี่น



**รูปที่ 3.10** ลักษณะของสัญญาณขับนำไอจีบีทีทั้งสองคู่

**3.5 อุปกรณ์สวิตช์**

การพิจารณาค่ากระแสและแรงดันอุปกรณ์สวิตช์ (มอสเฟตอนุกรมกับไดโอด) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.10



**รูปที่ 3.11** กระแสกับแรงดันที่ตัวสวิตช์

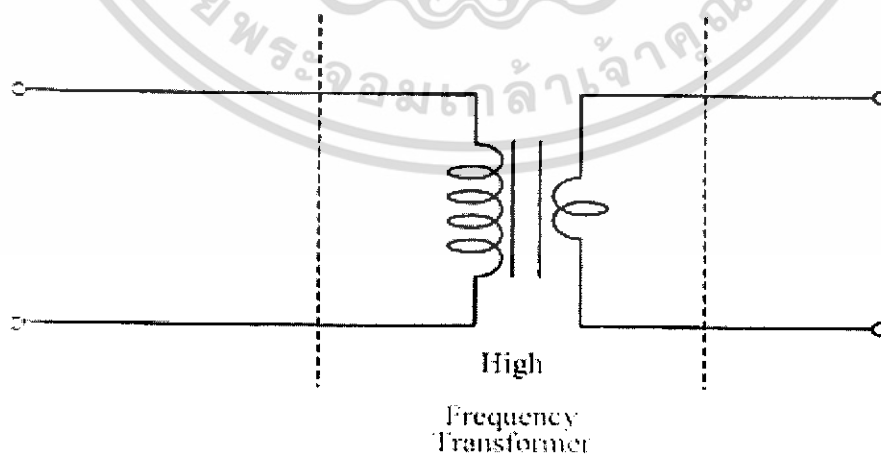
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์มีค่าเท่ากับกระแสไฟตรงในช่วงครึ่งไซเคิลแรกและมีค่าเป็นศูนย์ในครึ่งไซเคิลหลัง จากค่ากระแสไฟตรงสูงสุดที่ได้คำนวณไว้มีค่าประมาณ 30 แอมป์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ MOSFET เบอร์ IRFP260 ของ International Rectifier ซึ่งมีพิกัดกระแสตรงต่อเนื่อง 51 แอมป์ที่อุณหภูมิทำงาน  $25^{\circ}\text{C}$  สำหรับขนาดของแรงดันตกคร่อมสวิตช์สามารถพิจารณาจากค่าแรงดันที่โหลดซึ่งมีค่าประมาณ  $122\sqrt{2}$  โวลต์ ซึ่งไม่เกินพิกัดของอุปกรณ์ที่มีพิกัดแรงดัน 900 โวลต์ และความถี่การสวิตช์สูงสุดไม่เกิน 100 kHz ส่วนไดโอดเลือกใช้ IR60GFU ของ International Rectifier ซึ่งเป็นไดโอดชนิดฟื้นตัวเร็ว (Fast Recovery Diode) ที่มีช่วงเวลาฟื้นตัว 60 ns สามารถทนกระแสได้ 60 แอมป์ พิกัดแรงดัน 600 โวลต์

### 3.6 ภาคหม้อแปลงความถี่สูง

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงซึ่งประกอบด้วยจำนวนขดลวดทองแดงที่เกลียวทางด้านปฐมภูมิ และขดลวดในลักษณะของท่อทองแดงทางด้านทุติยภูมิ เพื่อให้สามารถระบายความร้อนด้วยน้ำผ่านภายในท่อทองแดง โดยในกรณีไซน์เต็มคลื่นที่ด้านปฐมภูมิจะมีจำนวนรอบของขลวดสูงกว่าทางด้านทุติยภูมิในอัตราส่วน 26:4 โดยที่กระแสที่ไหลเข้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะมีลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงสแควร์ ความถี่ประมาณ 18 kHz

หม้อแปลงความถี่สูงจะใช้ “แกนเฟอร์ไรต์” เพราะมีจุดอิมิตัวของฟลักซ์แม่เหล็กสูงและเกิดการสูญเสียต่ำที่ความถี่สูงทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานจากชุดอินเวอร์เตอร์ไปยังโหลด ซึ่งในการเลือกต้องให้ขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม ถ้าขนาดแกนมีขนาดใหญ่เกินไปจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย แต่ถ้าขนาดแกนมีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้ฟลักซ์อิมิตัวส่งผลให้ลวดร้อนและแกนร้อน ซึ่งในการทดลองไม่สามารถหาซื้อแกนที่มีกำลังวัตต์ที่ต้องการได้ในท้องตลาดดังนั้นจึงหาซื้อแกนเหล็กที่หาซื้อได้ คือ แกนเฟอร์ไรต์แบบ EE 80 สองคู่แล้วนำมาประกบกันเพื่อเพิ่มกำลังวัตต์ให้สูงขึ้น



รูปที่ 3.12 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงใช้แกนเหล็กเฟอร์ไรต์

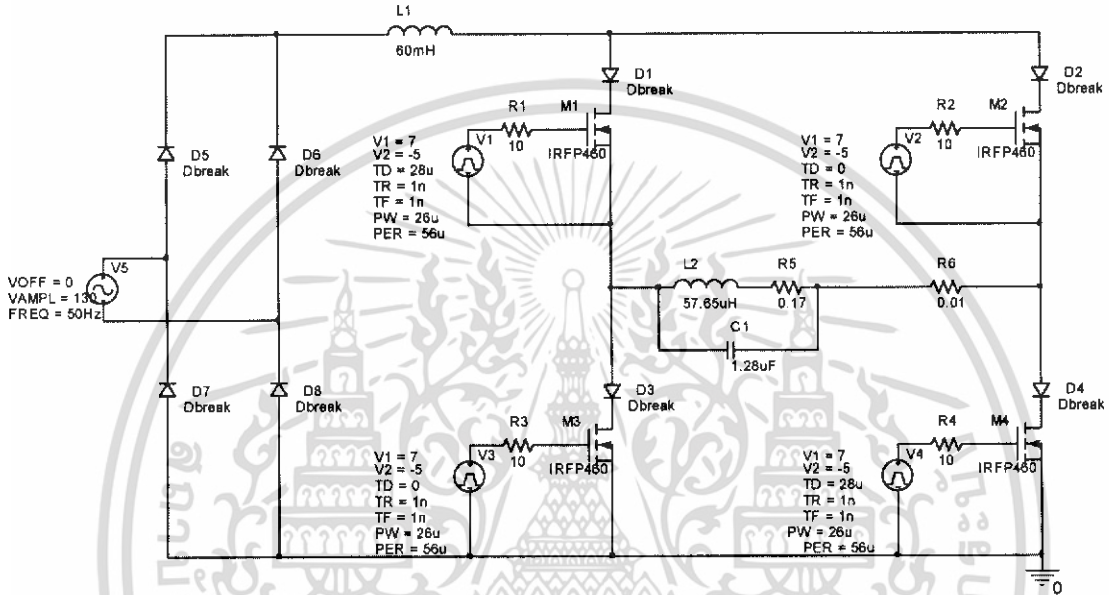
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

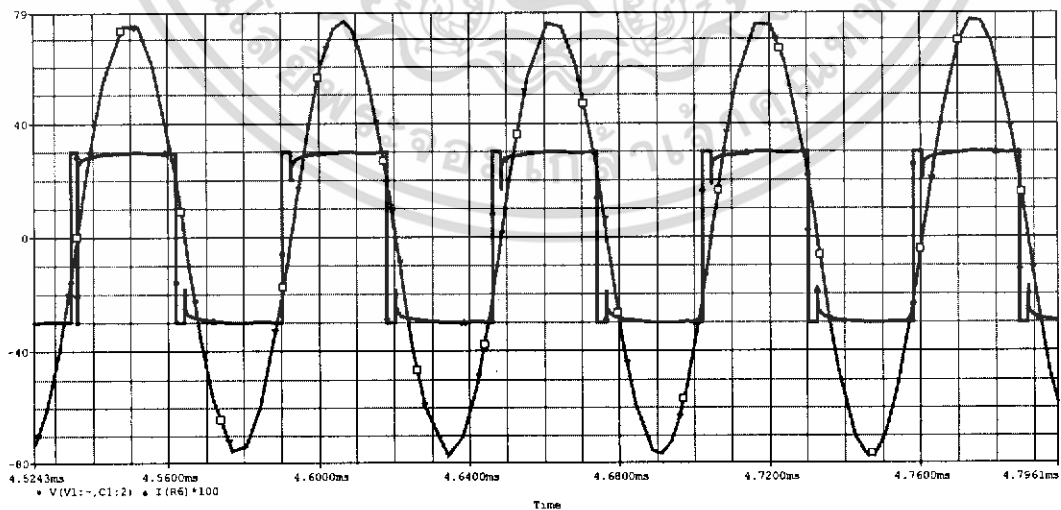
## ผลการทดลอง

### 4.1 การจำลองการทำงาน

นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณของขดเหนี่ยวนำไปจำลองการทำงานในภาวะคงตัว (Steady state) เพื่อให้ทราบถึงขนาดของแรงดันและกระแสที่ส่วนต่างๆ ของวงจร วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานเป็นดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.7

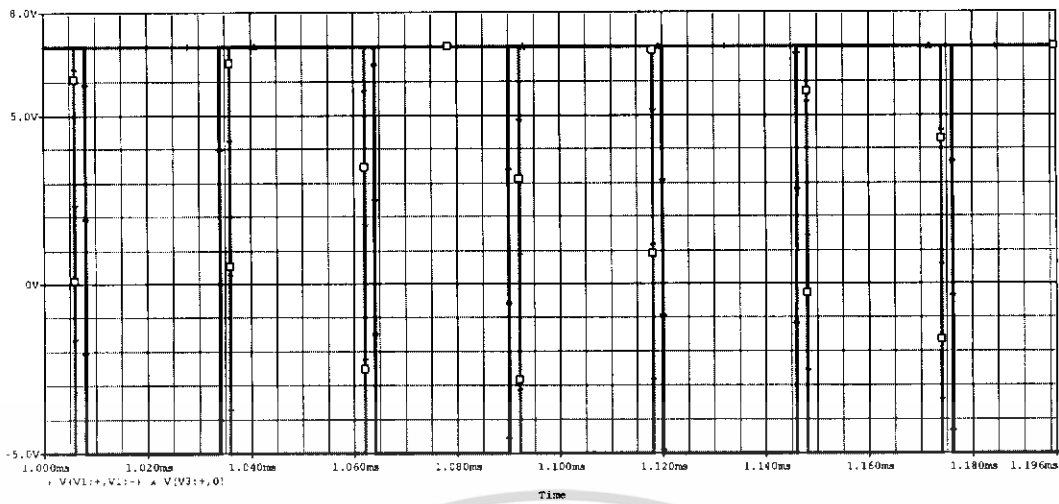


รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์โหลด กระแสหน้าแรงดันไฟฟ้า

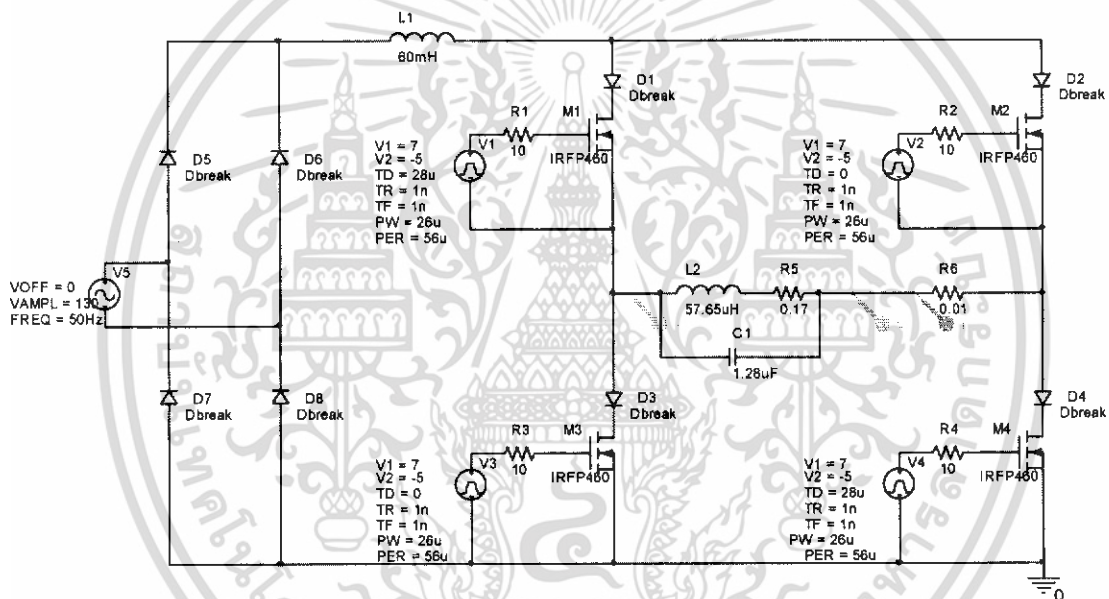


รูปที่ 4.2 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

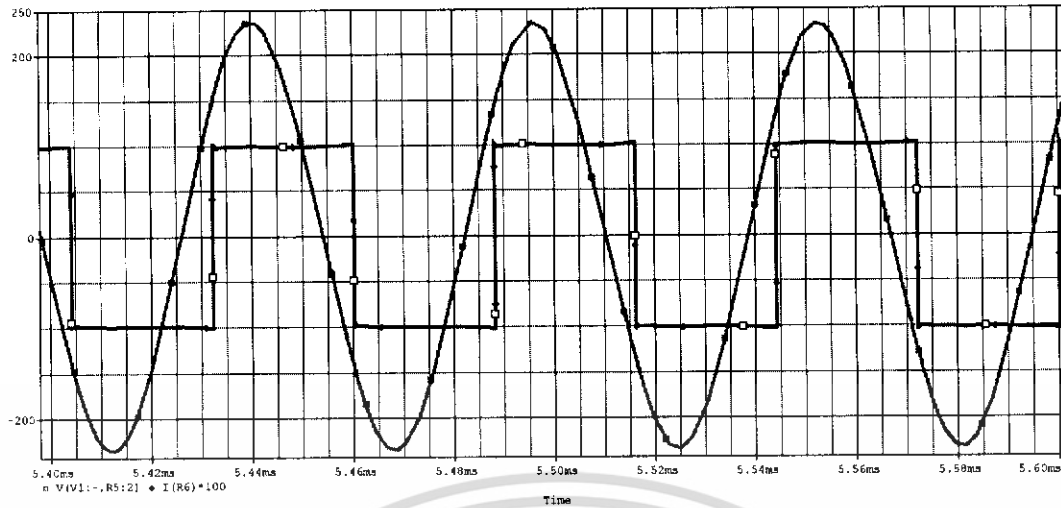


รูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นของแรงดันที่ได้จากวงจรขับ

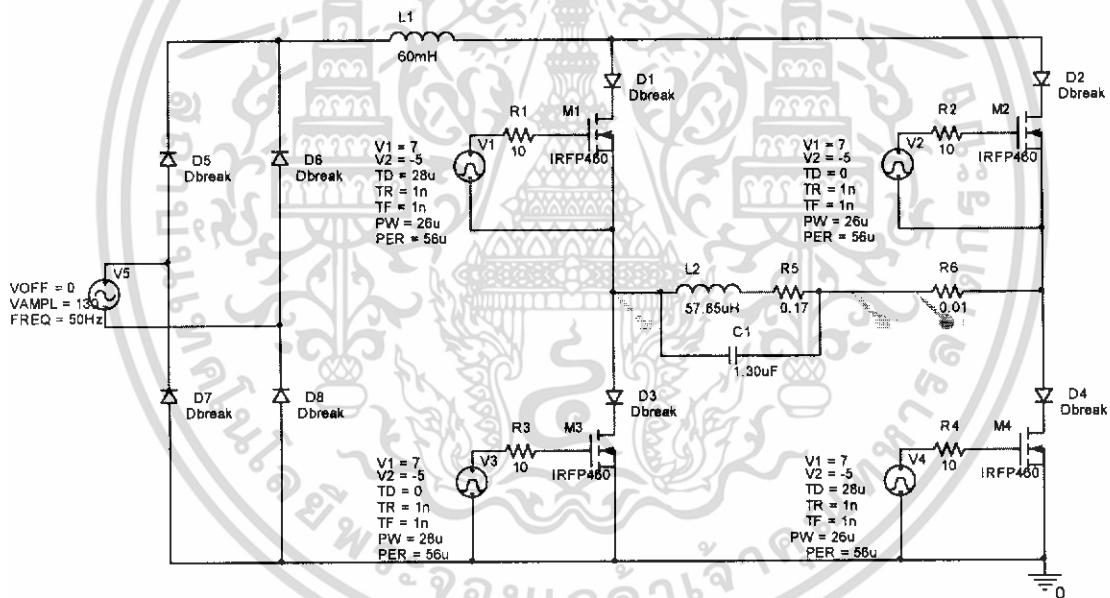


รูปที่ 4.4 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์โหลด กระแสล้าหลังแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

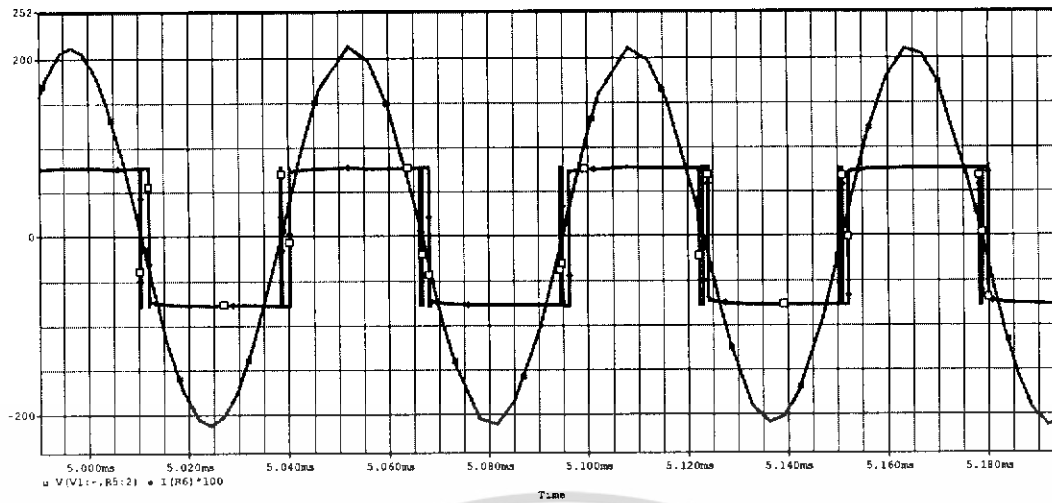


รูปที่ 4.5 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด



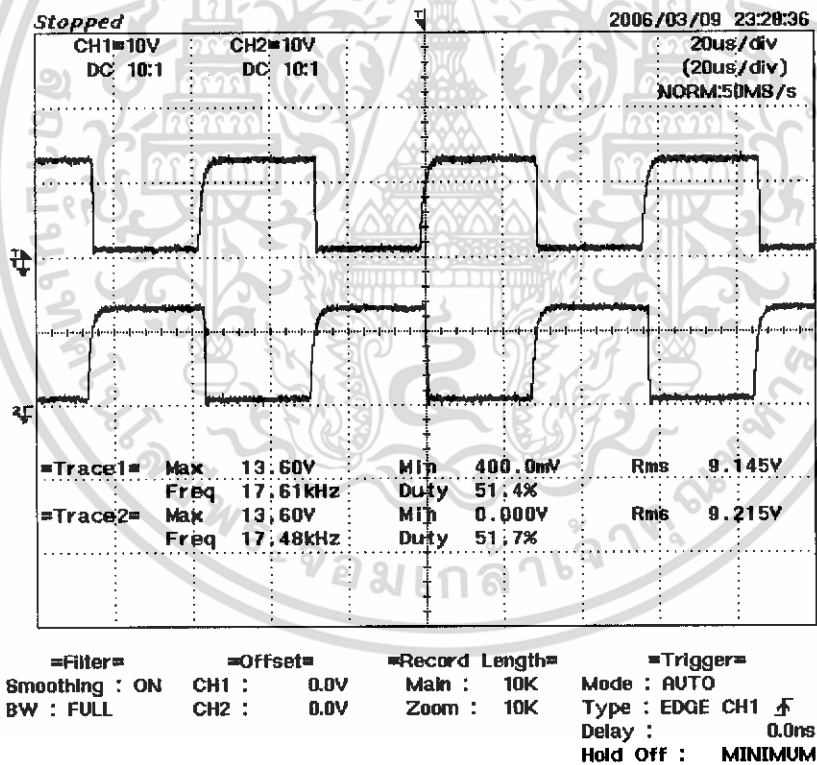
รูปที่ 4.6 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเต็มบริจด์โหลด  
กระแสอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด

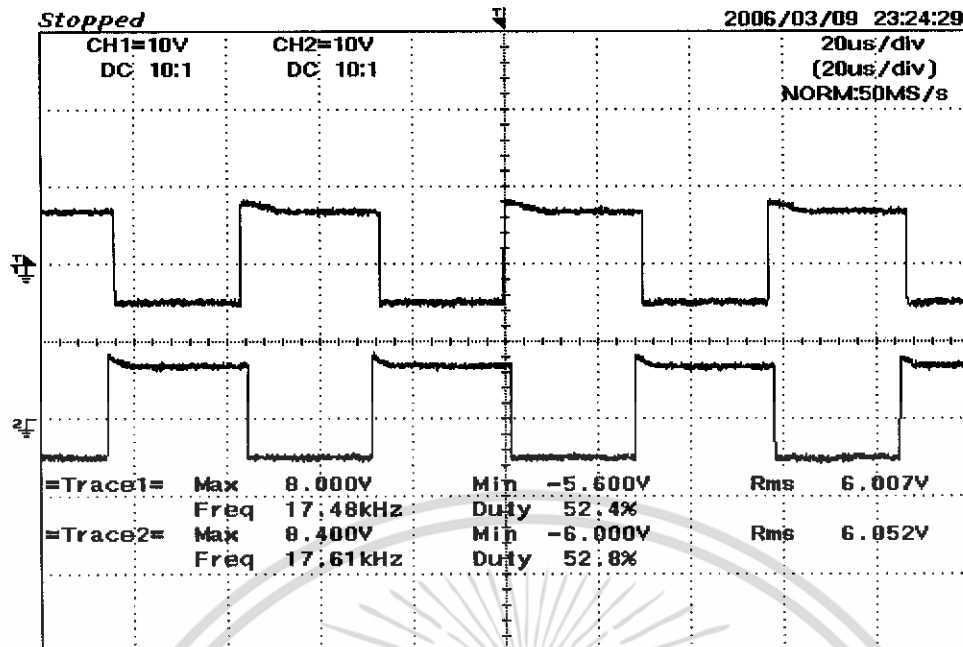
## 4.2 ผลการทดลองจากชุดทำงานจริง



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นของสัญญาณที่ได้จาก IC TL494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





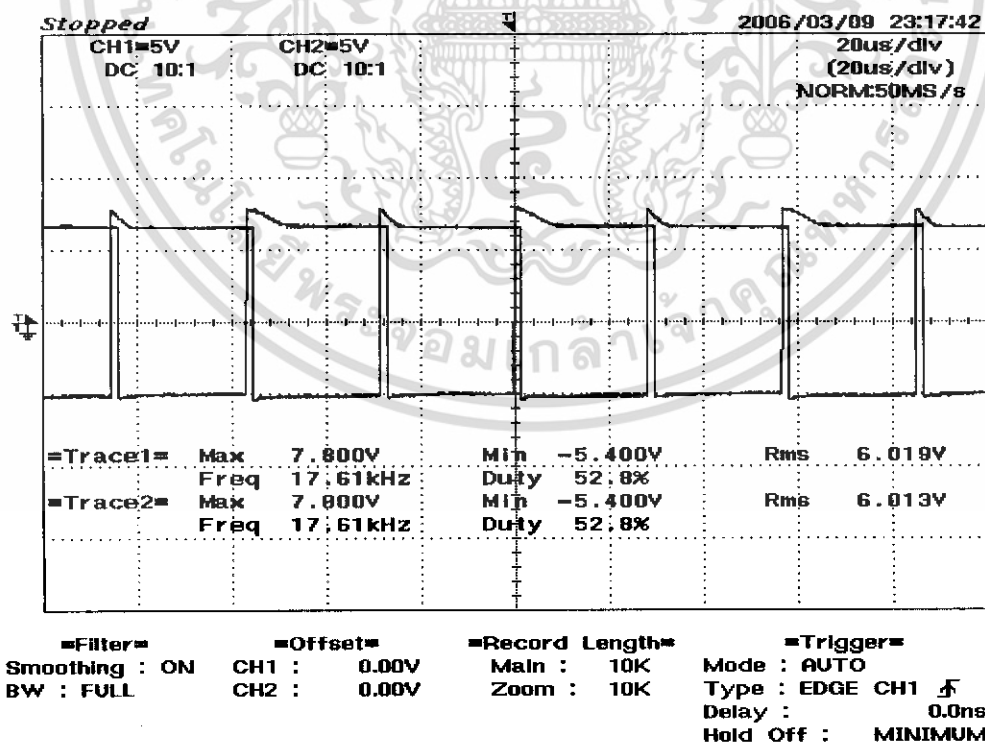
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL

=Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0.0V

=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K

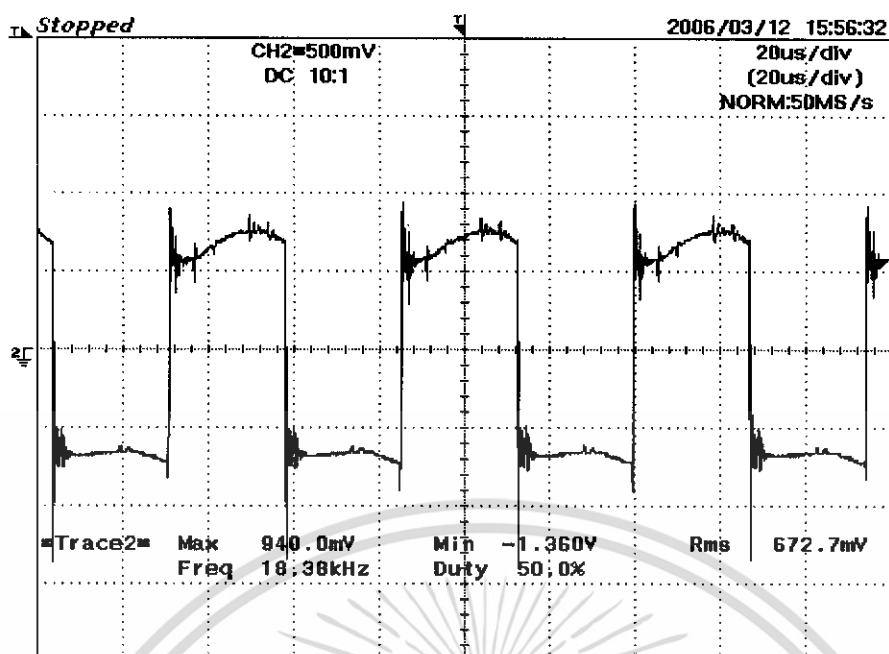
=Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 4.11 รูปคลื่นของสัญญาณที่นำไปขับ



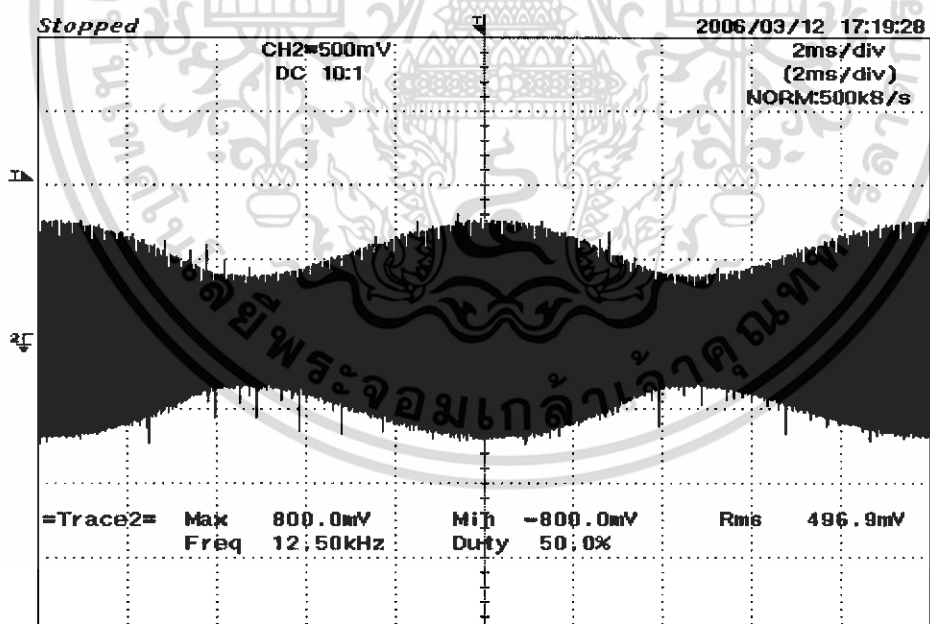
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบรูปคลื่นของสัญญาณที่นำไปขับให้เห็นว่าเกิด Overlap กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter=      =Offset=      =Record Length=      =Trigger=  
Smoothing : ON    CH1 : 0.0V      Main : 10K      Mode : AUTO  
BW : FULL      CH2 : 0.000V      Zoom : 10K      Type : EDGE CH1   
Delay : 0.0ns  
Hold Off : MINIMUM

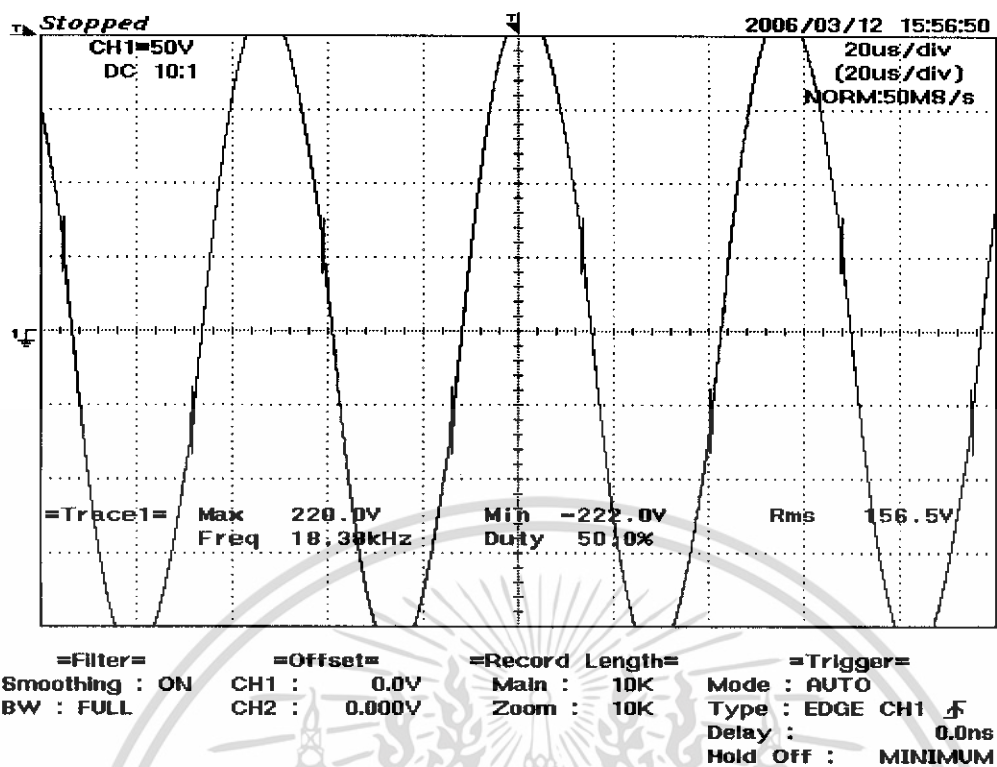
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นของกระแสที่โหลด



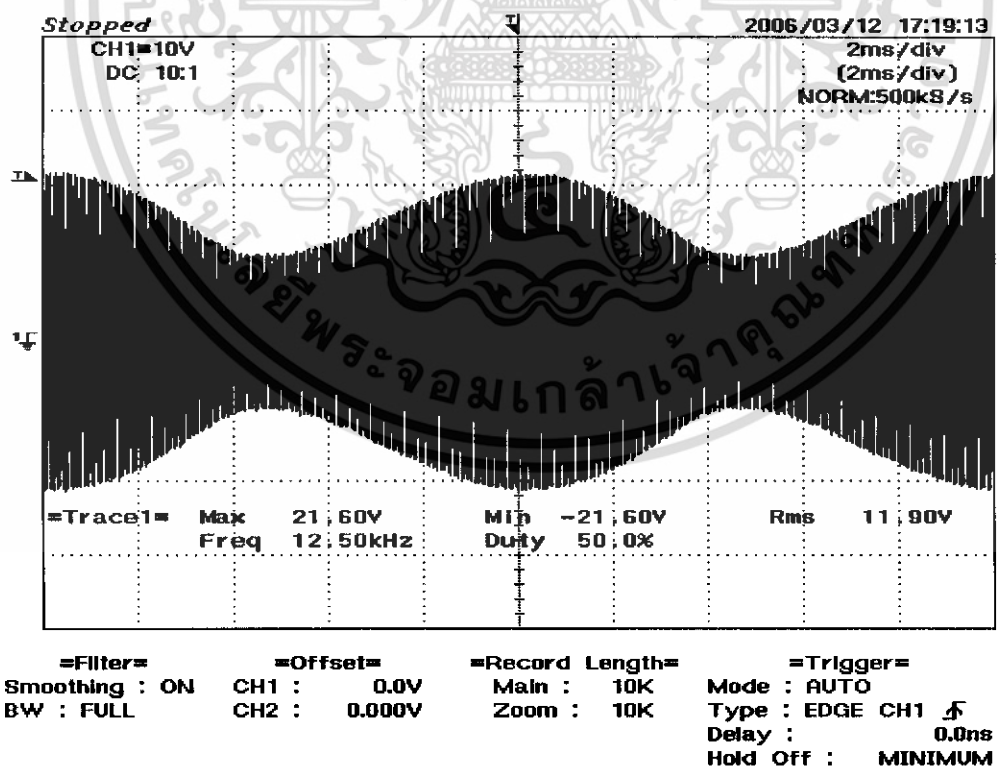
=Filter=      =Offset=      =Record Length=      =Trigger=  
Smoothing : ON    CH1 : 0.0V      Main : 10K      Mode : AUTO  
BW : FULL      CH2 : 0.000V      Zoom : 10K      Type : EDGE CH1   
Delay : 0.0ns  
Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 4.14 รูปคลื่นของกระแสที่โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

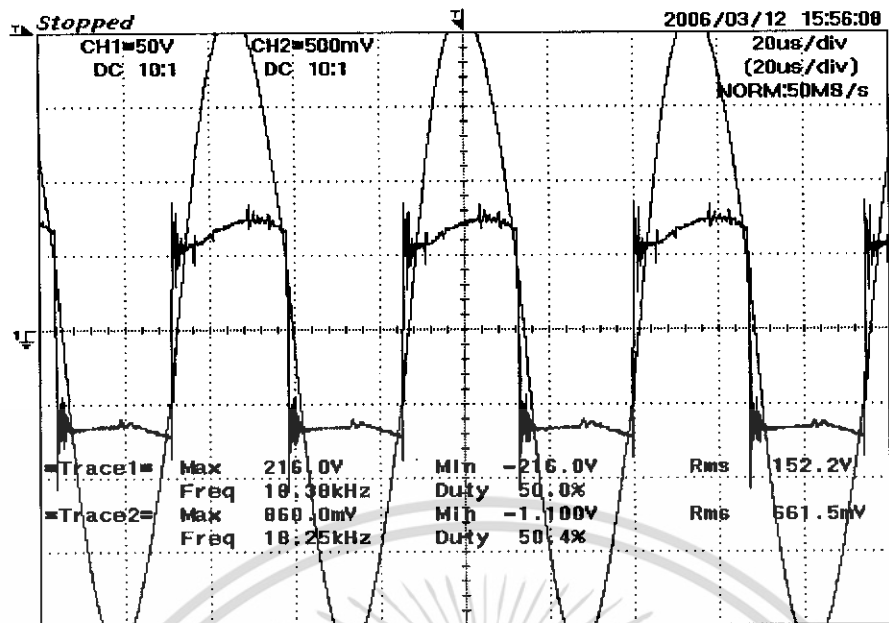


รูปที่ 4.15 รูปคลื่นของแรงดันที่โหลด



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นของแรงดันที่โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL  
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0.000V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 4.17 รูปคลื่นของกระแสกับแรงดันที่โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุป

โครงการนี้ได้ดำเนินการตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การออกแบบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งประกอบไปด้วยชุดขับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส
- 2) ผลการทดลองเครื่องต้นแบบ
  - สามารถให้ความร้อนกับชิ้นที่ได้ออกแบบไว้คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ยาว 112 มิลลิเมตร ให้เหล็กแดงได้ภายในเวลาประมาณ 4 นาที
- 3) ความสอดคล้องกันระหว่างทฤษฎีกับผลทางปฏิบัติ
  - ความถี่การทำงาน เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้น จะทำให้ค่าพารามิเตอร์ของโหลดเปลี่ยนแปลง โดยค่าความเหนี่ยวนำเนื่องจากชิ้นงานจะมีค่าต่ำลง ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Davies, J. and Simpson, 1979, **Induction Heating Handbook**, Mc Graw-Hill.
- [2] Khan, I. Tapson, J. and de Vries, 1998, **An Induction Furnace Employ A 100 kHz Mosfet Full-Bridge Current-Source Load Resonant Inverter**, July 1998.
- [3] ปิยะ ถนอมทรัพย์, พลพรรชนี คุณาภิบาล, พัฒนา ดัชนีสุทธีวงศ์, 2541, **เครื่องชุบแข็งผิวโลหะ INDUCTION HEATING**, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

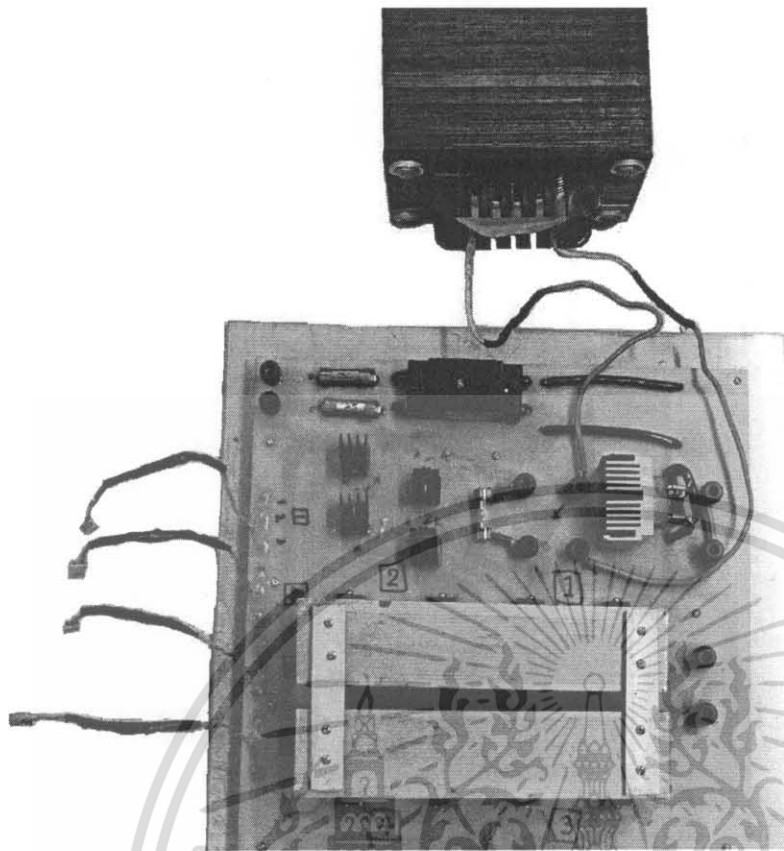


ภาคผนวก ข

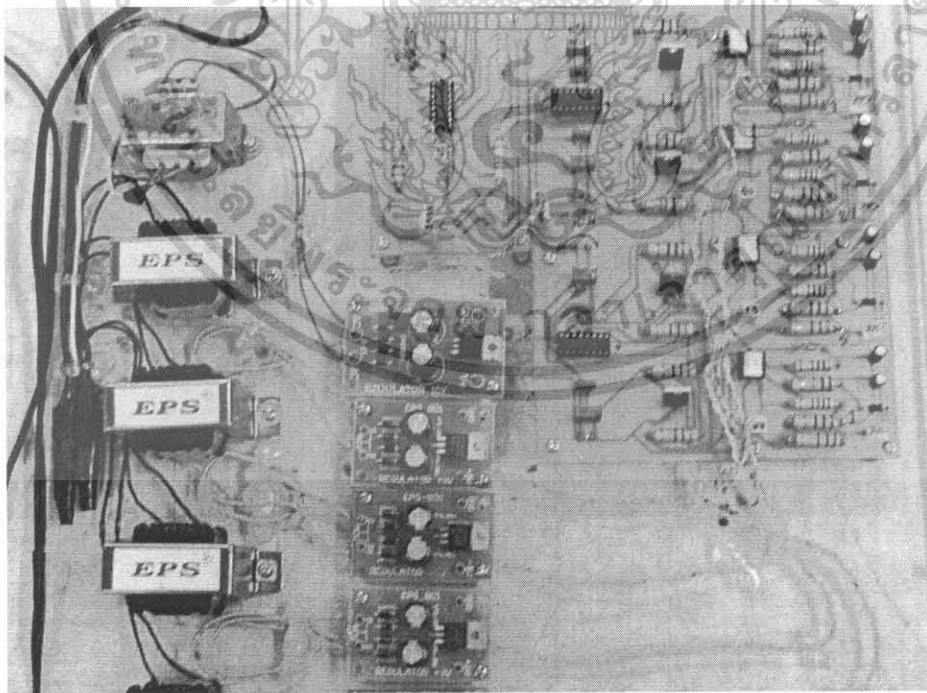
## ภาคผนวก ข

### ภาพจริงของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

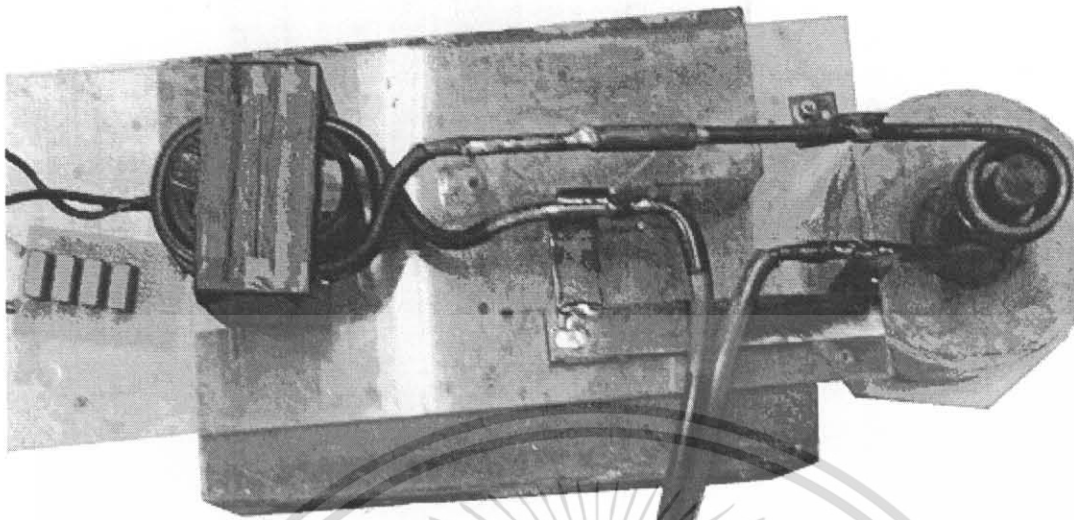


รูป ข.1 ชุดอินเวอร์เตอร์



รูป ข.2 ชุดขับอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข.3 ชุดไหลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# IRFP460

N-CHANNEL 500V - 0.22Ω - 18.4A TO-247

PowerMesh™ II MOSFET

TYPE	V <sub>DSS</sub>	R <sub>DS(on)</sub>	I <sub>D</sub>
IRFP460	500V	< 0.27Ω	18.4A

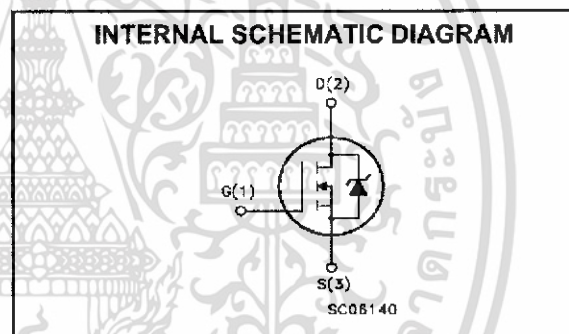
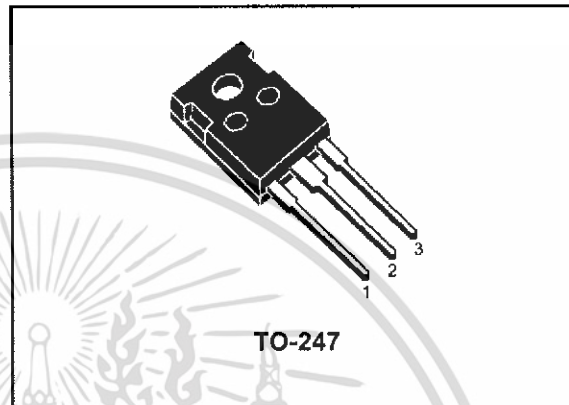
- TYPICAL R<sub>DS(on)</sub> = 0.22Ω
- EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- 100% AVALANCHE TESTED
- NEW HIGH VOLTAGE BENCHMARK
- GATE CHARGE MINIMIZED

### DESCRIPTION

The PowerMESH™ II is the evolution of the first generation of MESH OVERLAY™. The layout refinements introduced greatly improve the Ron\*area figure of merit while keeping the device at the leading edge for what concerns swithing speed, gate charge and ruggedness.

### APPLICATIONS

- SWITCH MODE LOW POWER SUPPLIES (SMPS)
- HIGH CURRENT, HIGH SPEED SWITCHING
- DC-AC CONVERTERS FOR WELDING EQUIPMENT AND UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES AND MOTOR DRIVES



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V <sub>DS</sub>	Drain-source Voltage (V <sub>GS</sub> = 0)	500	V
V <sub>DGR</sub>	Drain-gate Voltage (R <sub>GS</sub> = 20 kΩ)	500	V
V <sub>GS</sub>	Gate- source Voltage	±30	V
I <sub>D</sub>	Drain Current (continuous) at T <sub>C</sub> = 25°C	18.4	A
I <sub>D</sub>	Drain Current (continuous) at T <sub>C</sub> = 100°C	11.6	A
I <sub>DM</sub> (●)	Drain Current (pulsed)	73.6	A
P <sub>TOT</sub>	Total Dissipation at T <sub>C</sub> = 25°C	220	W
	Derating Factor	1.75	W/°C
dv/dt(1)	Peak Diode Recovery voltage slope	3.5	V/ns
T <sub>stg</sub>	Storage Temperature	-65 to 150	°C
T <sub>j</sub>	Max. Operating Junction Temperature	150	°C

(●)Pulse width limited by safe operating area

(1)|I<sub>SD</sub> ≤ 18.4A, di/dt ≤ 100A/μs, V<sub>DD</sub> ≤ V<sub>(BR)DSS</sub>, T<sub>j</sub> ≤ T<sub>JMAX</sub>.

## THERMAL DATA

Rthj-case	Thermal Resistance Junction-case Max	0.57	°C/W
Rthj-amb	Thermal Resistance Junction-ambient Max	30	°C/W
Rthc-sink	Thermal Resistance Case-sink Typ	0.1	°C/W
T <sub>l</sub>	Maximum Lead Temperature For Soldering Purpose	300	°C

## AVALANCHE CHARACTERISTICS

Symbol	Parameter	Max Value	Unit
I <sub>AR</sub>	Avalanche Current, Repetitive or Not-Repetitive (pulse width limited by T <sub>j</sub> max)	20	A
E <sub>AS</sub>	Single Pulse Avalanche Energy (starting T <sub>j</sub> = 25 °C, I <sub>D</sub> = I <sub>AR</sub> , V <sub>DD</sub> = 50 V)	960	mJ

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (TCASE = 25 °C UNLESS OTHERWISE SPECIFIED)  
OFF

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V <sub>(BR)DSS</sub>	Drain-source Breakdown Voltage	I <sub>D</sub> = 250 μA, V <sub>GS</sub> = 0	500			V
I <sub>DSS</sub>	Zero Gate Voltage Drain Current (V <sub>GS</sub> = 0)	V <sub>DS</sub> = Max Rating V <sub>DS</sub> = Max Rating, T <sub>C</sub> = 125 °C			1 50	μA μA
I <sub>GSS</sub>	Gate-body Leakage Current (V <sub>DS</sub> = 0)	V <sub>GS</sub> = ±30V			±100	nA

## ON (1)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V <sub>GS(th)</sub>	Gate Threshold Voltage	V <sub>DS</sub> = V <sub>GS</sub> , I <sub>D</sub> = 250μA	2	3	4	V
R <sub>DS(on)</sub>	Static Drain-source On Resistance	V <sub>GS</sub> = 10V, I <sub>D</sub> = 9 A		0.22	0.27	Ω
I <sub>D(on)</sub>	On State Drain Current	V <sub>DS</sub> > I <sub>D(on)</sub> × R <sub>DS(on)max</sub> , V <sub>GS</sub> = 10V	18.4			A

## DYNAMIC

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
g <sub>fs</sub> (1)	Forward Transconductance	V <sub>DS</sub> > I <sub>D(on)</sub> × R <sub>DS(on)max</sub> , I <sub>D</sub> = 9A		18		S
C <sub>iss</sub>	Input Capacitance	V <sub>DS</sub> = 25V, f = 1 MHz, V <sub>GS</sub> = 0		2980		pF
C <sub>oss</sub>	Output Capacitance			410		pF
C <sub>rss</sub>	Reverse Transfer Capacitance			58		pF

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS (CONTINUED)**

**SWITCHING ON**

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{d(on)}$	Turn-on Delay Time	$V_{DD} = 250V, I_D = 10A$		29		ns
$t_r$	Rise Time	$R_G = 4.7\Omega, V_{GS} = 10V$ (see test circuit, Figure 3)		21		ns
$Q_g$	Total Gate Charge	$V_{DD} = 400V, I_D = 20A,$ $V_{GS} = 10V$		95	128	nC
$Q_{gs}$	Gate-Source Charge			14.7		nC
$Q_{gd}$	Gate-Drain Charge			41.7		nC

**SWITCHING OFF**

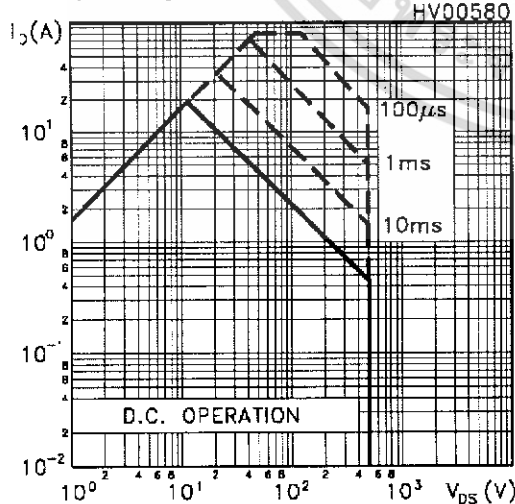
Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{r(off)}$	Off-voltage Rise Time	$V_{DD} = 400V, I_D = 20A,$ $R_G = 4.7\Omega, V_{GS} = 10V$ (see test circuit, Figure 5)		20		ns
$t_f$	Fall Time			21		ns
$t_c$	Cross-over Time			58		ns

**SOURCE DRAIN DIODE**

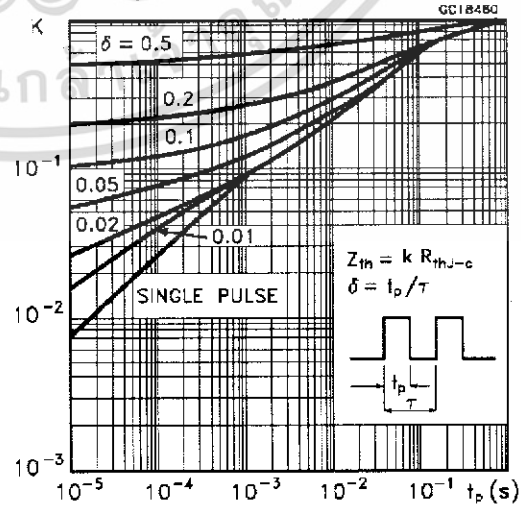
Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$I_{SD}$	Source-drain Current				18.4	A
$I_{SDM(2)}$	Source-drain Current (pulsed)				73.6	A
$V_{SD(1)}$	Forward On Voltage	$I_{SD} = 18.4A, V_{GS} = 0$			1.6	V
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	$I_{SD} = 20A, di/dt = 100A/\mu s,$ $V_{DD} = 100V, T_j = 150^\circ C$ (see test circuit, Figure 5)		480		ns
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge			5		$\mu C$
$I_{RRM}$	Reverse Recovery Current			21		A

Note: 1. Pulsed: Pulse duration = 300  $\mu s$ , duty cycle 1.5%.  
2. Pulse width limited by safe operating area.

**Safe Operating Area**

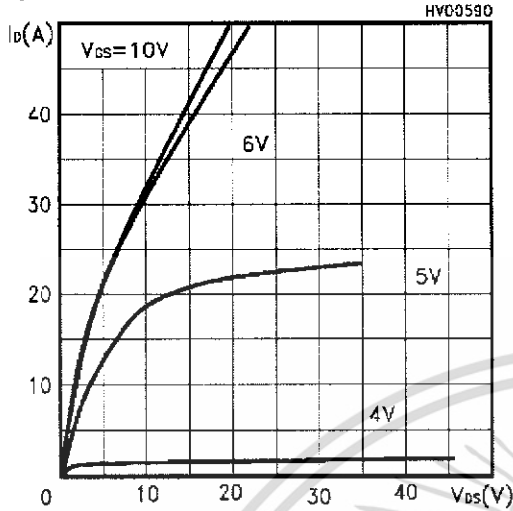


**Thermal Impedance**

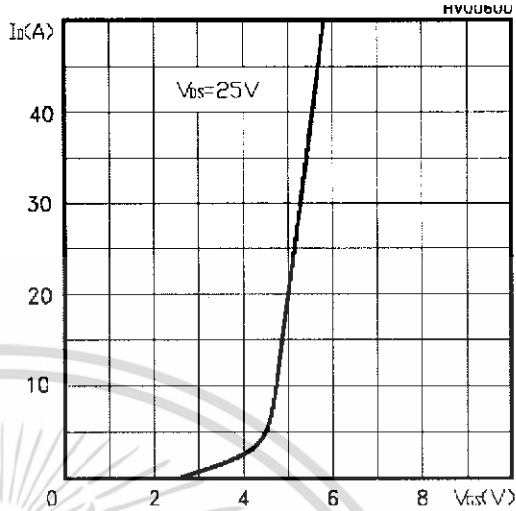


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

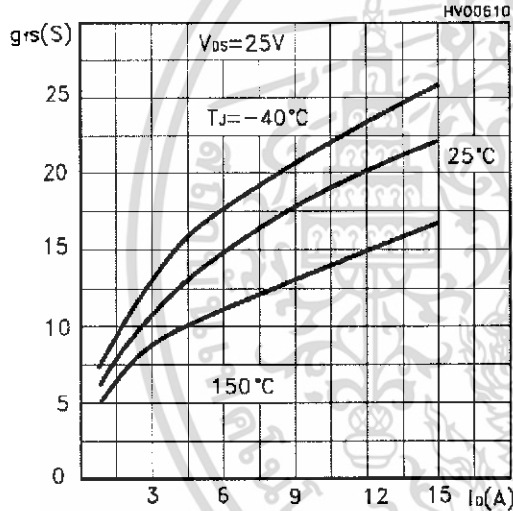
Output Characteristics



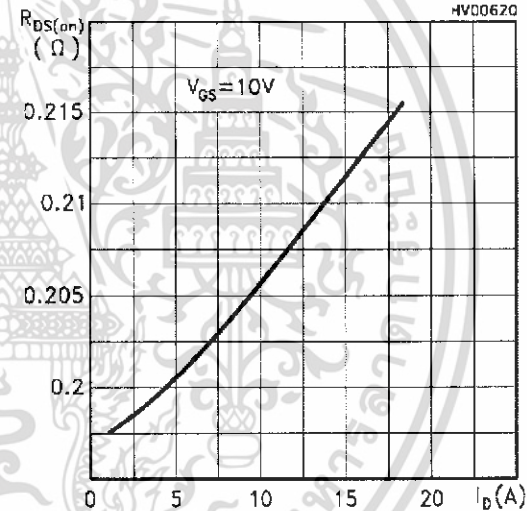
Transfer Characteristics



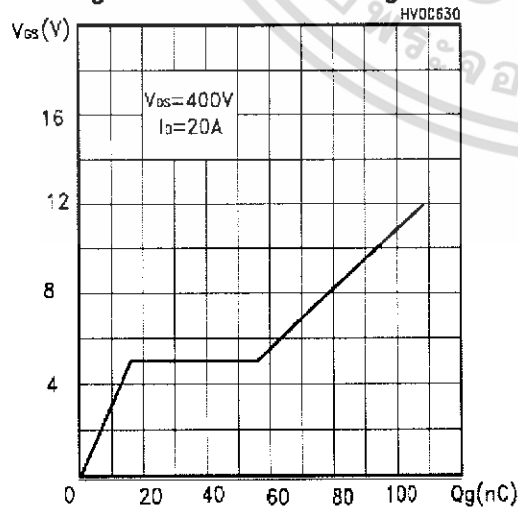
Transconductance



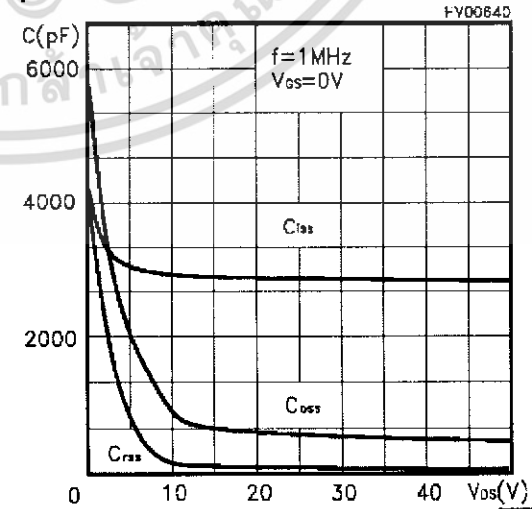
Static Drain-source On Resistance



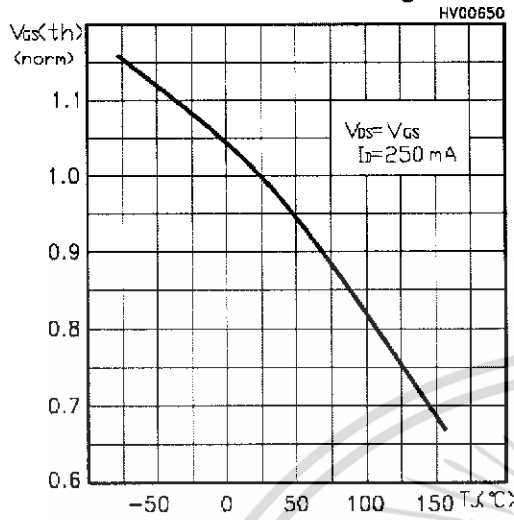
Gate Charge vs Gate-source Voltage



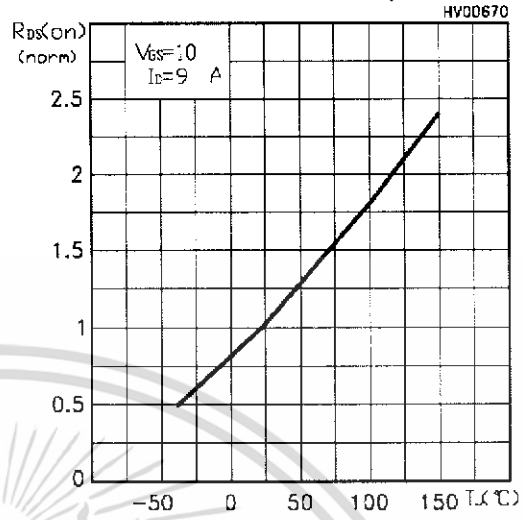
Capacitance Variations



Normalized Gate Threshold Voltage vs Temp.



Normalized On Resistance vs Temperature



Source-drain Diode Forward Characteristics

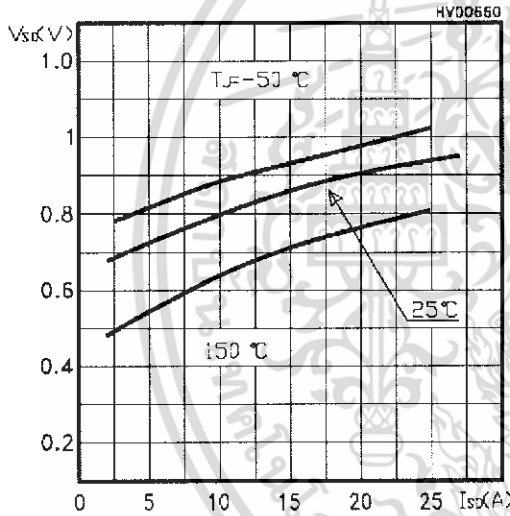


Fig. 1: Unclamped Inductive Load Test Circuit

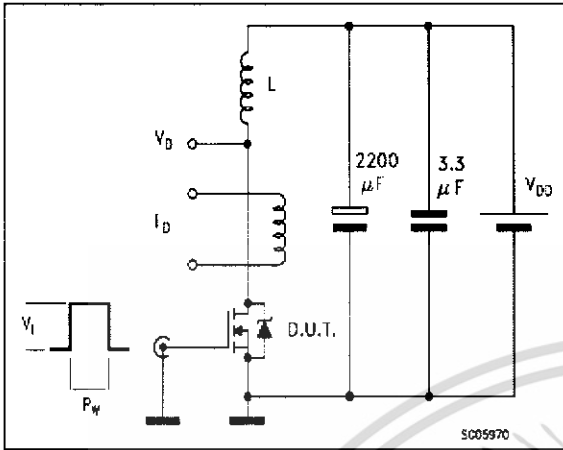


Fig. 2: Unclamped Inductive Waveform

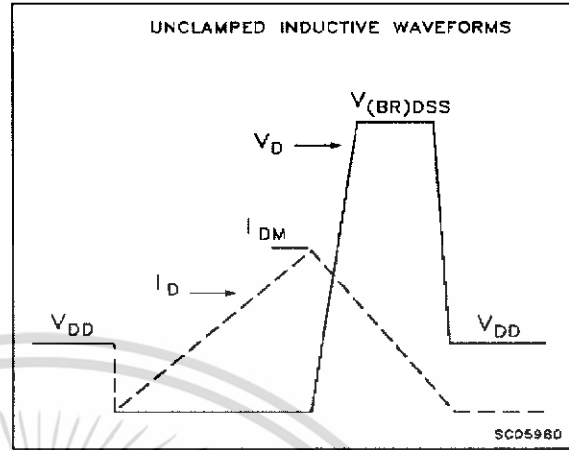


Fig. 3: Switching Times Test Circuit For Resistive Load

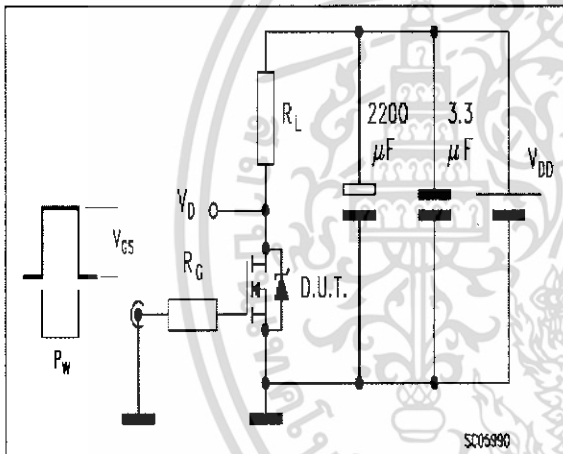


Fig. 4: Gate Charge test Circuit

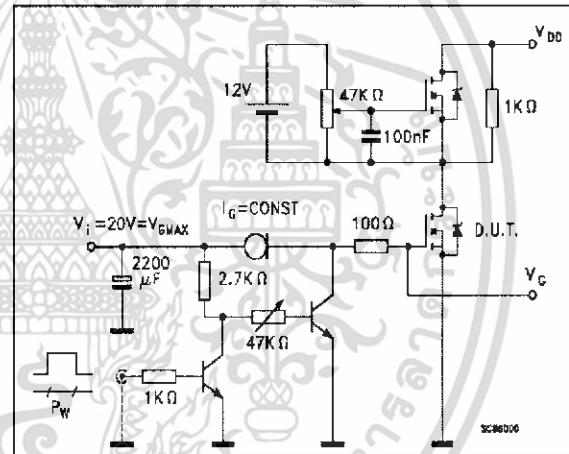
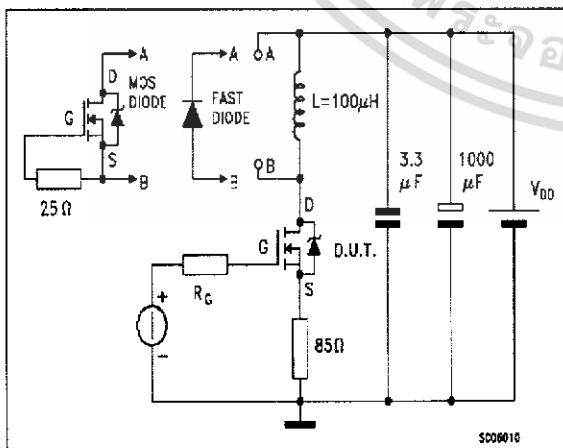
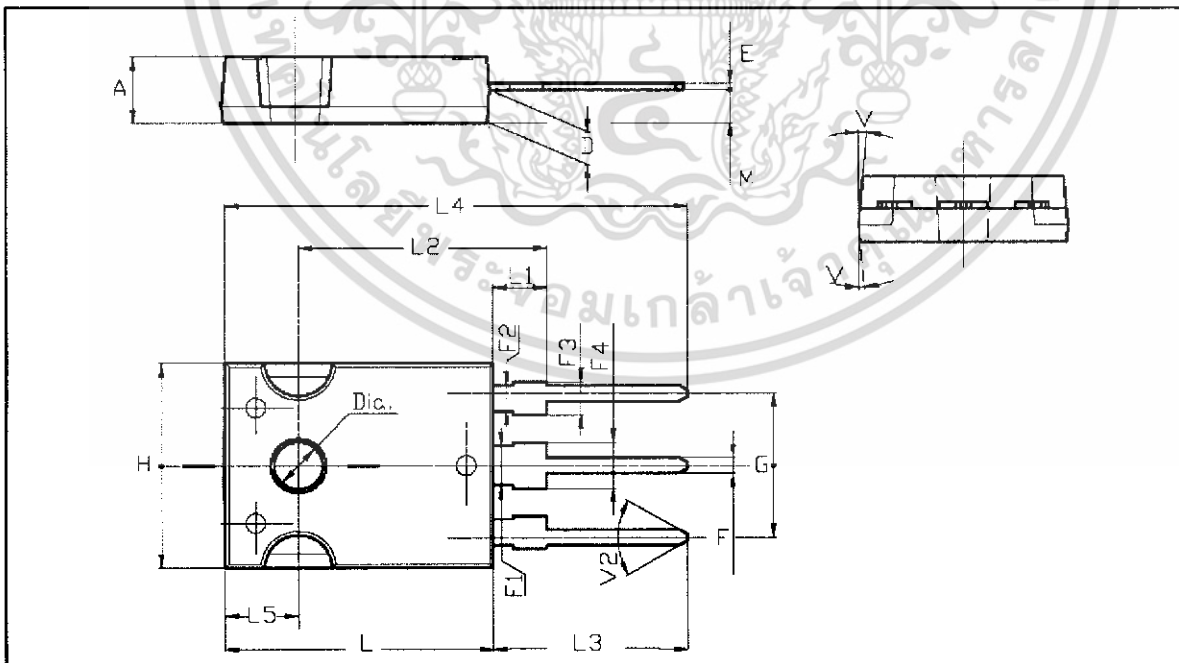


Fig. 5: Test Circuit For Inductive Load Switching And Diode Recovery Times



## TO-247 MECHANICAL DATA

DIM.	mm.			inch		
	MIN.	TYP	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.85		5.15	0.19		0.20
D	2.20		2.60	0.08		0.10
E	0.40		0.80	0.015		0.03
F	1		1.40	0.04		0.05
F1		3			0.11	
F2		2			0.07	
F3	2		2.40	0.07		0.09
F4	3		3.40	0.11		0.13
G		10.90			0.43	
H	15.45		15.75	0.60		0.62
L	19.85		20.15	0.78		0.79
L1	3.70		4.30	0.14		0.17
L2		18.50			0.72	
L3	14.20		14.80	0.56		0.58
L4		34.60			1.36	
L5		5.50			0.21	
M	2		3	0.07		0.11
V		5°			5°	
V2		60°			60°	
Dia	3.55		3.65	0.14		0.143





Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specification mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a trademark of STMicroelectronics

© 2000 STMicroelectronics - Printed in Italy - All Rights Reserved  
STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco -  
Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - U.S.A.

<http://www.st.com>

This datasheet has been download from:

[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)

Datasheets for electronics components.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TLP250

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

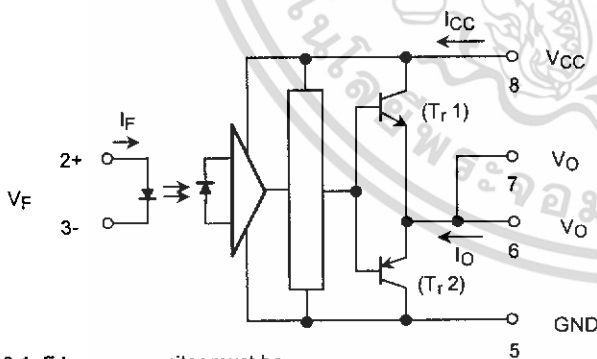
The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.  
 This unit is 8-lead DIP package.  
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current:  $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current ( $I_{CC}$ ):  $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage ( $V_{CC}$ ):  $10\text{--}35\text{V}$
- Output current ( $I_O$ ):  $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time ( $t_{pLH}/t_{pHL}$ ):  $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage:  $2500\text{V}_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type  
 VDE approved: DIN VDE0884/06.92,certificate No.76823  
 Maximum operating insulation voltage:  $630\text{V}_{\text{PK}}$   
 Highest permissible over voltage:  $4000\text{V}_{\text{PK}}$

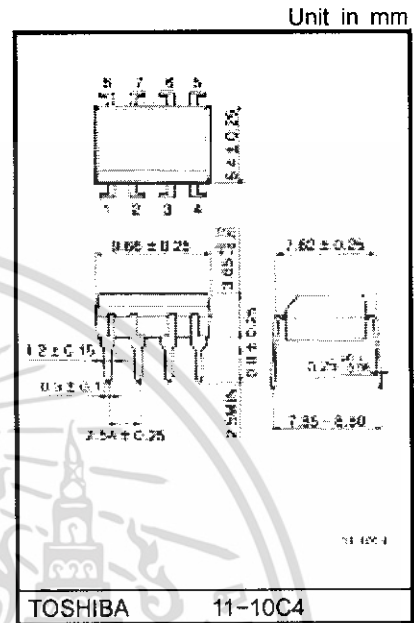
**(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"**

- Creepage distance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$   
 Clearance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$

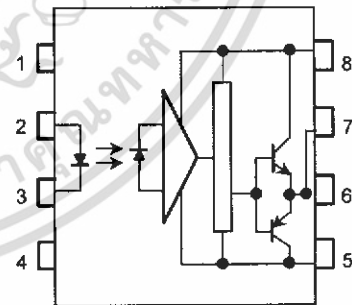
**Schematic**



A  $0.1\mu\text{F}$  bypass capacitor must be connected between pin 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**

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

สงวนลิขสิทธิ์ © 2004 โดย บริษัท ทOSHIBA อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด. การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	$I_F$	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	$I_{FPT}$	1	A	
	Reverse voltage	$V_R$	5	V	
	Junction temperature	$T_j$	125	°C	
Detector	"H" peak output current ( $P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$ ) (Note 2)	$I_{OPH}$	-1.5	A	
	"L" peak output current ( $P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$ ) (Note 2)	$I_{OPL}$	+1.5	A	
	Output voltage	(Ta ≤ 70°C)	$V_O$	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Supply voltage	(Ta ≤ 70°C)	$V_{CC}$	35	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	$T_{opr}$	-20~85	°C		
Storage temperature range	$T_{stg}$	-55~125	°C		
Lead soldering temperature (10 s) (Note 4)	$T_{sol}$	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 5)	$BV_S$	2500	Vrms		

Note 1: Pulse width  $P_W \leq 1\mu s$ , 300pps

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform,  $I_{OPH} \leq -1.0A (\leq 2.5\mu s)$ ,  $I_{OPL} \leq +1.0A (\leq 2.5\mu s)$

Note 4: It is 2 mm or more from a lead root.

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

Note 6: 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 (Note 7)	$I_{F(ON)}$	7	8	10	mA
Input voltage, off	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8	V
Supply voltage	$V_{CC}$	15	—	30   20	V
Peak output current	$I_{OPH}/I_{OPL}$	—	—	±0.5	A
Operating temperature	$T_{opr}$	-20	25	70   85	°C

Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs.

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

Characteristic	Symbol	Test Cir-cuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit	
Input forward voltage	V <sub>F</sub>	—	I <sub>F</sub> = 10 mA, Ta = 25°C		1.6	1.8	V	
Temperature coefficient of forward voltage	ΔV <sub>F</sub> / ΔTa	—	I <sub>F</sub> = 10 mA	—	-2.0	—	mV / °C	
Input reverse current	I <sub>R</sub>	—	V <sub>R</sub> = 5V, Ta = 25°C		—	10	μA	
Input capacitance	C <sub>T</sub>	—	V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF	
Output current	"H" level	I <sub>OPH</sub>	3	V <sub>CC</sub> = 30V (*1) I <sub>F</sub> = 10 mA V <sub>8-6</sub> = 4V	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level	I <sub>OPL</sub>	2		I <sub>F</sub> = 0 V <sub>6-5</sub> = 2.5V	0.5	2	
Output voltage	"H" level	V <sub>OH</sub>	4	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, I <sub>F</sub> = 5mA	11	12.8	—	V
	"L" level	V <sub>OL</sub>	5	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>F</sub> = 0.8V	—	-14.2	-12.5	
Supply current	"H" level	I <sub>CCH</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
				V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA	—	—	11	
	"L" level	I <sub>CCL</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—	
				V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 0mA	—	—	11	
Threshold input current	"Output L→H"	I <sub>FLH</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> > 0V	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L"	I <sub>FHL</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> < 0V	0.8	—	—	V
Supply voltage	V <sub>CC</sub>	—	—	10	—	35	V	
Capacitance (input-output)	C <sub>S</sub>	—	V <sub>S</sub> = 0, f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF	
Resistance(input-output)	R <sub>S</sub>	—	V <sub>S</sub> = 500V, Ta = 25°C R.H. ≤ 60%	1×10 <sup>12</sup>	10 <sup>14</sup>	—	Ω	

\* All typical values are at Ta = 25°C (\*1): Duration of I<sub>O</sub> time ≤ 50μs

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

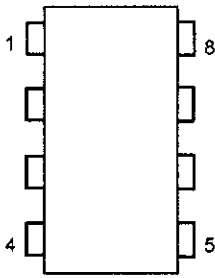
Characteristic	Symbol	Test Cir-cuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Propagation delay time	L→H	$t_{pLH}$	6 $I_F = 8mA$ (Note 7) $V_{CC1} = +15V, V_{EE1} = -15V$ $R_L = 200\Omega$	—	0.15	0.5	$\mu s$
	H→L	$t_{pHL}$		—	0.15	0.5	
Output rise time	$t_r$			—	—	—	
Output fall time	$t_f$			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output	$C_{MH}$	7	$V_{CM} = 600V, I_F = 8mA$ $V_{CC} = 30V, T_a = 25^\circ C$	-5000	—	—	V / $\mu s$
Common mode transient immunity at low level output	$C_{ML}$	7	$V_{CM} = 600V, I_F = 0mA$ $V_{CC} = 30V, T_a = 25^\circ C$	5000	—	—	V / $\mu s$

\* All typical values are at Ta = 25°C

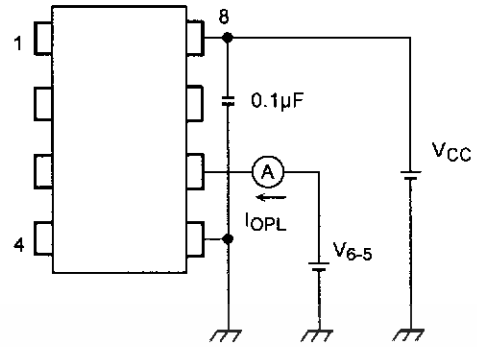
Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5  $\mu s$ .



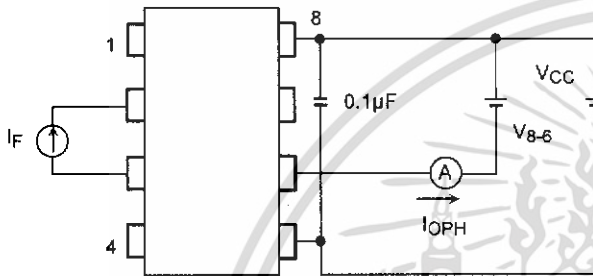
Test Circuit 1 :



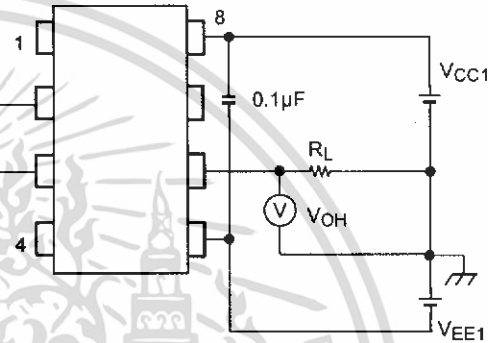
Test Circuit 2 : IOPL



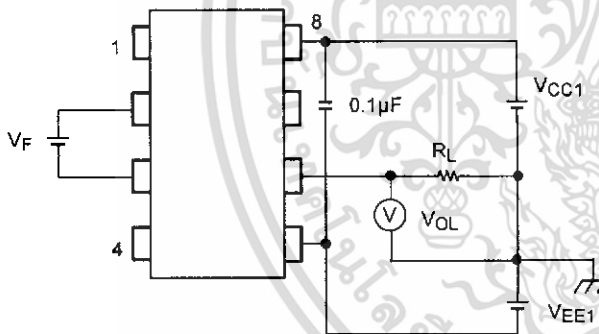
Test Circuit 3 : IOPH



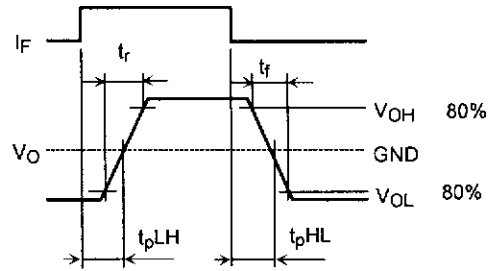
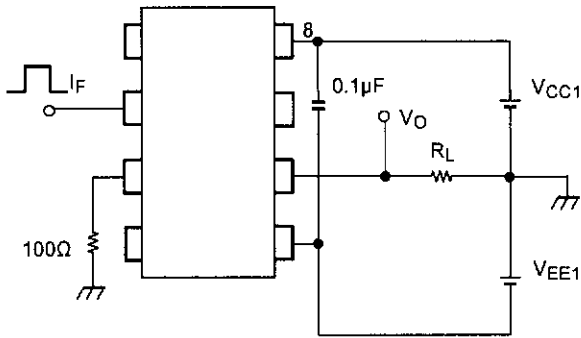
Test Circuit 4 : VOH



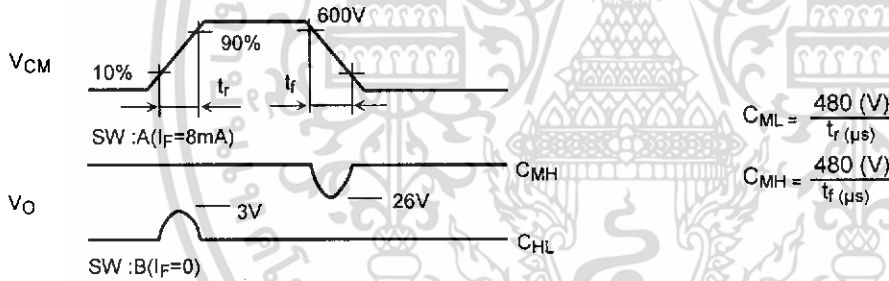
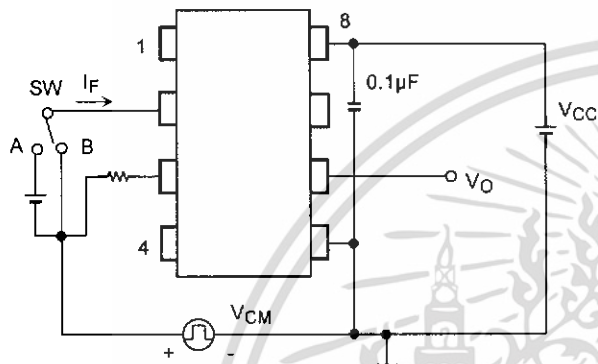
Test Circuit 5 : VOL



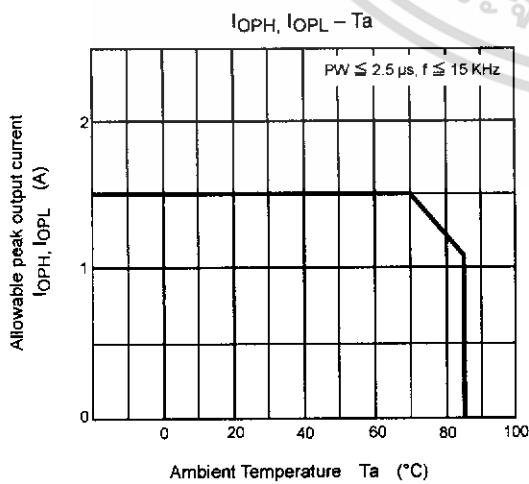
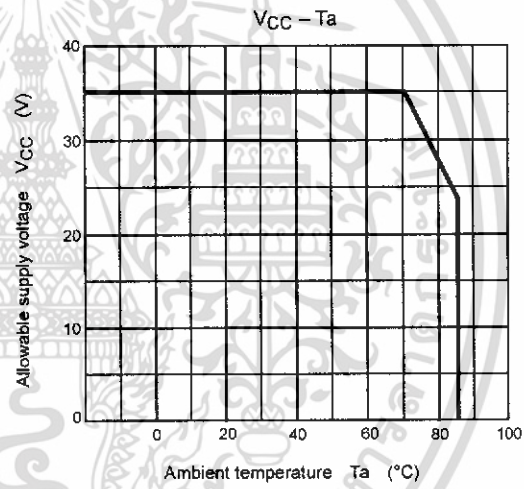
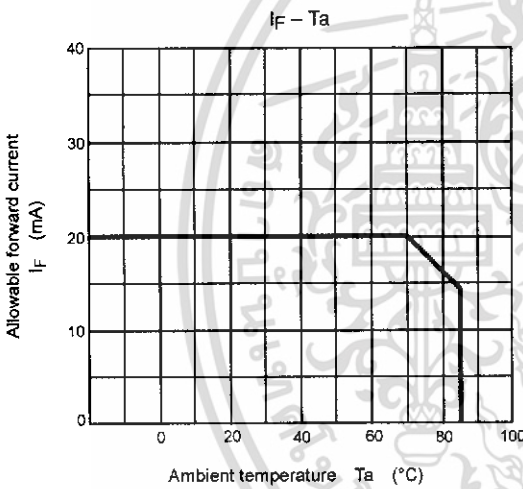
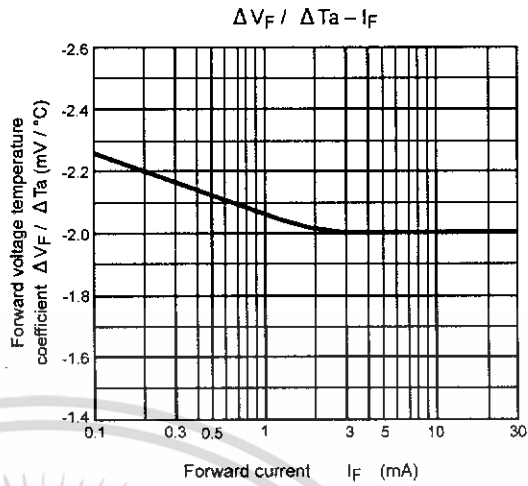
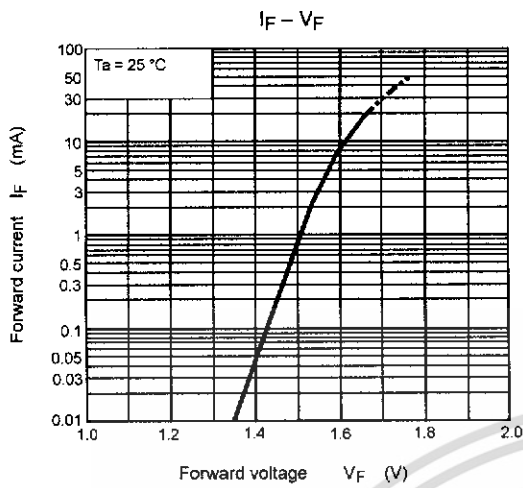
Test Circuit 6:  $t_{pLH}$ ,  $t_{pHL}$ ,  $t_r$ ,  $t_f$



Test Circuit 7:  $C_{MH}$ ,  $C_{ML}$



$C_{ML}(C_{MH})$  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.



## RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

- The information contained herein is subject to change without notice.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA for any infringements of patents or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of TOSHIBA or others.
- 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.
- The products described in this document are subject to the foreign exchange and foreign trade laws.
- TOSHIBA products should not be embedded to the downstream products which are prohibited to be produced and sold, under any law and regulations.
- GaAs(Gallium Arsenide) is used in this product. The dust or vapor is harmful to the human body. Do not break, cut, crush or dissolve chemically.