

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง
เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความร้อนใช้อินเวอร์เตอร์แบบไม่สมมาตร
Induction Heating Using Asymmetry Phase Shift Inverter



ร/พ.
๗๒๑๖๓
๒๕๔๙

เลขหมู่.....๗๒๑๗๙.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี..... 26 ส.ย. 2550

b. 11๗๗๕๘๑๓
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความร้อนใช้อินเวอร์เตอร์แบบไม่สมมาตร
Induction Heating Using Asymmetry Phase Shift Inverter



รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความร้อนใช้อินเวอร์เตอร์แบบไม่สมมาตร

ผู้จัดทำ

1. นาย จักรกฤษณ์ ซอสันเทียะ
2. นาย ชวาล เกษรศิริ
3. นาย นวพันธุ์ เชียงอุทัย



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความร้อนใช้อินเวอร์เตอร์แบบไม่สมมาตร

นาย จักรกฤษณ์ ซอสันเทียะ

นาย ชวาล เกษรศิริ

นาย นวพันธ์ เชียงอุทัย

รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอหลักการวิเคราะห์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมของอินเวอร์เตอร์ ความถี่สูงและมีการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยการ เลื่อนเฟสแบบไม่สมมาตร โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ซึ่งทำให้แรงดันทางด้าน เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีลักษณะแรงดันเป็น แรงดันคลื่นสี่เหลี่ยม เพื่อป้อนให้กับโหลด RLC เรโซแนนซ์แบบอนุกรมของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงซึ่งจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ การถ่ายเทกำลังไฟฟ้า ซึ่งคลื่นแรงดันและกระแสอินพุตนำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า ทางด้านอินพุต คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตนำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าทางด้าน เอาต์พุต และอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตต่อกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตก็จะ สามารถนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบใช้อินเวอร์เตอร์ไม่สมมาตรได้ เพื่อยืนยันความถูกต้องจึงทำการเปรียบเทียบผลจากการทดลอง กับผลที่ได้จากการจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม Pspice ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Induction Heating Using Asymmetry Phase Shift Inverter

Chakkrit Cowsantaeh

Chawan Kasensiri

Nawapun Chiengutai

Assoc.Prof. Dr. Viriya Pritchajamroen Advisor

2006

ABSTRACT

The Thesis presents an analysis of high-frequency series resonant inverter and ac power control by using a full-bridge Asymmetry Phase-shift control. Output voltage waveform of the inverter is an Ac-Square wave which is used to supply high frequency RLC resonant induction heating. The power transfer characteristics of the proposed induction heater is analyzed in details and verified by experiment. The input power and output voltage and current waveform are also used to calculate the input power and finally the ratio of output power to input power can determine the efficiency of high-frequency induction heating. All the experimental result obtained in the thesis are also verified by Pspice simulation , it is obvious that the two results are almost the same.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ได้สำเร็จลุล่วงได้ดีตามวัตถุประสงค์ ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษา
เกี่ยวกับการศึกษาและการทดลอง จาก รศ.ดร. วิริยะ พิเชษฐจำเริญ
ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ทำให้รู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและ
ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้มีความรู้ นอกเหนือจากนั้นต้อง
ขอขอบคุณ พี่ยังยุทธ นาราชฎร์ พี่เทพ พี่เอ็ม พี่โหน่ง พี่โจ พี่หนึ่ง และพี่ๆ นักศึกษา
ปริญญาโทที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ รวมถึงเพื่อนๆ ทุกคนในห้องโปรเจกต์ที่คอยให้เยี่ยมอุปการณ
พูดคุย หยอกล้อกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 พื้นฐานการชุบแข็งเหล็กด้วยการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ความถี่สูง .	4
2.1 บทนำ	4
2.2 พื้นฐานการชุบผิวแข็งเหล็กด้วยวิธีการให้ความร้อนจน เหล็กเปลี่ยนโครงสร้างและลดความร้อนอย่างรวดเร็ว	4
2.3 พื้นฐานการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ ทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	4
2.4 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน	6
2.5 พื้นฐานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ	8
2.6 รูปแบบของ อินเวอร์เตอร์สำหรับงานการให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ	9
2.7 หลักการทำงานของวงจรชุด Induction Heating	14
บทที่ 3 การออกแบบแหล่งจ่ายให้ความร้อน แบบเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	18
3.1 บทนำ	18
3.2 วงจรให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์อนุกรม	18
3.3 การพิจารณาออกแบบหม้อแปลงสำหรับงานด้านการเหนี่ยวนำ ความร้อนความถี่สูง	28
3.4 การพิจารณาออกแบบและเลือกใช้ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน	33

บทที่ 4 ผลการทดลองและซีมูเลต 35

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 63

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของเหล็กกับอุณหภูมิ	5
2.2 วงจรสมมูลของไหลที่พิจารณาด้วยวงจรสมมูลของหม้อแปลง.....	6
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใช้งานกับพิกัดกำลังไฟฟ้า สำหรับอุปกรณ์สวิตช์แต่ละชนิด	8
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างย่านความถี่ใช้งานกับพิกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้า สำหรับงานให้ความร้อน.....	9
2.5 โครงสร้างโดยทั่วไปของแหล่งจ่ายให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำความร้อน.....	10
2.6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับแรงดันได้.....	10
2.7 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับกระแสได้.....	11
2.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับกระแสได้.....	11
2.9 แหล่งจ่ายแรงดัน	11
2.10 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม.....	12
2.11 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน.....	13
2.12 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมและขนาน.....	13
2.13 วงจรกำลังของแหล่งจ่ายให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง	14
2.14 ลักษณะการทำงานที่โหมดต่างๆ.....	15
2.15 โหมดการทำงานของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	16
3.1 เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับ งานการให้ความร้อนโดยความถี่สูง	19
3.2 วงจรกำลังของแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ แบบเรโซแนนซ์ 494	19
3.3 แสดงวงจรของ TL วงจร TL 494	20
3.4 แสดงสัญญาณ Input ของนอร์มัลกรวม.....	21
3.5 แสดงสัญญาณ Output ของวงจร TL 494	21
3.6 แสดงวงจรของ CD 4009	22
3.7 แสดงสัญญาณ Input ของวงจร CD 4009	22
3.8 แสดงสัญญาณ Output ของวงจร CD 4009	23
3.9 แสดงวงจรของ CD 4528	24
3.10 แสดงสัญญาณ Input ของวงจร CD 4528	24
3.11 แสดงสัญญาณ Output ของวงจร CD 4528	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12 ภาพรวม วงจรสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์.....	25
3.13 สัญญาณขับ gate Power Mosfet S1,S2	26
3.14 สัญญาณขับ gate Power Mosfet S1,S4	26
3.15 สัญญาณขับ gate Power Mosfet S2,S3	27
3.16 สัญญาณขับ gate Power Mosfet S2,S4	27
3.17 ลักษณะรูปทรงแกนเฟอร์ไรต์แบบต่างๆที่มีใช้งานโดยทั่วไป	31
4.1 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 120 องศา.....	35
4.2 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุท ของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 120 องศา	35
4.3 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 120 องศา.....	35
4.4 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 110 องศา.....	36
4.5 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 110 องศา.....	36
4.6 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 110 องศา.....	36
4.7 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลอง และการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 100 องศา.....	37
4.8 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 100 องศา.....	37
4.9 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 100 องศา.....	37
4.10 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลอง และการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 90 องศา.....	38
4.11 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมเลื่อนเฟส 90 องศา.....	38
4.12 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 90 องศา.....	38
4.13 คลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 80 องศา	39
4.14 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 80 องศา.....	39
4.15 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 80 องศา.....	39
4.16 คลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 70 องศา.....	40
4.17 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 70 องศา.....	40
4.18 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 70 องศา.....	40
4.19 คลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 60 องศา.....	41
4.20 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 60 องศา.....	41
4.21 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 60 องศา.....	41
4.22 คลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 50 องศา.....	42
4.23 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 50 องศา.....	42
4.24 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุทของ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 50 องศา.....	42
4.25 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulationที่มุมเลี้ยวเฟส 40 องศา.....	43
4.26 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation มุมเลี้ยวเฟส 40 องศา	43
4.27 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 40 องศา.....	43
4.28 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulationที่มุมเลี้ยวเฟส 30 องศา.....	44
4.29 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation.....	44
4.30 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแส ทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 30 องศา.....	44
4.31 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 20 องศา.....	45
4.32 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 20 องศา.....	45
4.33 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 20 องศา.....	45
4.34 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulationที่มุมเลี้ยวเฟส 10 องศา	46
4.35 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 10 องศา.....	46
4.36 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 10 องศา.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.37	คลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulationที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา	47
4.38	ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา.....	47
4.39	ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulation ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา.....	47
4.40	ที่ C Blocking ณ มุม 60 องศา.....	48
4.41	ที่ C Blocking ณ มุม 90 องศา.....	48
4.42	ที่ C Blocking ณ มุม 120 องศา.....	48
4.43	ที่ C Blocking ณ มุม 150 องศา.....	48
4.44	ที่ C Blocking ณ มุม 180 องศา.....	48
4.45	คลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulationที่มุมเลื่อนเฟส 120 องศา	49
4.46	ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 120 องศา.....	49
4.47	ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 120 องศา.....	49
4.48	คลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulation ที่มุมเลื่อนเฟส 110 องศา.....	50
4.49	ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 110 องศา.....	50
4.50	ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 110 องศา.....	50
4.51	คลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 100 องศา.....	51
4.52	ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 100 องศา.....	51

4.53 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 100 องศา.....	51
4.54 คลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 90 องศา.....	52
4.55 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 90 องศา.....	52
4.56 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 90 องศา.....	52
4.57 คลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 80 องศา.....	53
4.58 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 80 องศา.....	53
4.59 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 80 องศา.....	53
4.60 คลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 70 องศา.....	54
4.61 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 70 องศา.....	54
4.62 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 70 องศา.....	54
4.63 คลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 60 องศา.....	55
4.64 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลี้ยวเฟส 60 องศา.....	55
4.65 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation	

ที่มุมเลื่อนเฟส 60 องศา.....	55
4.66 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 50 องศา.....	56
4.67 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 50 องศา.....	56
4.68 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 50 องศา.....	56
4.69 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 40 องศา.....	57
4.70 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางต้านอินพุทของ Induction Heating ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 40 องศา.....	57
4.71 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางต้านอินพุทของ Induction Heating ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 40 องศา.....	57
4.72 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 30 องศา.....	58
4.73 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางต้านอินพุทของ Induction Heating ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 30 องศา.....	58
4.74 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางต้านอินพุทของ Induction Heating ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 30 องศา.....	58
4.75 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 20 องศา.....	59
4.76 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางต้านอินพุทของ Induction Heating ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 20 องศา.....	59
4.77 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางต้านอินพุทของ Induction Heating ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 20 องศา.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.78	คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 10 องศา.....	60
4.79	ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 10 องศา.....	60
4.80	ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation มุมเลื่อนเฟส 10 องศา	60
4.81	คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา.....	61
4.82	ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา.....	61
4.83	ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา.....	61
4.84	กราฟค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับ การ simulation โดยการปรับมุมเลื่อนเฟส	62
4.85	กราฟค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุทเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับ การ simulation โดยการปรับมุมเลื่อนเฟส.....	62
4.86	ประสิทธิภาพ ของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในงานด้านการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Heating) ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่สูงนั้น ในปัจจุบันนิยมใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด ที่เป็นวงจร เรโซแนนซ์ โดยชิ้นงานซึ่งส่วนมากจะเป็นสาร Ferro Magnetic จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในกระบวนการให้ความร้อน ซึ่งในช่วงเวลาเกิดความร้อนนี้ ชิ้นงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก เช่น ความต้านทานและความเหนี่ยวนำ โดยเฉพาะเมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงจุด Curie Temperature มีผลทำให้อิมพีแดนซ์ของชิ้นงานลดลงอย่างมาก และทำให้อินเวอร์เตอร์ที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานต้องรับภาระการจ่ายไฟฟ้ามากขึ้นซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่กำลังศึกษาอยู่เป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) ซึ่งโดยปกติตัวมันเองไม่สามารถควบคุมกำลังงานที่จ่ายไปยังโหลดได้ ดังนั้นในการใช้งานเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดโดยทั่วไปมีอยู่ 3 วิธี

1. แบบ PAM (Pulse Amplitude Modulation) เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดย การปรับแรงดันเชื่อมโยงกระแส DC (DC link) โดยใช้ Thyristorized Phase Controlled Rectifier หรือใช้ Chopper ซึ่งวิธีนี้จะมีผลทำให้เกิด Harmonic Noise ใน Line มาก อีกทั้งตัวประกอบกำลังที่ค่าต่ำ การตอบสนองในการปรับแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงเป็นไปได้ช้า และยังมีต้นทุนรวมที่สูง เนื่องจากชุดควบคุมแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงอีกด้วย
2. แบบ PFM (Pulse Frequency Modulation) เป็นการควบคุมกำลังงานโดยการปรับความถี่ อินเวอร์เตอร์จะสามารถควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะ ZVS (Zero Voltage Switching) ซึ่งจะทำให้ไม่มีการสูญเสียขณะ Turn on Switch แต่จะยากในการปรับความถี่เพื่อจ่ายกำลังงานในย่านที่กว้าง และอินเวอร์เตอร์จะมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อต้องจ่ายกำลังงานในระดับต่ำ
3. แบบ Asimmetrical Controlled เป็นการควบคุมกำลังงานโดยการปรับปริมาตรแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงด้านออกของอินเวอร์เตอร์ด้วยหลักการเลื่อนเฟสสัญญาณกึ่งหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ซึ่งวิธีนี้มีผลทำให้เกิด Harmonic ใน Line มีระดับต่ำระบบจะตอบสนองเร็ว แต่เมื่อปรับมุมเฟสเลื่อนเพิ่มมากขึ้นจะเกิดปัญหาที่ไดโอดคร่อมสวิตช์คร่อมอินเวอร์เตอร์ เกิด EMI noise และเกิดกำลังงานสูญเสียเนื่องจากสวิตช์ (switching losses) มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

จากวิธีการควบคุมกำลังงานทั้ง 3 แบบข้างต้นนั้นแต่ละวิธีจะมีคุณลักษณะของระบบการทำงานที่มีส่วนดีและส่วนเสียที่แตกต่างกัน แนวทางในการศึกษาและพัฒนาโดยนำส่วนดีที่มีอยู่แต่ละแบบมาใช้ร่วมกันในการควบคุมกำลังงานเพื่อให้ระบบมีคุณลักษณะการทำงานที่ดี

1. การควบคุมกำลังแบบควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ต้องมี Chopper หรือ Thyristorized Phase Controlled Rectifier ซึ่งเป็นชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ซูดอินเวอร์เตอร์ได้จะทำให้ขนาดของเครื่องลดลงได้
2. การควบคุมกำลังในแบบ PFM สามารถควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงานอยู่ในสภาวะ ZVS และจะทำให้อินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีย่านความถี่ใช้งานที่ไม่กว้างมาก
3. การควบคุมกำลังในแบบ Asimmetrical Controlled มีลักษณะการควบคุมกำลังโดยการควบคุมปริมาณแรงดันซึ่งคล้ายกับแบบ PAM แต่มีจุดเด่นที่สามารถควบคุมกำลังได้โดยตรงที่ตัวอินเวอร์เตอร์แต่ความถี่ใช้งานจะถูกจำกัดเนื่องจากผลของ Switching Losses

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. ศึกษาการใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้า
2. สร้างเครื่องมือควบคุมกำลังไฟฟ้า (อินเวอร์เตอร์)
3. ศึกษาหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่สูง
4. ศึกษาวิธีการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า
5. ศึกษาวิธีการสร้างวงจร รีโซแนนซ์ (ชุดโหลด)

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงว่ามีหลักการเกิดอย่างไร
2. ศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กความถี่สูงว่ามีผลอย่างไรกับแท่งเหล็ก
3. ศึกษาการเกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูงที่เกิดขึ้นในขดลวดเหนี่ยวนำ
4. ออกแบบสร้างเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กความถี่สูง
5. ทดสอบเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นและเก็บข้อมูล
6. ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองและนำมาปรับปรุง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถเข้าใจทฤษฎีการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง
2. ทำให้สามารถมีความเข้าใจในหลักการให้ความร้อนโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าความถี่สูง
3. เพื่อที่จะสามารถผลที่ได้มาเป็นแนวทางในการวิจัยเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก
4. มีความสามารถในการใช้โปรแกรม MATH LAB ในการหาค่าสนามไฟฟ้า
5. สามารถนำ IC มาประยุกต์ใช้ในการสร้างสัญญาณได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

พื้นฐานการชุบแข็งเหล็กด้วยการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ ความถี่สูง

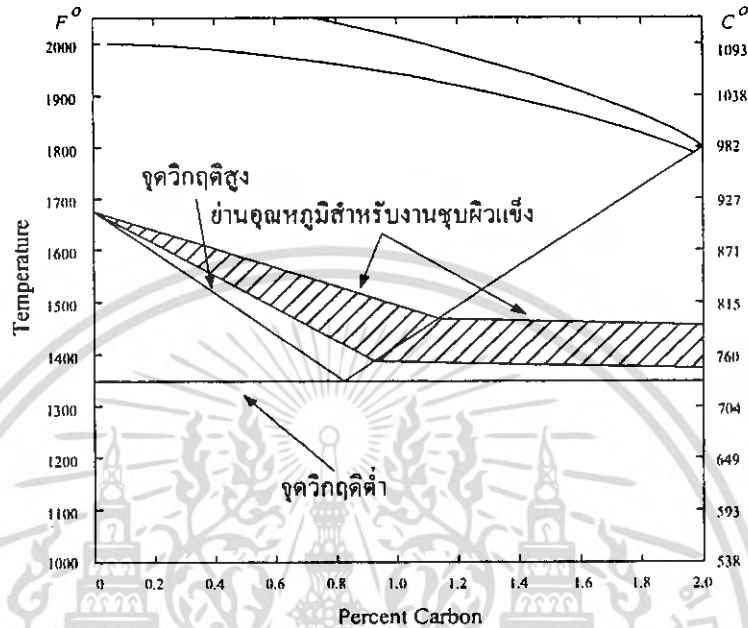
2.1 บทนำ

พื้นฐานการชุบแข็งผิวเหล็กด้วยความร้อนนั้นมีหลายวิธีที่สามารถใช้ในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานไม่ว่าจะเป็นการใช้ไฟฟ้า เผาด้วยไฟจากแก๊ส เตาเผา fluidizing bed อินฟราเรด และแบบเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อด้อยในตัว ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความถี่สูงได้รับความนิยมสูงสุด เหตุผลหลักที่ทำให้การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำได้รับความนิยมสูงสุดคือความสามารถที่จะทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนเฉพาะบริเวณที่ต้องการได้ ในเวลาที่รวดเร็ว โดยเหตุผลนี้ทำให้ชิ้นงานจากการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้มีคุณภาพสูง และกระบวนการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้ยังทำให้เกิดการใช้กำลังไฟฟ้าซึ่งมีประสิทธิภาพที่สูง มลภาวะต่างๆ เช่น เสียงดัง ควันพิษ จะน้อยกว่าแหล่งจ่ายแบบอื่นๆ และการให้ความร้อนในแบบนี้ยังใช้เวลาในการเริ่มต้นและหยุดกระบวนการที่รวดเร็วกว่าแบบอื่นๆ เนื่องจากเป็นการให้ความร้อนเฉพาะที่ และยังลดต้นทุนในการจ้างพนักงานในการควบคุมกระบวนการ และยังใช้พื้นที่ในการวางตัวเครื่องน้อยใช้เวลาในการให้ความร้อนน้อยด้วย โดยระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนจะขึ้นกับลักษณะการประยุกต์ใช้งาน และไม่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของรูปทรงชิ้นงาน โดยปกติความบิดเบี้ยวของรูปทรงชิ้นงานจะเกิดขึ้นเมื่อโลหะถูกทำให้ร้อนขึ้น การชุบแข็งโดยการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำมีคุณลักษณะที่ทำให้โครงสร้างชิ้นงานมีเสถียรภาพดี ความเพี้ยนที่เกิดขึ้นน้อยเนื่องจากการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้จะใช้เวลาสั้นและรวดเร็วและจะทำเฉพาะจุดที่ต้องการ จึงทำให้แกนในของชิ้นงานยังคงเย็นอยู่และรูปทรงของชิ้นงานยังคงมีเสถียรภาพที่ดีดังเดิม

2.2. พื้นฐานการชุบแข็งเหล็กด้วยวิธีการให้ความร้อนจนเหล็กเปลี่ยนโครงสร้างและลดความร้อนอย่างรวดเร็ว

กรรมวิธีในการชุบแข็งเหล็กนั้นในทางอุตสาหกรรมสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนแก่เหล็กจนมีอุณหภูมิสูงถึงจุดวิกฤติต่ำหรือประมาณ Curie temperature ($720-840^{\circ}\text{C}$) [1], ซึ่งที่จุดนี้เมื่อนำเหล็กไปลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะทำให้เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในซึ่งจะทำให้บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วนี้มีความแข็งเพิ่มขึ้นซึ่งย่านอุณหภูมิที่ใช้ในกรรมวิธีการชุบแข็งเหล็กสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.1 ซึ่งได้แสดงให้เห็นย่านของอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่เหล็กก่อนเข้าสู่กระบวนการทำให้เกิดความแข็งโดยการลดความร้อน (Quenching) โดยในการให้ความร้อนจะต้องให้แก่เหล็กในช่วงอุณหภูมิ ที่สูงกว่า

จุดวิกฤติต่ำ (Lower Critical Point) ซึ่งคือจุดที่เหล็กเริ่มเปลี่ยนโครงสร้างเช่นเดียวกับน้ำที่จะมีการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นไอเมื่ออุณหภูมิถึงจุดเดือดที่ 100°C ส่วนจุดวิกฤติสูง (Upper Critical Point) ของเหล็กจะมีระดับที่แตกต่างกันตามชนิดของเหล็ก



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของเหล็กกับอุณหภูมิ

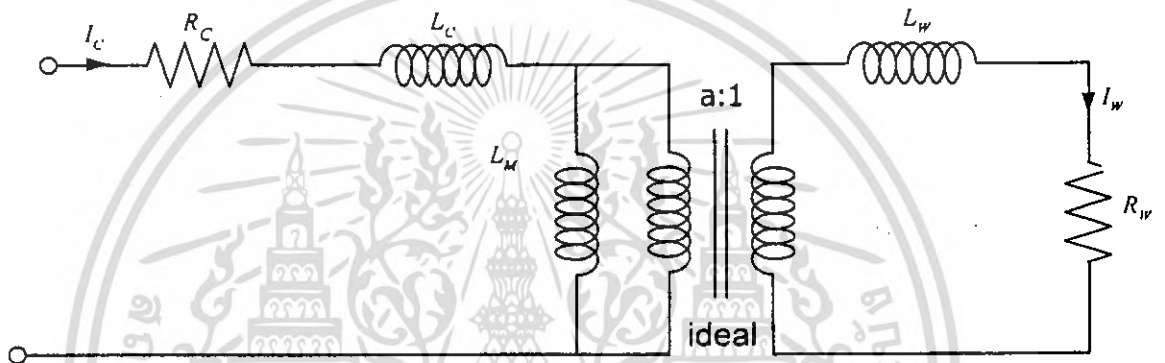
2.3 พื้นฐานการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการชุบแข็ง คือกระบวนการให้ความร้อนในวัสดุตัวนำไฟฟ้า โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดมาจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่สูงให้ไหลกลับไปกลับมาภายในตัวชิ้นงานโลหะดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีค่าความต้านทานภายในตัวชิ้นงานทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในบริเวณที่มีกระแสไหล โดยจะมีหลักการพิจารณาเช่นเดียวกับหม้อแปลง นั่นคือเมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่พันอยู่รอบ ที่ชิ้นงานโลหะ ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Magnetic Flux) กับชิ้นงานโลหะ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องกับชิ้นงานโลหะจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) โดยกระแสดังกล่าวจะไหลในลักษณะเป็นเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวชิ้นงานโลหะ และเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่สูงดังนั้นจึงเกิดผลของ Skin Effect ซึ่งจะทำให้กระแสไหลเฉพาะบริเวณผิวด้านนอกของชิ้นงานโลหะ โดยความลึกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในตัวชิ้นงานนี้จะขึ้นกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหล ซึ่งจะเป็นความถี่เดียวกับความถี่ป้อนเข้าในขดลวดที่พันรอบชิ้นงาน ดังนั้นปริมาณกระแสที่ไหลในแท่งเหล็กจะเท่ากับปริมาณกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำคูณกับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

2.4 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนซึ่งมีแท่งเหล็กหรือชิ้นงานสอดอยู่ภายในขดลวดเหนี่ยวนำสามารถเขียนในรูปของหม้อแปลงที่ทางด้านทุติยภูมิมีจำนวนรอบ 1 รอบและถูกลัดวงจรไว้โดยมี R_w เป็นค่าความต้านทานบริเวณผิวของแท่งเหล็กที่มีกระแสไหลวนตั้งรูปที่ 2.2 เมื่อทำการ ย้ายค่าตัวแปร R_w จากด้านทุติยภูมิมายังด้านปฐมภูมิจะได้สมการดังสมการที่ (2.1)

$$R_{wp} = a^2 R_w \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของไหลตซึ่งพิจารณาด้วยวงจรสมมูลของหม้อแปลง

โดยที่ในรูป

R_c : ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

L_c : ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

L_m : ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

L_w : ค่าความเหนี่ยวนำของชิ้นงาน

R_w : ความต้านทานของชิ้นงาน

ซึ่งจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนได้ดังสมการ :

$$P_c = I_c^2 R_c \quad (2.2)$$

และเมื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดที่ตัวชิ้นงานจะได้สมการดังนี้

$$P_w = I_w^2 R_w \quad (2.3)$$

โดยที่ $I_w = aI_c$ ดังนั้น

$$P_w = I_c^2 R_w$$

ซึ่งสามารถหาค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_w}{P_w + P_c} \\ &= \frac{R_{wp}}{R_{wp} + P_c} \\ &= \frac{I}{I + R_c / R_{wp}}\end{aligned}\quad (2.4)$$

ในการไหลของกระแสเฉพาะบริเวณผิวของชิ้นงานและที่บริเวณผิวของขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาตรของชิ้นงานแล้ว ความลึกของการไหลนี้จะน้อยมากทำให้การหาค่า R_c และ R_w สามารถทำได้โดยการพิจารณาดังสมการต่อไปนี้

ความต้านทานของขดลวดหาได้ตามสมการดังนี้ (2.5)

$$R_c \propto \frac{I}{\delta_c \sigma_c} \propto \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_c}} \quad (2.5)$$

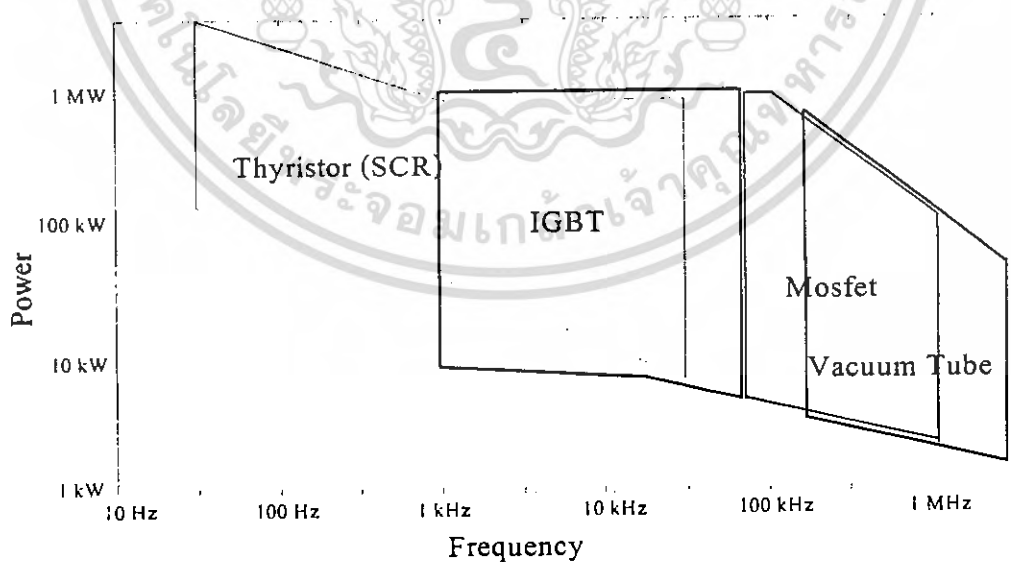
และในทำนองเดียวกันความต้านทานของชิ้นงานก็สามารถหาได้ตามสมการดังนี้

$$R_w \propto \frac{I}{\delta_w \sigma_w} \propto \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_w}} \quad (2.6)$$

โดยที่ δ_c : ความลึกผิวของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน
 δ_w : ความลึกผิวของชิ้นงาน
 σ_c : ความนำไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน
 σ_w : ความนำไฟฟ้าของชิ้นงาน

2.5 พื้นฐานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ

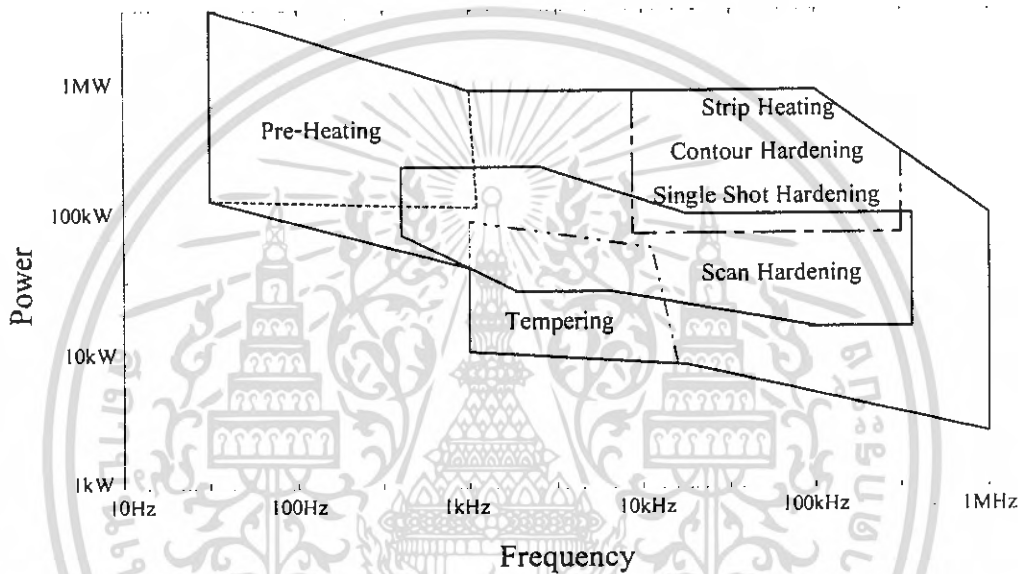
แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกันและมีการพัฒนามาตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันทั้งทางด้านรูปแบบระบบและชนิดอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเครื่องให้ความร้อนนี้จะเป็นส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งในอดีตจะสามารถใช้งานได้ถึง 10kHzในงานอุตสาหกรรมทั่วไป โดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงนี้จะใช้ร่วมกับหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ที่มี Loss / ที่ความถี่สูงต่ำมากทำให้แกนหม้อแปลงมีขนาดเล็กลงมาก ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมใช้ 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 จะเห็นว่าสามารถใช้อินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับงานการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำได้ตั้งแต่ในย่านความถี่ต่ำ 50Hz จนถึงย่านความถี่สูง 450KHz ดังในรูป ซึ่งอธิบายความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าและพิกัดความถี่ของอุปกรณ์แต่ละชนิดที่ยังคงมีใช้ในปัจจุบันคือ Thyristor ,IGBT, Mosfet ,Vacuum Tube และยังคงคิดว่าอุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกำลังที่สูงได้จะถูกใช้งานในย่านความถี่ต่ำ ส่วนอุปกรณ์ที่สามารถทำงานในย่านความถี่สูงจะสามารถจ่ายกำลังได้ต่ำกว่า



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใช้งานกับพิกัดกำลังไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์สวิตช์แต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

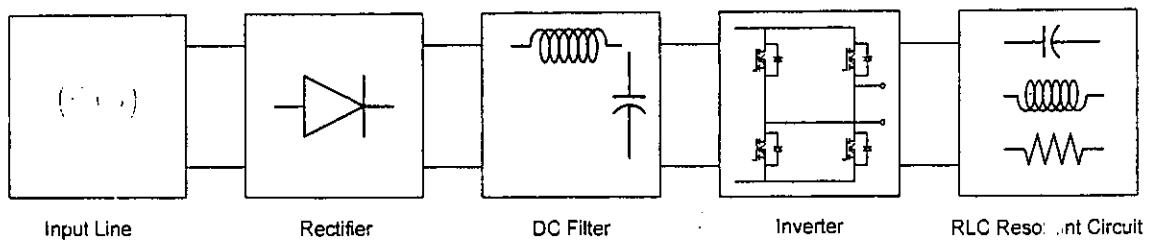
ความสัมพันธ์ระหว่างย่านความถี่กับพิกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับงานให้ความร้อนในแบบต่างๆ อธิบายได้ในรูปที่ 2.4 ซึ่งย่านการให้ความร้อนนี้จะมีลักษณะคล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใช้งานกับพิกัดกำลังไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์สวิตช์แต่ละชนิดโดยจะเห็นว่าสามารถประมาณได้ว่าลักษณะการใช้งานบางอย่างจะเหมาะสมกับอุปกรณ์บางชนิดได้ เช่นในงาน Scan Hardening ซึ่งใช้ความถี่ย่านประมาณ 1 kHz ถึงประมาณ 500kHz ก็จะเป็นย่านที่ใช้ IGBT และมอสเฟตเป็นอุปกรณ์โดย IGBT จะแบ่งใช้งานย่านที่ความถี่ต่ำและมอสเฟตจะแบ่งใช้งานย่านความถี่สูงในงานการชุบผิวแข็งนี้



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างย่านความถี่ใช้งานกับพิกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับงานให้ความร้อน

2.6 รูปแบบของ อินเวอร์เตอร์สำหรับงานการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ

อินเวอร์เตอร์ในงานการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำจะมีหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง โดยอินเวอร์เตอร์ที่มีการใช้งานในทางอุตสาหกรรมจะมีอยู่หลายรูปแบบแตกต่างกันตามแต่ละผู้ผลิตซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่ง ลักษณะของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าออกได้เป็น 2 แบบคือแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Fed) และแหล่งจ่ายกระแส (Current Fed) และสามารถแบ่งรายละเอียดในแต่ละภาคของวงจรออกได้อีกหลายรูปแบบทั้งในส่วนของแหล่งจ่ายไฟ DC รูปแบบของการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์และลักษณะการต่อวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งลักษณะโครงสร้างหลักของอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปสามารถเขียนได้ดังรูป ซึ่งจะมีส่วนประกอบสำคัญด้วยกันดังนี้คือ



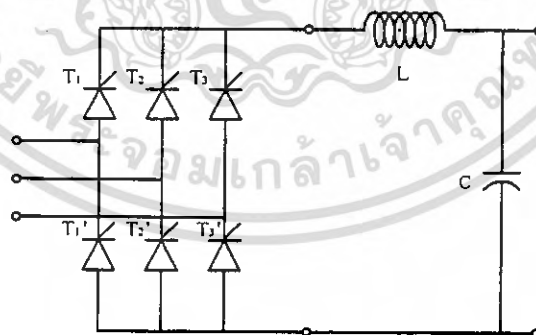
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโดยทั่วไปของแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความร้อน

Rectifier , DC Filter , Inverter , RLC Resonant ส่วน Input Line คือแหล่งจ่ายกระแสสลับจากการไฟฟ้าที่จ่ายระบบให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความร้อนสูงและสามารถแบ่งอินเวอร์เตอร์ออกตามโครงสร้างแต่ละภาคได้ดังนี้

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เป็นส่วนแรกของเครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความร้อนสูงซึ่งจะรวมวงจร Rectifier กับ DC Filter เข้าไว้ด้วยกันโดยได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz จากการไฟฟ้า เป็นส่วนที่สร้างแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะแบ่งออกได้ดังนี้

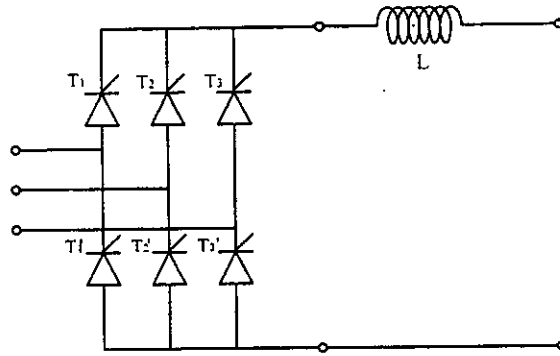
1.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับแรงดันหรือกระแสได้ เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับระดับแรงดันและกระแสได้เพื่อใช้ในการควบคุมปริมาณกระแสหรือแรงดันเพื่อที่ส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับแรงดันได้(Variable DC Voltage) เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับปริมาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์ซึ่งมักใช้รูปแบบดังในรูปที่ 2.6 ซึ่งควบคุมแรงดันโดยใช้ Phase Controlled Rectifier ซึ่งมี ตัวเก็บประจุต่อขนานเป็นตัวสุดท้ายทางด้านเอาต์พุทของวงจรเพื่อกรองแรงดันให้เรียบ



รูปที่ 2.6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับแรงดันได้

2) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับกระแสได้ (Variable DC Current) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าตรงที่ส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์ได้ซึ่งมักใช้รูปแบบดังในรูปที่ 2.7 ซึ่งควบคุมแรงดันโดยใช้ Phase Controlled Rectifier จะมีตัวเหนี่ยวนำไฟตรงต่ออนุกรมอยู่ทางด้านเอาต์พุทเพื่อควบคุมให้กระแสไหลต่อเนื่อง

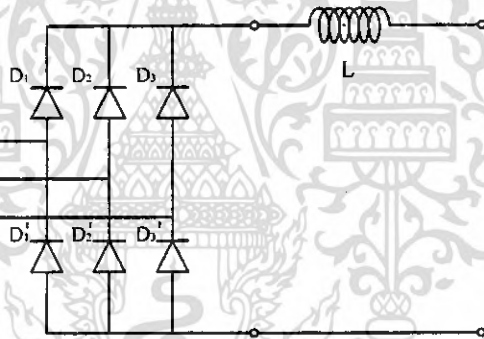


รูปที่ 2.7 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับกระแสได้

1.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีการควบคุม (Uncontrolled DC Supply)

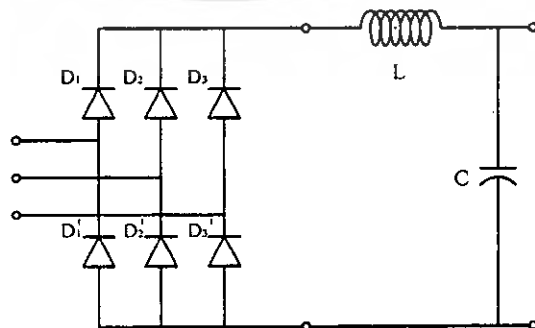
เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะให้ระดับแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าตรงที่เป็นอิสระและไม่มีการควบคุมซึ่งจะแบ่งออกได้อีก 2 รูปแบบดังนี้

1) แหล่งจ่ายกระแส (Current Source) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีการควบคุมการไหลของกระแสแต่กระแสจะคงที่ได้จากขนาดของค่า L ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับกระแสได้

2) แหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีการควบคุมระดับแรงดันดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แหล่งจ่ายแรงดัน

2. ส่วนการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ (Inverter Output Control) ภาคอินเวอร์เตอร์ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้โครงสร้างในแบบ Full-Bridge Inverter แต่จะแตกต่างกันที่สัญญาณควบคุมที่ใช้ในการขับสวิตช์ทั้ง 4 ตัวของ Full-Bridge Inverter ซึ่งจะแบ่งแยกออกได้ดังนี้

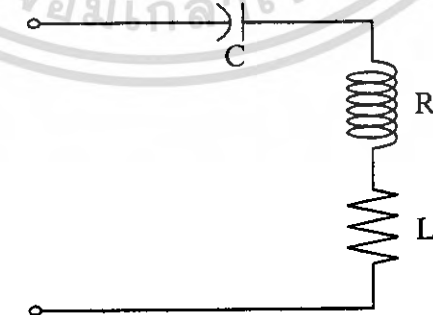
2.1 ตัวประกอบกำลังด้านเอาต์พุทคงที่ (Constant Output Power Factor) จะควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะที่กระแสและแรงดันด้านเอาต์พุทจะ Inphase กันอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์สูงสุดการควบคุมกำลังไฟฟ้าจะทำได้โดยการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟตรงตั้งที่กล่าวมาแล้วในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้กระแสตรงแบบปรับได้

2.2 การปรับความถี่เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้า (Variable Frequency for Power Control) เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยการปรับความถี่อินเวอร์เตอร์เพื่อเลื่อนเฟส ของกระแสให้ล้าหลังแรงดันของเอาต์พุทอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ระดับกำลังไฟฟ้ด้านเอาต์พุทตามต้องการ

2.3 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการเลื่อนเฟสแรงดัน (Phase shift Controlled) เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับเลื่อนเฟสของแรงดันเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุท ที่จ่ายให้กับโหลด

3. วงจรด้านเอาต์พุท (Output Circuit) ลักษณะวงจรด้านเอาต์พุท จะเป็นวงจร RLC เรโซแนนซ์ซึ่งจะมีรูปแบบโครงสร้างการต่อวงจรแบ่งออกได้ 3 แบบโดยจะมีพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันดังนี้

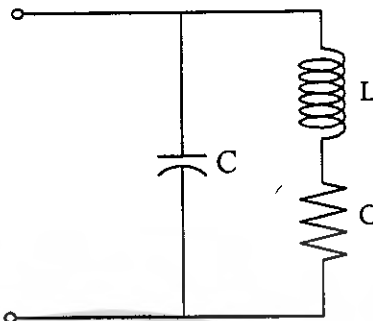
3.1 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม (Series Resonant Circuit) จากรูป ลักษณะพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม จะมีอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ต่ำที่สุด ดังนั้นจะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่โหลด R มีค่าสูงสุด การควบคุมกำลังไฟฟ้าทำได้โดยการลดแรงดันที่ป้อนให้วงจรหรือเลื่อนความถี่การใช้งานให้ต่ำกว่าหรือสูงกว่าตำแหน่งเรโซแนนซ์



รูปที่ 2.10 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

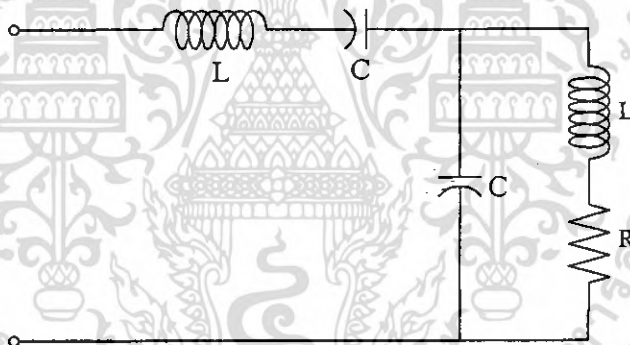
3.2 วงจรเรโซแนนซ์ขนาน (Parallel Resonant) หรือมักเรียกว่าวงจร Tank และจากรูป ลักษณะพฤติกรรมของวงจรเรโซแนนซ์ขนานจะมีอิมพีแดนซ์สูงสุดที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งเรโซแนนซ์ซึ่งที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์นี้จะเกิดการส่งกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดสูงสุดโดยที่กระแสไหลเข้าวงจรน้อยที่สุดเนื่องจากมีอิมพีแดนซ์สูงสุด



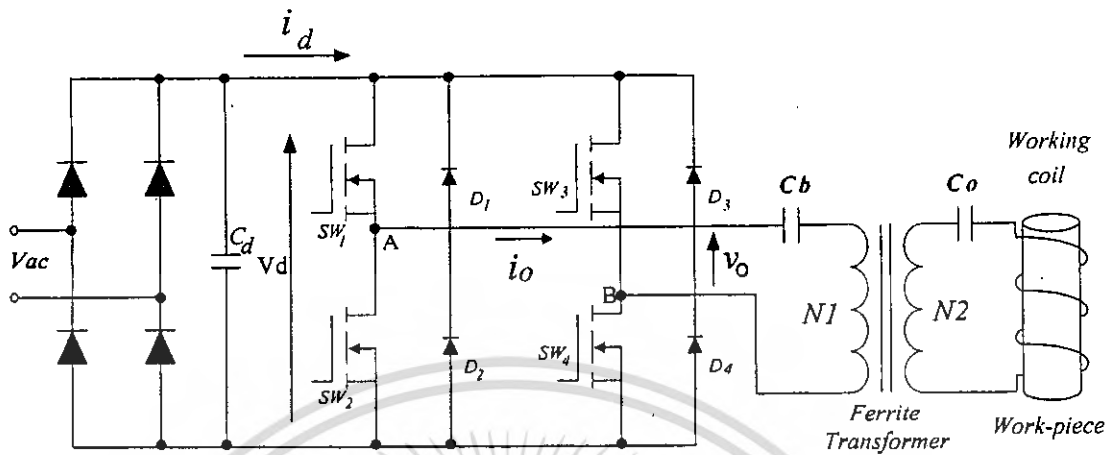
รูปที่ 2.11 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

3.3 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมและขนาน (Series and Parallel Resonant) จากรูปที่ 2.12 ลักษณะวงจรแบบนี้เป็นการเพิ่มวงจร LC อนุกรมเข้าไปกับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งจะทำให้วงจรมีตำแหน่งเรโซแนนซ์มากกว่า 1 จุด



รูปที่ 2.12 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมและขนาน (Series and Parallel Resonant)

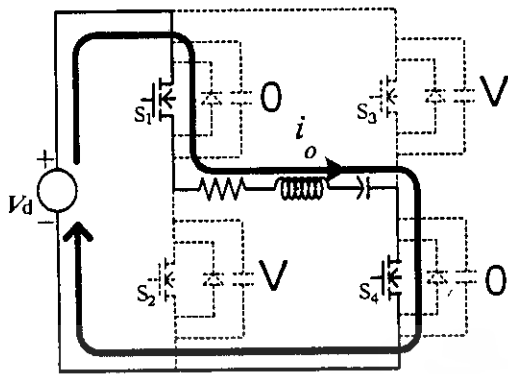
2.7 หลักการทำงานของวงจรชุด Induction Heating



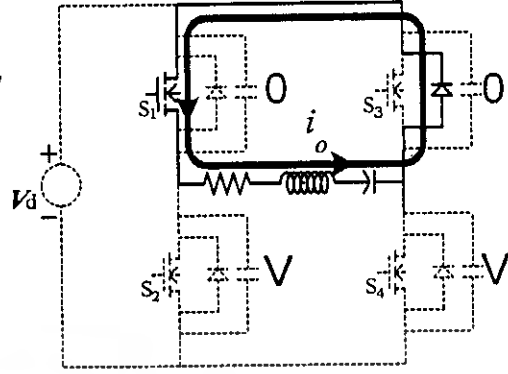
รูปที่ 2.13 วงจรกำลังของแหล่งจ่ายให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

จากรูปวงจรของชุด Induction Heating เห็นได้ว่าวงจรจะประกอบไปด้วย 3 ชุดหลัก คือ ชุด Diode Rectifier ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ ไดโอด และ คาปาซิเตอร์ ช่วยในการกรองแรงดัน ส่วนชุดของ Inverter จะทำหน้าที่แปลงไฟกระแสตรงให้เป็นรูปคลื่น Square wave และชุดหม้อแปลงความถี่สูงแบบ Step down โดยที่ด้านปฐมภูมิจะมีจำนวนรอบของขดลวดสูงกว่าทางด้านทุติยภูมิในอัตราส่วน 33 : 2.68 ซึ่งจะทำให้ได้กระแสทางด้านทุติยภูมิประมาณ 160 แอมป์ ในขณะที่กระแส ปฐมภูมิ หรือ นั่นก็คือ กระแสทางด้าน Output ของ Inverter จะมีขนาดประมาณ 13 แอมป์ แรงดันทางด้าน Output ของ Inverter จะมีค่าประมาณ 310 โวลท์ ในขณะที่แรงดันทางด้าน Output ของหม้อแปลง ความถี่สูงมีค่าประมาณ 25 โวลท์ จะได้กำลังไฟฟ้าทางด้าน Output ที่ใช้ในการชุบแข็งผิวโลหะ ประมาณ 3000 วัตต์ โดยที่กระแสที่ไหลเข้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะมี ลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ และแรงดันทางด้าน Output ของ Inverter จะมีลักษณะรูปคลื่น ใกล้เคียง Square wave โดยความถี่สวิตซ์ซิ่ง อยู่ระหว่าง 50 – 100 กิโลเฮิรตส์

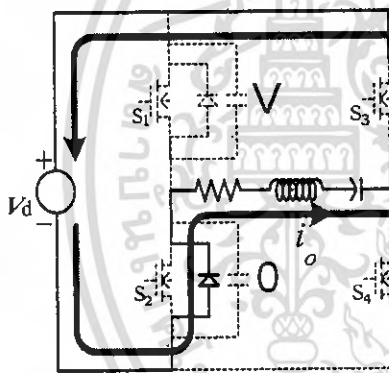
สำหรับโครงสร้างของ ฟูลบริดจ์ อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ อนุกรมของเครื่องชุบแข็งผิว โลหะเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีการควบคุมด้วยการปรับความถี่ ในกรณีของการปรับความถี่จะให้ แรงดันเอาท์พุท ของ อินเวอร์เตอร์ เพียง 2 สถานะคือ +Vd และ -Vd เท่านั้น เมื่ออินเวอร์เตอร์ ทำงานที่ความถี่สวิตซ์ซิ่ง สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์ จะสามารถแบ่งการทำงานของวงจรเป็น 4 โหมด โดยมีลักษณะการทำงานที่โหมตต่าง ๆ ดังนี้



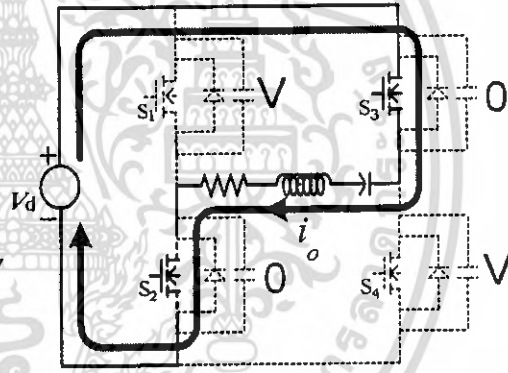
รูปที่ 2.14 (a)



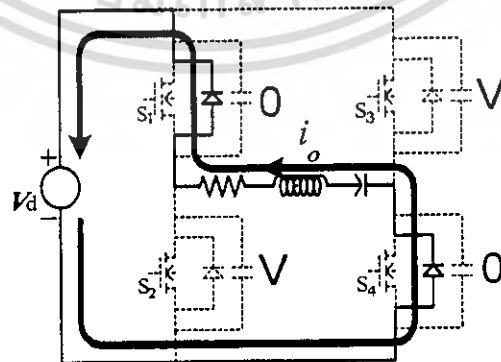
รูปที่ 2.14 (b)



รูปที่ 2.14 (c)



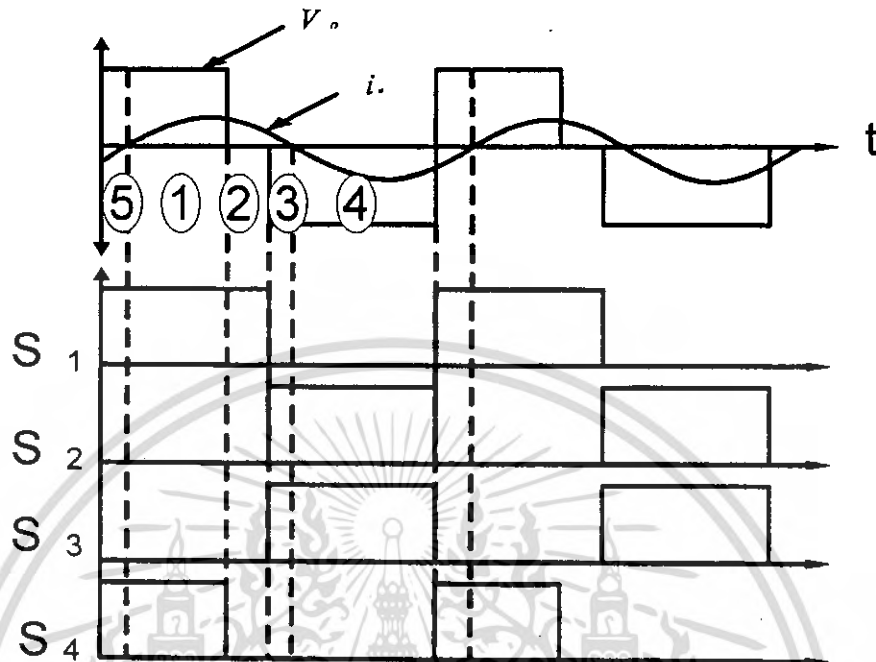
รูปที่ 2.14 (d)



รูปที่ 2.14 (e)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดการทำงานของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยการปรับความถี่



รูปที่ 2.15

โหมด 1 ในโหมดนี้จะให้แรงดันเอาต์พุตเป็น $+V_d$ โดยจะมีการทำงานดังในรูป (a) จะมีกระแสไหลดเป็น $+I_L$ ซึ่งการทำงานในโหมดนี้จะทำให้เกิดเพาเวอร์ที่ไหลด

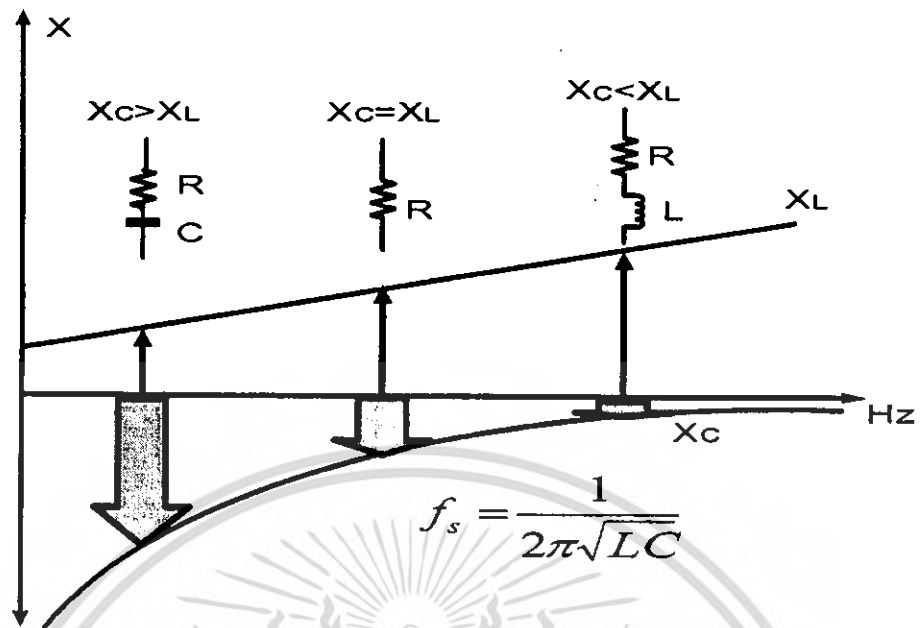
โหมด 2 ในโหมดนี้จะให้แรงดันเอาต์พุตเป็น $0 V_d$ โดยจะมีการทำงานดังในรูป (b) จะมีกระแสไหลดเป็น $+I_L$ ซึ่งการทำงานในโหมดนี้จะทำให้เกิดกระแสไหลดต่อเนื่องที่ไหลด

โหมด 3 ในโหมดนี้จะให้แรงดันเอาต์พุตเป็น $-V_d$ โดยจะมีการทำงานดังในรูป (c) จะมีกระแสไหลดเป็น $+I_L$ ซึ่งการทำงานในโหมดนี้จะทำให้เกิด การคืนพลังงานสู่ระบบ

โหมด 4 ในโหมดนี้จะให้แรงดันเอาต์พุตเป็น $-V_d$ โดยจะมีการทำงานดังในรูป (d) จะมีกระแสไหลดเป็น $-I_L$ ซึ่งการทำงานในโหมดนี้จะทำให้เกิดเพาเวอร์ที่ไหลด

โหมด 5 ในโหมดนี้จะให้แรงดันเอาต์พุตเป็น $+V_d$ โดยจะมีการทำงานดังในรูป (e) จะมีกระแสไหลดเป็น $-I_L$ ซึ่งการทำงานในโหมดนี้จะทำให้เกิดการคืนพลังงานสู่ระบบ

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.16

จากการทำงานของวงจรจะเห็นได้ว่าจะมีความถี่ภายในวงจรอยู่ 2 ชุดคือ ความถี่ f_s (ความถี่ของแหล่งจ่ายด้าน Input) และความถี่ f_r ด้าน Output ของหม้อแปลง (ความถี่เรโซแนนซ์) ซึ่งแรงดัน f_s และ f_r จะมี 3 กรณีคือ

1. $f_s = f_r$ กระแสจะเป็น sine แรงดันและกระแสจะ Inphase กัน
2. $f_s > f_r$ วงจรมีสภาวะเป็น RL (เพราะว่า C มีค่าน้อย) กระแส I จะ Lagging แรงดัน V รูปคลื่นจะมีลักษณะคล้ายกับ Exponential รูปคลื่นของกระแส I ไม่เป็นรูป Sine ซึ่งดูได้จากรูปคลื่นที่ได้จากการทดลอง
3. $f_s < f_r$ จะตรงกันข้ามกับข้อ 2 กระแส I จะ Leading แรงดัน V วงจรมีสภาวะเป็น RC รูปคลื่นของกระแส I ไม่เป็นรูป Sine ซึ่งดูได้จากรูปคลื่นที่ได้จากการทดลอง จากความถี่ 3 กรณีข้างต้นสามารถทำได้กรณีเดียวคือ กรณีที่กระแส I จะ Lagging แรงดัน V ($f_s > f_r$)

72979

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบแหล่งจ่ายให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการพิจารณาออกแบบในส่วนประกอบและหน้าที่การทำงานของวงจรกำลังของแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งจะเน้นพิจารณาเฉพาะส่วนที่เกี่ยวกับงานที่ทำในวิทยานิพนธ์โดยจะแบ่งรายละเอียดต่างออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

1. วงจรให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์อนุกรม

2. การพิจารณาออกแบบเลือกใช้หม้อแปลงสำหรับแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์อนุกรม

3. การพิจารณาออกแบบเลือกใช้ขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง

3.2 วงจรให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์อนุกรม แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

3.2.1 วงจรกำลัง

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับงานการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งควบคุมกำลังด้วยการเลื่อนเฟสและรักษาสภาวะ ZVS โดยการปรับความถี่นั้น ตัวเครื่องต้นแบบต้องถูกออกแบบให้สามารถควบคุมการทำงานให้อยู่ในย่านความถี่ 60 kHz ถึง 90 kHz และสามารถปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณขับเคลื่อนได้ตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศาที่ต้องการได้ เนื่องจากต้องทำงานที่จุดใกล้เรโซแนนซ์และต้องสามารถเริ่มทำงานได้อย่างไม่มีปัญหาของการเริ่มต้นทำงานและยังต้องสามารถควบคุมการปรับความถี่และระบบการออกแบบที่ปลอดภัยจากแรงดันไฟฟ้าจากขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง อีกทั้งระบบที่ทำให้เครื่องสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนานได้ โดยมีเสถียรภาพดีตลอด เครื่องต้นแบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์มีลักษณะภายนอกดัง รูปที่ 1 และมีลักษณะวงจรกำลังดังรูปที่ 2 ลักษณะของเครื่องจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบเลื่อนเฟสความถี่สูง กับส่วนของโหลดซึ่งเป็นวงจร RLC เรโซแนนซ์อนุกรม

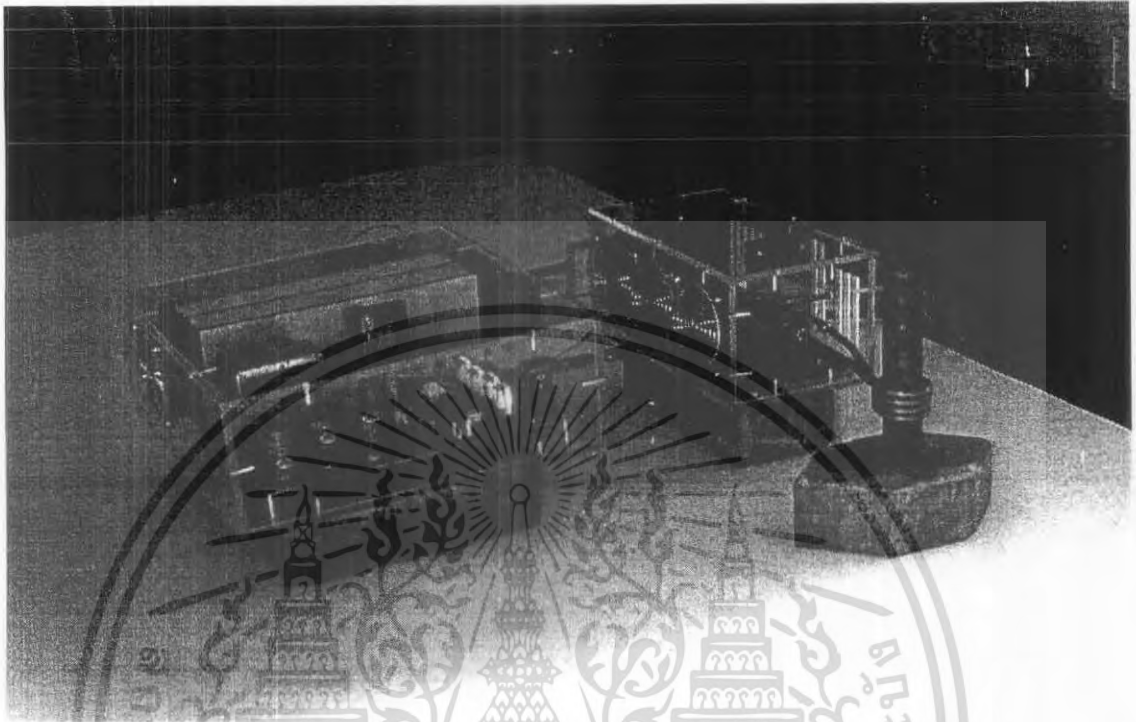
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบเลื่อนเฟสความถี่สูงนี้เป็นส่วนที่ใช้จ่ายกำลังงานให้กับโหลดวงจร RLC เรโซแนนซ์อนุกรมดังรูปที่ 2 โดยการ รับแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ 220 โวลต์ จากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าและนำมาแปลงเป็นแรงดันขั้นบันไดความถี่สูง 60kHz -90kHz เพื่อป้อนให้ชุดโหลดซึ่งในวงจร RLC เรโซแนนซ์อนุกรม โดยส่วนต่างๆของแหล่งจ่ายดังกล่าวจะประกอบไปด้วยรายละเอียดดังนี้

1. วงจร Rectifier and filter ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ ความถี่ต่ำ 220 โวลต์, 50Hz จากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 310 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

2. วงจร Full-bridge Mosfet Inverter ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับ จากวงจร Rectifier and filter ให้เป็นแรงดันขั้นบันไดความถี่สูงซึ่งควบคุมด้วยการเลื่อนเฟส

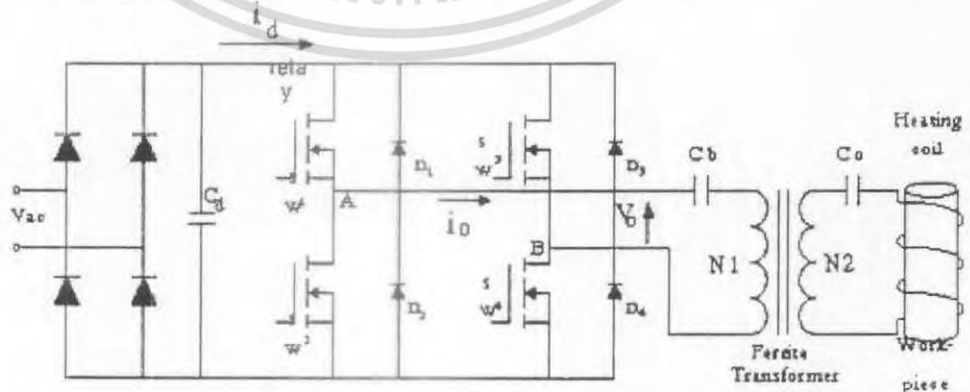
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Phase-shift) พร้อมทั้งปรับความถี่เพื่อให้สามารถทำงานในสภาวะZVS(Zero Voltage Switching) เพื่อจ่ายให้กับโหลด RLC เรโซแนนท์อนุกรม



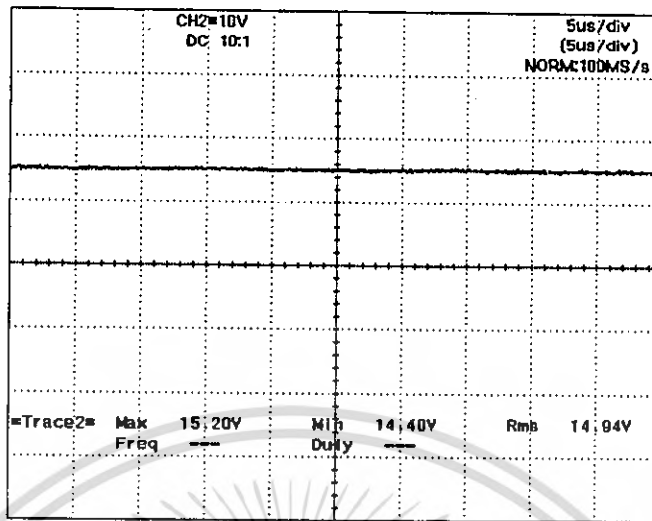
รูปที่ 3.1 เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับงานการให้ความร้อนโดยความถี่สูง

3. วงจร RLC เรโซแนนท์อนุกรม จะมีประกอบอยู่ 3 ส่วนคือหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์ ความถี่สูง, ตัวเก็บประจุความถี่สูงกระแสสูง, และขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนซึ่งมีแท่งเหล็กชิ้นงานสอดอยู่ภายใน โดยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนนี้มีลักษณะของวงจรสมมูลเป็นวงจรRL อนุกรมโหลดถูกจัดอยู่ลักษณะเป็นวงจรเรโซแนนท์อนุกรมเพื่อให้สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดหรือชิ้นงานได้มากที่สุด

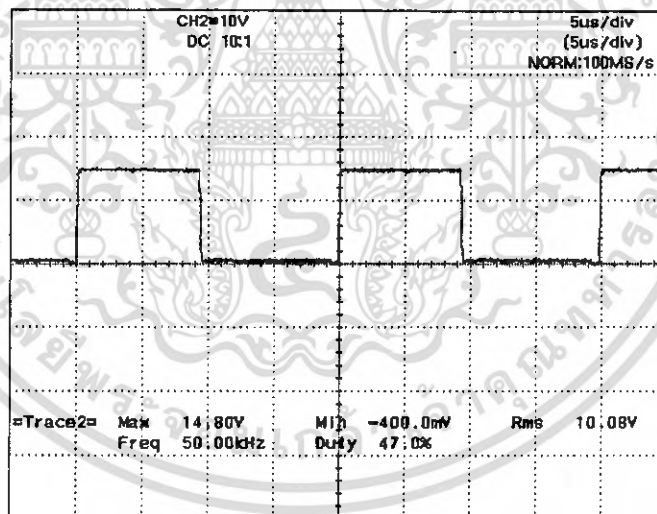


รูปที่ 3.2 วงจรกำลังของแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์อนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

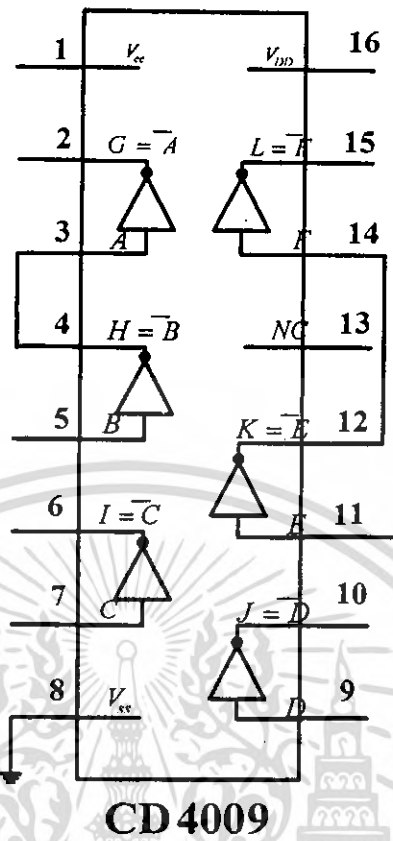


รูปที่ 3.4 แสดงสัญญาณ Input ของวงจรถ่าย TL 494 (ขา 12)



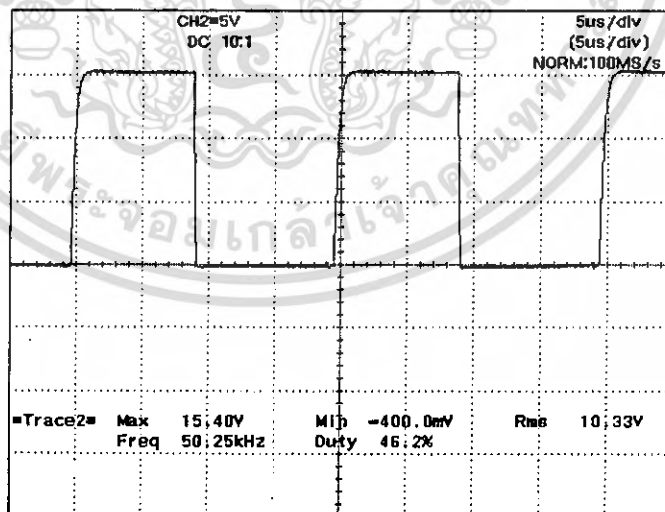
รูปที่ 3.5 แสดงสัญญาณ Output ของวงจรถ่าย TL 494 (ขา 9,10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



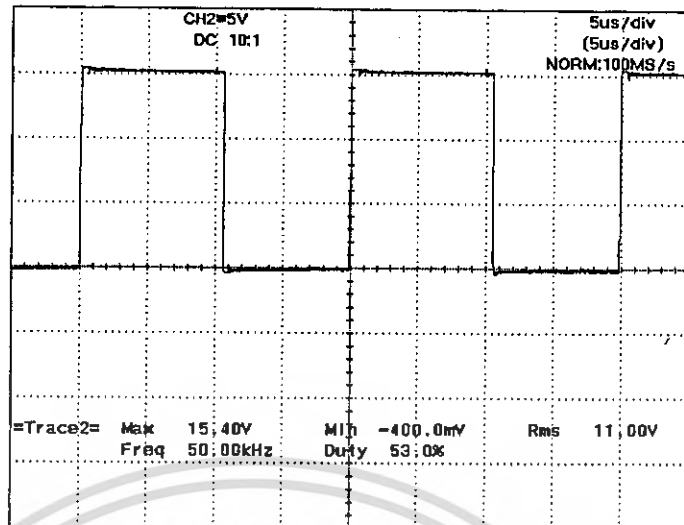
CD 4009

รูปที่ 3.6 แสดงวงจรของ CD 4009



รูปที่ 3.7 แสดงสัญญาณ Input ของวงจร CD 4009 (ขา 2,11)

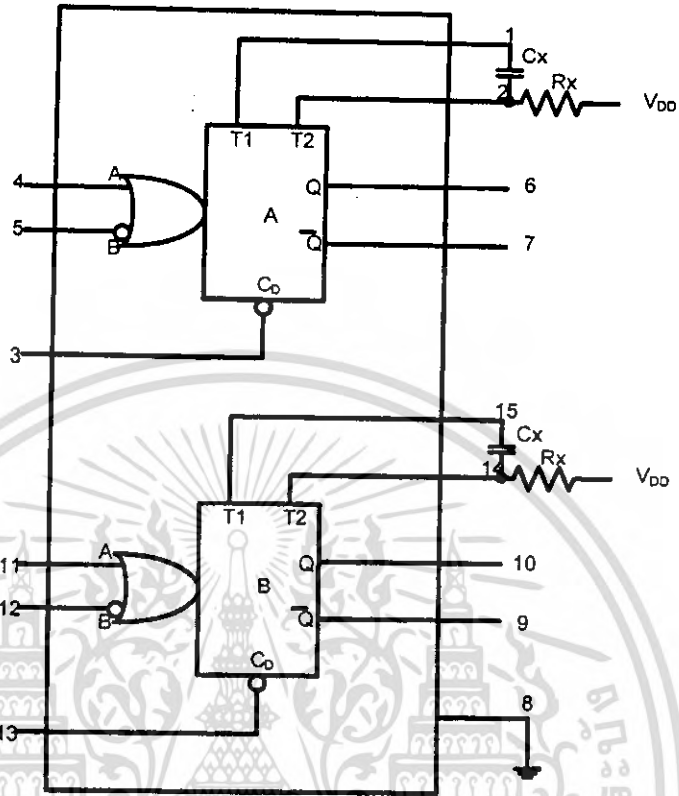
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



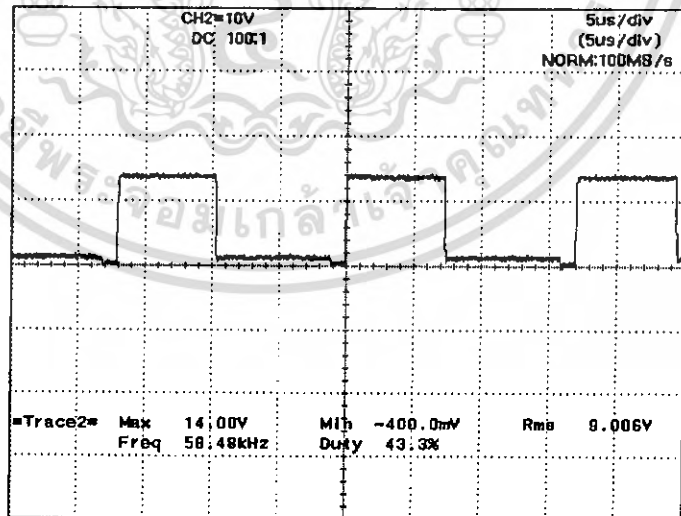
รูปที่ 3.8 แสดงสัญญาณ Output ของวงจร CD 4009 (ขา 2,15)

เป็นวงจรที่ใช้สร้างสัญญาณขั้นบันไดที่จะนำไปควบคุมสวิตช์ Mosfet ของ Inverter โดยสัญญาณที่จะนำไปควบคุมสวิตช์แต่ละตัว สามารถเลื่อนลำดับเฟสได้ โดยมีการนำวงจรบัฟเฟอร์ เข้ามาช่วยปรับปรุงสัญญาณของ Input CD 4009 ให้มีความเป็นสัญญาณขั้นบันไดที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นโดยดูได้จากรูปสัญญาณ Output ของวงจร CD 4009

-วงจรเลื่อนลำดับเฟส

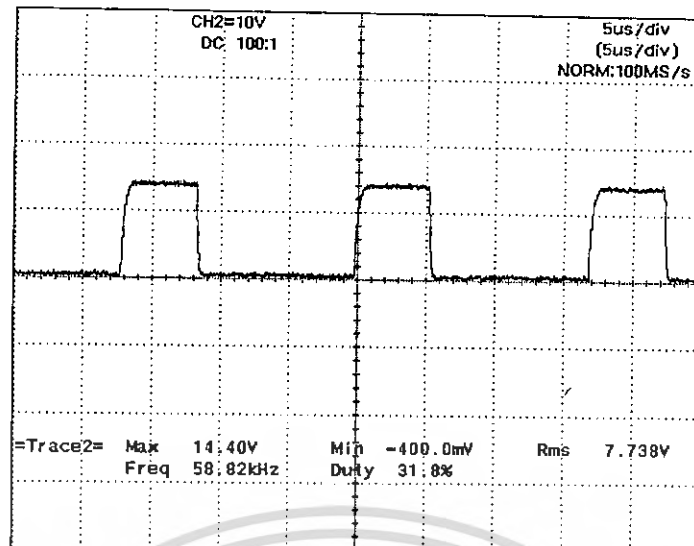


รูปที่ 3.9 แสดงวงจรของ CD 4528



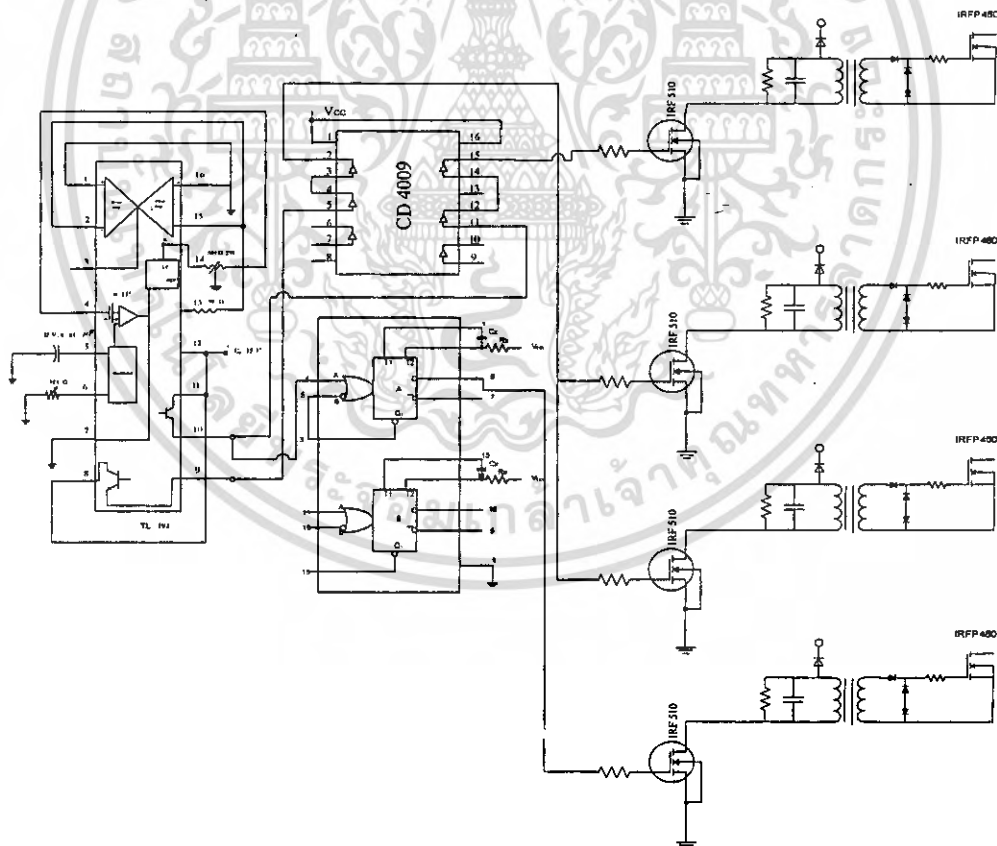
รูปที่ 3.10 แสดงสัญญาณ Input ของวงจร CD 4528 (ขา 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



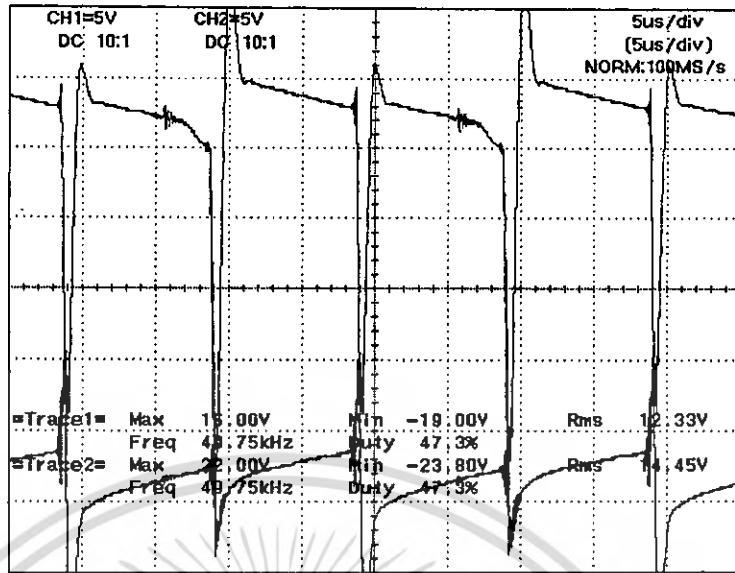
รูปที่ 3.11 แสดงสัญญาณ Output ของวงจร CD 4528 (ขา 6)

เป็นวงจรที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณขั้นบันได ให้สามารถเลื่อนลำดับเฟส หรือ Duty ratio เพื่อให้สามารถควบคุมกำลังไฟได้ ตามความต้องการ

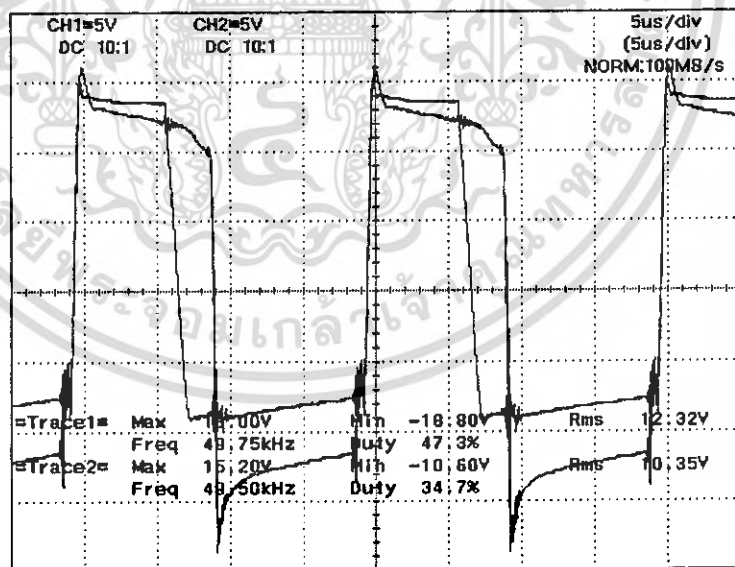


รูปที่ 3.12 ภาพรวมวงจรสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

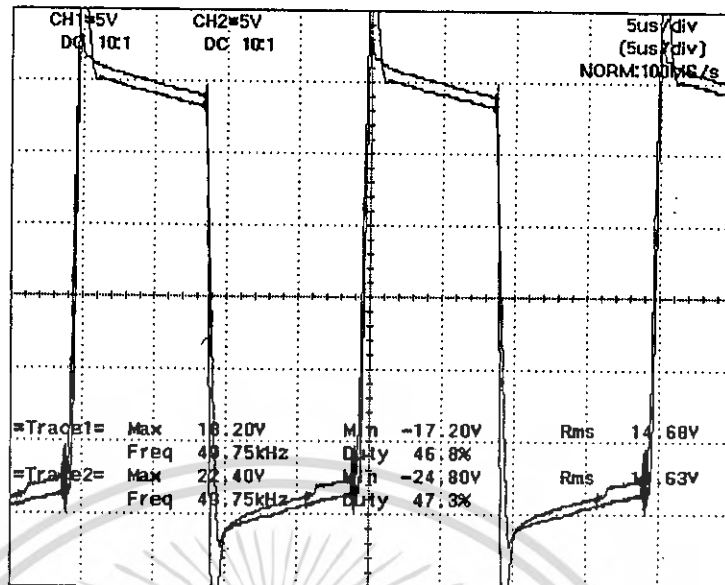


รูปที่ 3.13 สัญญาณขับ gate Power Moset S1 , S2

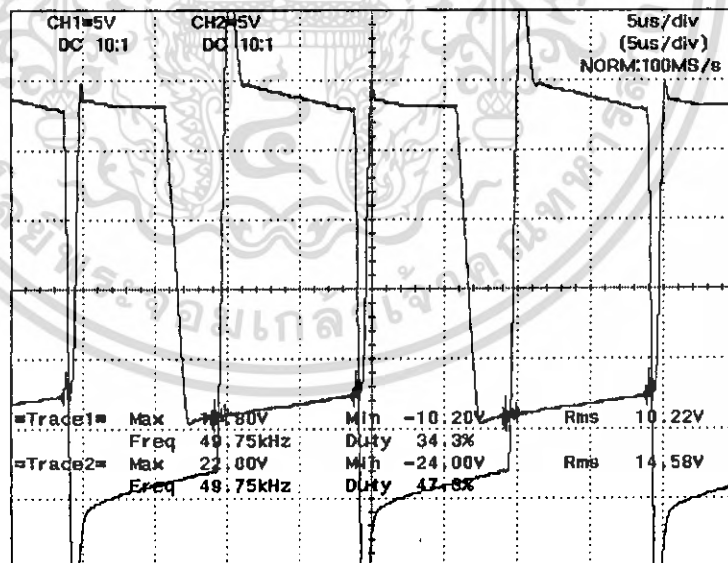


รูปที่ 3.14 สัญญาณขับ gate Power Moset S1 , S4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 สัญญาณขับ gate Power Moset S2 , S3



รูปที่ 3.16 สัญญาณขับ gate Power Moset S2 , S4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การพิจารณาออกแบบหม้อแปลงสำหรับงานด้านการเหนี่ยวนำความร้อน ความถี่สูง

ในการพิจารณาออกแบบใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับส่งผ่านกำลังที่ทำงานที่ความถี่สูงนั้น ลักษณะและโครงสร้างของหม้อแปลงที่ใช้สำหรับงานย่านความถี่สูงจะมีความแตกต่างกับสำหรับหม้อแปลงที่ทำงานในย่านความถี่ต่ำหลายอย่าง และสำหรับการพิจารณาออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงซึ่งทำงานกับโหลดซึ่งเป็นวงจรเรโซแนนท์อนุกรมจะพบว่า ค่าความต้านทานของขดลวด และ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลง (Leakage Inductance) จะเป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของวงจรเรโซแนนท์อนุกรมด้วย โดยเฉพาะลักษณะโหลดของแหล่งจ่ายให้ความร้อนซึ่งมีลักษณะเป็น วงจรเรโซแนนท์อนุกรมที่มีค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำต่ำมาก รวมทั้งยังต้องพิจารณาถึงระบบการระบายความร้อนให้กับขดลวดทุกขดขั้วที่มีความสามารถระบายได้อย่างรวดเร็ว เนื่องการไหลของกระแสไฟฟ้าความถี่สูงปริมาณมาก ดังนั้นแนวทางในการพิจารณาออกแบบหม้อแปลงที่ทำงานที่ความถี่สูงในสภาวะเรโซแนนท์นี้จึงมีลักษณะการพิจารณาโดยการรวบรวมเงื่อนไขที่เป็นข้อจำกัดและพิกัดต่างๆที่กำหนดไว้เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาออกแบบหม้อแปลงให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ดังมีรายละเอียดดังนี้

1. ไม่สามารถรู้ค่า R และ L ของโหลดในตอนแรกได้เนื่องจากต้องทดสอบหาค่าได้ขณะใช้งานจริงที่พิกัด ทำให้ไม่สามารถกำหนด Ratio ของหม้อแปลงได้ในตอนแรก แต่สามารถทดสอบหาค่า R_{eq} และ L_{eq} ได้ซึ่งเป็นค่า R และ L ของทั้งวงจรเรโซแนนท์ซึ่งเป็นการรวมค่า R และ L ของหม้อแปลงกับขดลวดตัวนำเข้าไปด้วย

2. กระแสต้านขดขั้วขั้วมีค่าสูงมาก ($\cong 150$ แอมป์) ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและเกิดความร้อนที่ขดลวดขั้วขั้วสูงมาก

3. แรงดันเป็นชั้นบันไดมี ฮาร์โมนิกส์, กระแสมีลักษณะเป็นคลื่นชานัน

4. จำนวนรอบต้านขดขั้วขั้วมีจำนวนรอบที่จำกัดเนื่องจากขนาดตัวนำที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้น

ต้องออกแบบก่อนขดลวดต้านปฐมภูมิ, และขดลวดต้านปฐมภูมิต้องตีเกลียวจำนวนหลายเส้นเพื่อให้ได้พื้นที่ผิวรวมเพียงพอในการจ่ายกระแสได้

5. แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่มีให้เลือกใช้ไม่มาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกแกนก่อนและเพิ่มกำลังหม้อแปลงโดยขนานแกน

6. ระบายความร้อนด้วยน้ำให้ขดลวดตัวนำต้านขดขั้วขั้วได้เนื่องจากใช้ท่อทองแดงเป็นขดลวดขดขั้วขั้ว

7. แกนเฟอร์ไรต์ มีลักษณะรูปทรงเป็นแท่งที่มีขนาดคงที่ทำให้การเพิ่มกำลังทำได้โดยการขนานแกนแต่ทำให้ปริมาณ เพิ่มครั้งละ 2 เท่า ไม่สามารถเพิ่มที่ละน้อยเพื่อจ่ายกำลังที่สูงขึ้นไม่มากดังนั้นการเพิ่มกำลังไม่มากแต่ต้องเพิ่มขนาดแกนถึงเท่าตัว ทำให้ราคาของแกน

สูงขึ้นมากเกินไป ดังนั้นการเพิ่มกำลังไม่มากอาจทำได้โดยการปรับเพิ่มความถี่ใช้งานให้มากขึ้นได้

3.3.1 การพิจารณาออกแบบหม้อแปลงสำหรับงานด้านการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

เนื่องจากแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้ได้ควบคุมให้ทำงานที่ความถี่ 60 kHz – 90 kHz และจากลักษณะโพลดวงจร RLC เรโซแนนซ์มีอิมพีแดนซ์ต่ำมากไม่สามารถจ่ายแรงดันความถี่สูงด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ให้โหลดได้โดยตรง โดยจากการทดสอบวัดค่าความต้านทานสมมูลของวงจรเรโซแนนซ์ทางด้านปฐมภูมิซึ่งรวมค่าความต้านทานขดลวดของหม้อแปลงแล้วจะมีค่าประมาณ $R_{eq} = 23$ โอห์มและเมื่อย้ายกลับไปทางด้านทุติยภูมิจะพบว่ามีค่าเท่ากับ 0.19 โอห์มซึ่งมีค่าน้อยมาก แต่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายแรงดันความถี่สูงมีค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ $\sqrt{2} \times 220$ โวลต์หรือประมาณ 310 โวลต์ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่เป็นเครื่องต้นแบบไม่สามารถจ่ายโหลดที่มีค่าความต้านทานต่ำขนาดนี้ได้ จึงจำเป็นต้องมีวงจรลดระดับแรงดันเพื่อที่แหล่งจ่ายแรงดันความถี่สูงนี้สามารถจ่ายโหลดซึ่งมีความต้านทานต่ำนี้ได้โดยที่กระแสไม่เกินพิกัดที่สามารถจ่ายได้ คือ 13 แอมป์ ซึ่งพิกัดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงที่ใช้ในการพิจารณาออกแบบหม้อแปลง มีรายละเอียดดังนี้

แรงดันไฟตรงด้านอินพุต (DC Input Voltage) :	310	โวลต์
กระแสไฟสลับความถี่สูงด้านเอาต์พุต (Output AC Current) :	13	แอมป์
ความถี่สวิตชิง (Switching Frequency) :	50-100	กิโลเฮิรตซ์
กำลังงานด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (Output Power) :	3000	วัตต์

จากความต้านทานสมมูลที่ได้จากการทดสอบในวงจรใช้งานจริงสามารถนำมาหาพิกัดแรงดันสูงสุดที่เมื่อป้อนให้กับโหลดซึ่งเป็นวงจร RLC เรโซแนนซ์แล้วโหลดสามารถได้รับกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 3000 วัตต์ได้ดังสมการ (3.1) ดังนี้

$$V = \sqrt{(P \times R_{eq})} \quad (3.1)$$

ซึ่งสามารถหาได้เท่ากับ $V = 55$ โวลต์ ความต้านทานที่วงจรเรโซแนนซ์จริงๆจะมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานสมมูลดังนั้นแรงดันที่ใช้งานจริงเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าที่โหลดประมาณ 3000 วัตต์ต้องมีค่าน้อยกว่า 55 โวลต์ ดังนั้นจึงได้พิจารณาเลือกใช้หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์ความถี่สูงในการลดระดับแรงดันด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายให้กับโหลดซึ่งเป็นวงจร RLC เรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 พื้นฐานหม้อแปลงสำหรับแหล่งจ่ายแบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

ลักษณะหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์ซึ่งเหมาะสำหรับนำมาใช้งานที่ความถี่สูงนั้นก็เนื่องจาก ที่ความถี่สูงนั้นหม้อแปลงโดยทั่วไปจะเกิดกำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อทำงานที่ความถี่สูงขึ้นดังนี้

$$P_{loss} = P_0 f^a B^b \quad (3.2)$$

ตัวแปร a และ b นั้นจะมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของแกนที่นำมาใช้งาน สำหรับแกนเฟอร์ไรท์ นั้นจะตัวแปรทั้ง 2 จะมีค่าน้อยมาก โดยปกติผู้ผลิตจะเป็นผู้กำหนด $loss$ ในรูปแบบ watt ต่อ ปริมาตรหรือ watt ต่อ น้ำหนักสำหรับที่ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและความถี่สูงสุด ย่านความถี่การใช้งานของแกน เฟอร์ไรท์โดยปกติจะอยู่ในช่วง 10kHz ถึง 1 MHz ตามวัสดุที่ใช้ทำแกน ในการใช้งานแกนเฟอร์ไรท์จะมีข้อดีตรง รูปทรงประกอบง่าย เนื่องจากมี 2 ชั้นประกบกัน มีขนาดเล็กน้ำหนักเบาเนื่องจากทำงานที่ความถี่สูง ใช้จำนวนรอบต่ำเนื่องจากทำงานที่ความถี่สูงดังแสดงในสมการ (3.3)

$$B_{max} = \frac{V \cdot 10^8}{k \cdot N \cdot A_e \cdot f_{sw}} \quad (3.3)$$

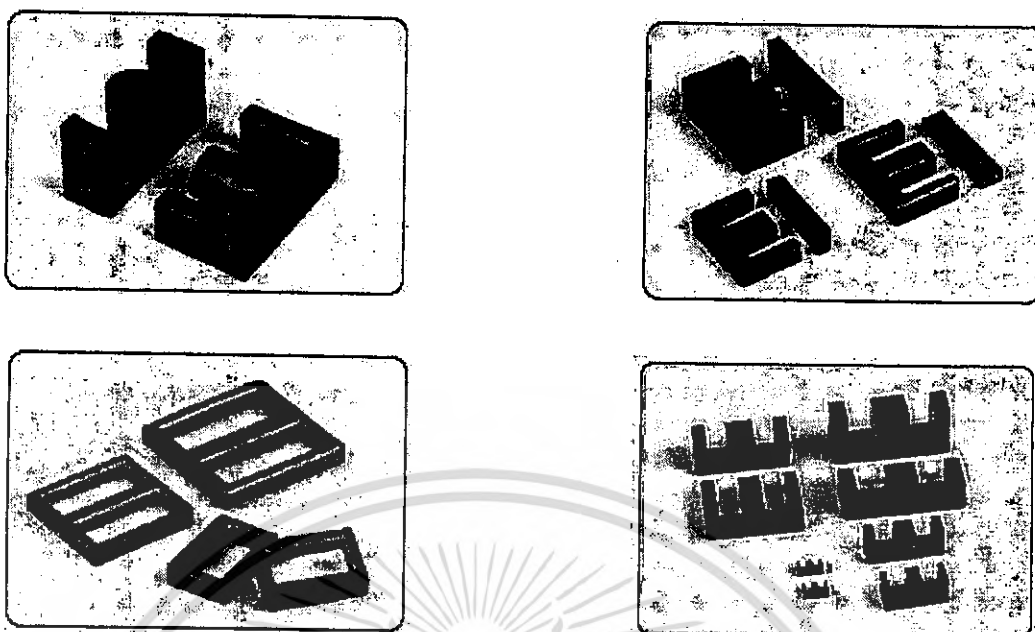
B_{max} = Maximum flux Density (Gauss)

V = Input Voltage (Volt)

k = constant

A_e = effective Area (c.m)

f_{sw} = Switching Frequency (Hz)



รูปที่ 3.17 ลักษณะรูปทรงแกนเฟอร์ไรต์แบบต่างๆที่มีใช้งานโดยทั่วไป

ลักษณะแกนเฟอร์ไรต์ที่มีใช้กันโดยทั่วไป คือ EE, EI, ETD, ER, CC, UU, RM, EEL, CI, RM, POT, EC, POT ดังแสดงใน รูปที่ 13 แต่แกนที่มีขนาดใหญ่ในการให้กำลังได้เป็น กิโลวัตต์มักใช้ชนิด EE ซึ่งมีขายโดยทั่วไปจะมีให้เลือก 2 ขนาดคือ EE55 กับ EE 80 ซึ่ง EE 80 จะมีขนาดใหญ่กว่า EE 55 ดังนั้นเมื่อถ้าเลือกใช้ EE55 จึงต้องใช้เวลาขนานกันของแกน มากกว่า 1 คู่ แต่เนื่องจากพื้นที่ในการพันขดลวดของ แกน EE 55 มีขนาดเล็กซึ่งไม่เหมาะที่จะใช้ พันขดลวดที่ต้องการกระจายความร้อน ดังนั้นจึงพิจารณาที่จะเลือกใช้แกนขนาด EE 80 ซึ่งมี พื้นที่ในการพันขดลวดใหญ่กว่า และสามารถจ่ายกำลังได้มากกว่า ส่วนจุดด้อยของการนำ แกนเฟอร์ไรต์มาใช้งานคือ เฟอร์ไรต์ เปราะแตกหักง่าย ใช้ที่ความถี่ต่ำกว่า 20kHz ไม่ได้ เนื่องจากจะอิมพีแดนซ์ได้ง่าย เมื่อถูกนำมาใช้งานที่พิกัดกำลังสูงมีขนาดให้เลือกไม่มาก การเพิ่ม กำลังโดยการขนานแกนทำได้โดยต้องเพิ่มจำนวนแกนครั้งละ 1 คู่ขึ้นไปซึ่งอาจเกินความจำเป็นได้ รูปทรงและชนิดเนื้อสารของแกนเฟอร์ไรต์โดยทั่วไปจะถูกกำหนดหลอมตามขนาดที่กำหนด มาแล้วจากผู้ผลิตเช่น Philips, Ferroxe Cube, Tomita, Tdk, Fdk เป็นต้น

3.3.3 ขั้นตอนการพิจารณาออกแบบหม้อแปลงแหล่งจ่ายให้ความร้อนด้วยการ เหนี่ยวนำที่ความถี่สูง

จากเงื่อนไขและข้อจำกัดที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบ หม้อแปลงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดังนี้

1. เลือกขนาดและชนิดของแกนหม้อแปลง ในการเลือกชนิดเนื้อสารของแกนจะ พิจารณาจากความถี่สำหรับย่านการใช้งานซึ่งมีการใช้งานในย่าน 50 KHz-100 KHz ซึ่งแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟอร์ไรต์ที่มีขายกันทั่วไปก็สามารถทำงานในย่านความถี่นี้ได้ สำหรับการเลือกขนาดแกนจะพิจารณาแนวทางดังนี้

1.1 เลือกแกนที่สามารถจ่ายกำลังที่พิกัดได้โดยจะเลือกแกนที่สามารถจ่ายได้สูงกว่าพิกัดใช้งานแต่เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของแกนเฟอร์ไรต์ที่มีขายกันโดยทั่วไป จะถูกหล่อมาเป็นคู่ 2 ซึ่งในการใช้งาน เมื่อต้องการเพิ่มกำลังสามารถทำได้โดยการขนานแกนเพิ่มเข้าไปโดยจะสามารถเพิ่มได้เป็นคู่ๆ ดังนั้นการเพิ่มขนาดแกนเป็น 2 คู่ จะทำให้พื้นที่หน้าตัดของแกนเป็น 2 เท่าซึ่งก็สามารถลดจำนวนรอบของขดลวดลงได้ทำให้มีพื้นที่ในการระบายความร้อนให้กับแกนและขดลวดได้มากขึ้น

1.2 เลือกขนาดแกนที่สามารถระบายความร้อนให้ตัวนำได้ได้สะดวก ดังนั้นแกนที่เลือกจะต้องมีช่องพันขดลวดที่ใหญ่เพียงพอ และเนื่องจากในวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้ ท่อทองแดงเป็นขดลวดหุ้มด้วยฉนวนเพื่อที่จะสามารถระบายความร้อนด้วยน้ำได้สะดวก ดังนั้นช่องพันขดลวดของหม้อแปลงจำเป็นต้องมี ความกว้างมากเพียงพอให้ท่อสามารถตัดแล้วพันรอบแกนเฟอร์ไรต์ได้

2. การพิจารณาเลือกใช้ขดลวดตัวนำ ลวดตัวนำที่ใช้เป็นขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติภูมิที่พิจารณาเลือกใช้ได้เลือกใช้ตามความเหมาะสมของการทำงาน เนื่องจากหม้อแปลงถูกใช้งานที่ความถี่สูงทำให้กระแสไฟฟ้าจะไหลอยู่บริเวณผิวเนื่องจากผลของ Skin Effect ดังนั้นจึงต้องการเฉพาะพื้นที่ผิวของตัวนำในการให้กระแสไหลเท่านั้น โดยขดลวดด้านปฐมภูมิเลือกใช้ลวดตัวนำขนาดเล็กทีเกลียวขนานกันจำนวนหลายเส้นเพื่อให้มีพื้นที่ผิวรวมกันมากเพียงพอในการรับกระแสต้านปฐมภูมิไหลได้ ขนาดเส้นลวดที่ใช้ในการตีเกลียวเลือกใช้ขนาดลวดทองแดงที่ไม่เล็กจนเกินไปเพื่อเมื่อถูกตีเกลียวจะไม่ขาดง่าย สำหรับด้านทุติภูมิเลือกใช้ท่อทองแดงกลวงขด เพื่อที่จะสามารถระบายความร้อนด้วยน้ำให้ขดลวดทุติภูมิร่วมกับขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนได้ เนื่องจากขั้วหนึ่งของขดลวดทุติภูมิของหม้อแปลง อยู่กับด้านหนึ่งของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนดังนั้นจึงสามารถใช้น้ำระบายความร้อนร่วมกันได้ ขนาดท่อทองแดงที่ใช้จะพิจารณาจาก ขนาดที่ใหญ่มากที่สุด เพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุดแต่ต้องเป็นท่อทองแดงที่สามารถที่จะตัดให้พันรอบแกนหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ได้โดยไม่บวมและแบน ซึ่งขนาดของท่อทองแดงที่เลือกใช้มีขนาด 6 มิลลิเมตรซึ่งสามารถพันขดทุติภูมิชั้นได้ 6 รอบ ซึ่งลักษณะใช้ท่อทองแดงเป็นทุติภูมิสะดวกที่จะใช้พันในแบบพันชั้นเดียว ซึ่งเป็นชั้นนอกสุดของการพันขดลวดสำหรับหม้อแปลงด้วย

3. การพิจารณากำหนดจำนวนรอบและอัตราส่วน $N_1:N_2$ เนื่องจากลักษณะโพลดของแหล่งจ่ายให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำเป็นขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนซึ่งมีแหล่งซึ่งต้องการให้ความร้อนสอดอยู่ภายใน ซึ่งโดยปกติไม่สามารถหาค่า R และ L ได้ด้วยเครื่องมือวัดค่า R และ L ทั่วๆ ไป ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงเพื่อใช้กับโพลดชนิดนี้ จึงเป็นการออกแบบโดยอาศัยการทดลองโดยเริ่มจากกำหนดจำนวนรอบสูงสุดทางด้านทุติภูมิที่สามารถพันได้จากนั้นพันลวดทางด้านปฐมภูมิเพื่อให้ได้กระแสจ่ายไปยังโพลดได้ที่พิกัด ซึ่งในการพันขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาเคมีถ้าจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนรอบมากขึ้นแต่พื้นที่ไม่เพียงพอ ต้องทำการลดรอบทางด้าน ทฤษฎีเคมีลง ครั้งละ 1 รอบจนสามารถพันขดลวดที่พิกัดกระแสสูงสุดที่ต้องการได้ ซึ่งก็จะทำให้ได้ อัตราส่วนแรงดัน $N_1:N_2$ หลังจากได้อัตราส่วนที่ต้องการ ก็สามารถประมาณค่า R และ L ของ โหลดได้ จากนั้นนำจำนวนรอบที่คำนวณได้และข้อมูลที่ได้ออกมาหา ค่า ความหนาแน่น สนามแม่เหล็กซึ่งเลือกค่าใช้งานอยู่ที่ไม่เกิน 1600 เกาส์ ถ้าเกินกว่าที่กำหนดไม่มากและ สามารถพันจำนวนรอบปฏิกิริยาได้มากขึ้นได้ก็จะพิจารณาเพิ่มจำนวนรอบด้านปฏิกิริยาเป็นอันดับแรก แต่ถ้าค่าความหนาแน่นสูงกว่า 2000 เกาส์ จะพิจารณาขานานแกนเพิ่มเข้าไปอีก แล้วเริ่ม ทดสอบหาขดลวดปฏิกิริยาใหม่ต่อไป แต่กรณีที่ ความหนาแน่นที่คำนวณได้มีค่าน้อย มากกว่า 1000 เกาส์ ก็จะพิจารณาลดจำนวนรอบและเพิ่มจำนวนเส้นลวดทีเกลียวด้านปฏิกิริยา เพื่อลดกำลังงานสูญเสียในตัวนำ

3.4 การพิจารณาออกแบบและเลือกใช้ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนเป็นส่วนประกอบสำคัญที่สุดส่วนหนึ่งของงานทำให้ ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความร้อนสูง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้า เพื่อแปลงรูปพลังงานให้อยู่ในรูปแบบกำลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เพื่อจะใช้เส้นแรง แม่เหล็กนี้ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานซึ่งปกติจะเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นสารแม่เหล็กเช่น เหล็ก เป็นต้น

แนวทางพื้นฐานการเลือกพิจารณาออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

ในการออกแบบและพิจารณาเลือกขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนที่ใช้ในงานใน วิทยานิพนธ์นี้ ได้อาศัยแนวทางการพิจารณาศึกษาจาก ข้อมูลของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีใช้กันใน อุตสาหกรรมการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำโดยทั่วไปประกอบกับลักษณะพิกัดต่างๆ และ จุดประสงค์และลักษณะการนำไปใช้งานโดยมีแนวทาง 5 ประการดังต่อไปนี้

1) กระแสที่ผ่านขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน ในการออกแบบแหล่งจ่ายให้ ความร้อนเหนี่ยวนำความร้อนต้นแบบได้เลือกที่จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนท์อนุกรม ชนิดจ่ายแรงดันเป็นแหล่งจ่ายกำลัง ซึ่งจะมีแรงดัน DC เท่ากับ 310 โวลต์ดังนั้นโดยปกติขดลวด เหนี่ยวนำความร้อนที่มีใช้ทั่วไปจะมีจำนวนรอบน้อยมาก ซึ่งจะไม่สามารถรับแรงดันที่สูงได้ ดังนั้นจึง จำเป็นต้องลดระดับแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนลงในระดับที่ ขดลวดและแหล่งจ่ายความถี่สูงสามารถเข้ากันได้ ซึ่งทำโดยใช้หม้อแปลงลดระดับแรงดันลง ซึ่ง ก็จะทำให้กระแสด้านทฤษฎีจะมีกระแสสูง ดังนั้นในการออกแบบขดลวดจึงจำเป็นที่จะต้องให้ สามารถรับปริมาณกระแสที่สูงได้ไม่เกินประมาณ 150 แอมป์ และเนื่องจากเป็นการใช้งานที่ ความถี่สูงซึ่งมีผลของ Skin effect ทำให้ กระแสส่วนใหญ่ไหลเฉพาะที่บริเวณผิวของตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นขดลวดเหนี่ยวนำจำเป็นต้องมีพื้นที่ผิวมากพอเพื่อลดกำลังงานสูญเสียจากค่าความต้านทานของตัวนำ ขดลวดจึงต้องมีพื้นที่เพียงพอในการให้กระแสไหลได้อย่างเพียงพอ

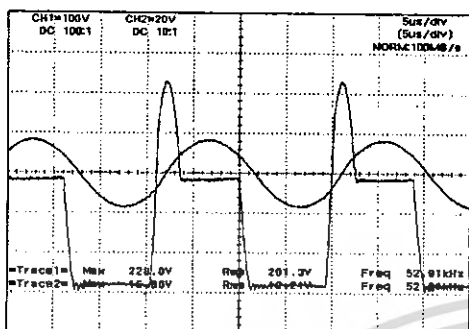
2) ลักษณะรูปทรงขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน จากลักษณะโหลดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ซึ่งได้เลือกใช้แท่งเหล็กรูปทรงกระบอกตันและพื้นที่ที่ต้องการให้เกิดความร้อนจะเป็นบริเวณผิวของแท่งเหล็ก ดังนั้นขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนจะมีลักษณะเป็นขดลวดทรงกระบอก ซึ่งพันอยู่รอบแท่งเหล็กชิ้นงานและขดลวดจะพันให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยที่สุดเพื่อขดลวดจะสามารถเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กไปยังแท่งเหล็กได้มากที่สุด

3) กำลังงานที่ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน ในวิทยานิพนธ์ได้กำหนดพิกัดกำลังด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ที่ 3 KVA ดังนั้นขนาดกำลังของเครื่อง ขนาดของชิ้นงานและพื้นที่การให้ความร้อนจะมีความสัมพันธ์กับขนาดและจำนวนรอบของขดลวดรวมทั้งความเร็วของช่วงเวลาในการให้ความร้อนด้วย ซึ่งพิจารณาเลือกความเหมาะสมได้จากการทดสอบในหัวข้อต่อไป

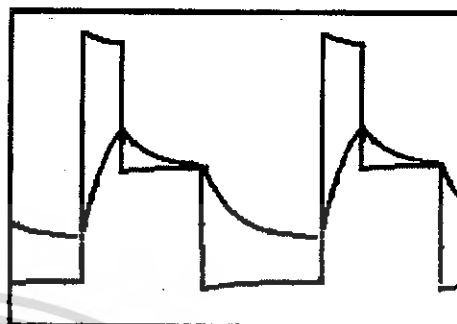


บทที่ 4 ผลการทดลองและซิมูเลต ที่มุมเลื่อนเฟส 120 องศา

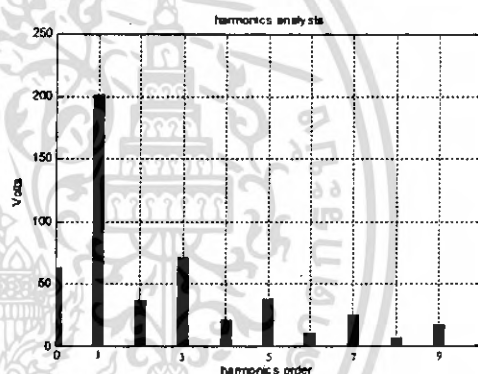
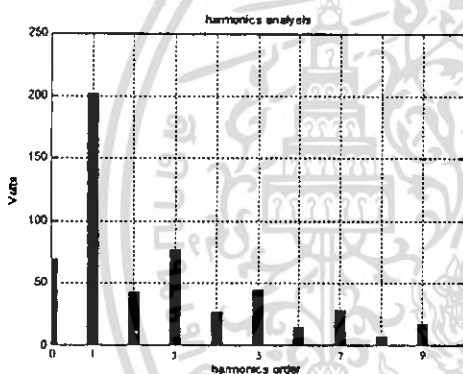
ทดลอง



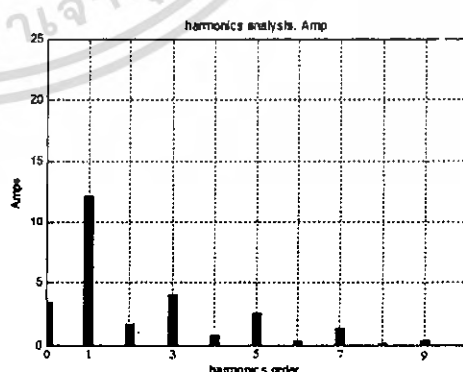
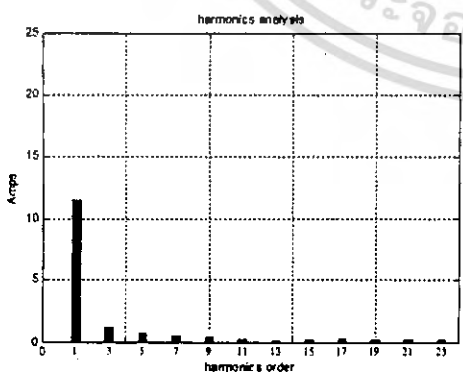
simulation



รูปที่ 4.1 คลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.2 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

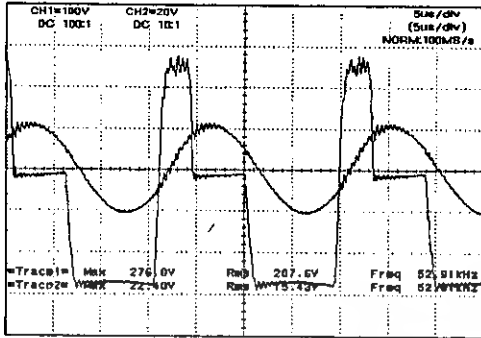


รูปที่ 4.3 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

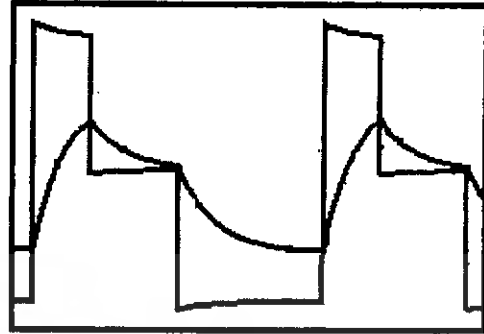
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมคลื่นเฟส 110 องศา

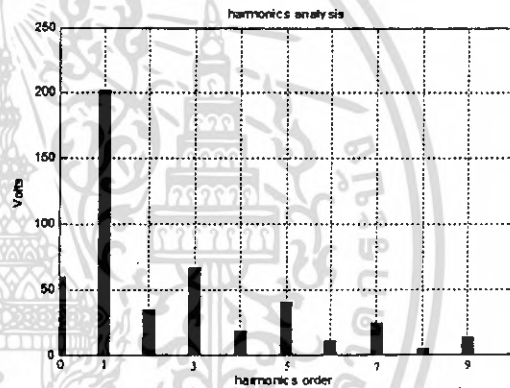
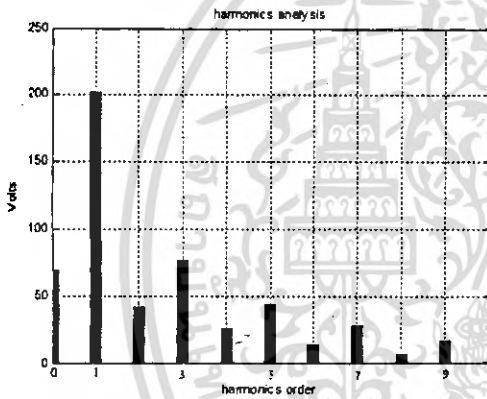
ทดลอง



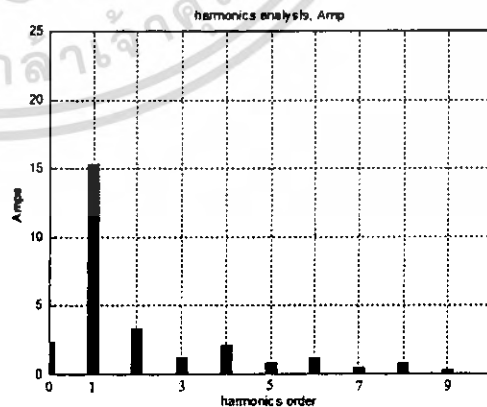
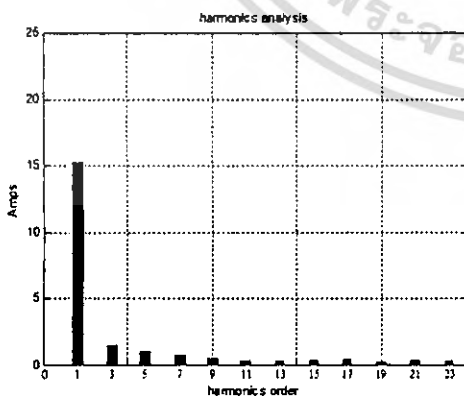
simulation



รูปที่ 4.4 คลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและ การ simulation



รูปที่ 4.5 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

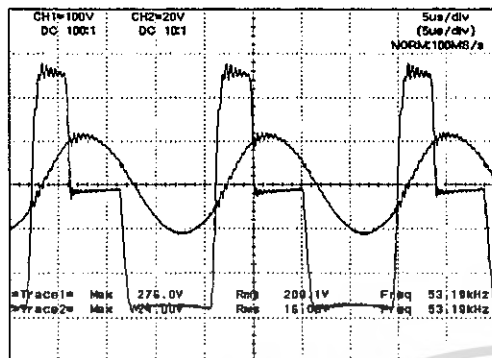


รูปที่ 4.6 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

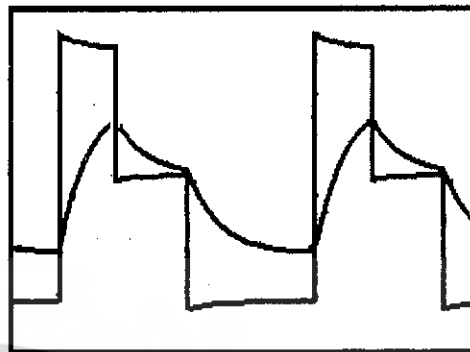
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมคลื่นเฟส 100 องศา

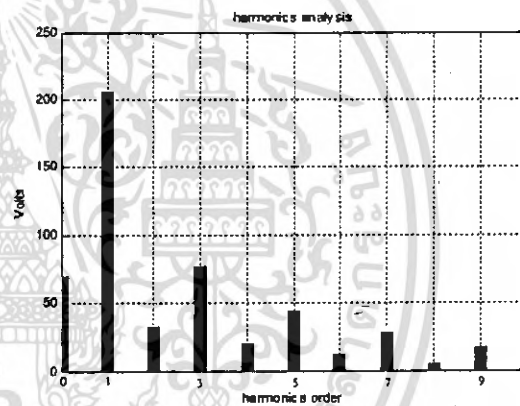
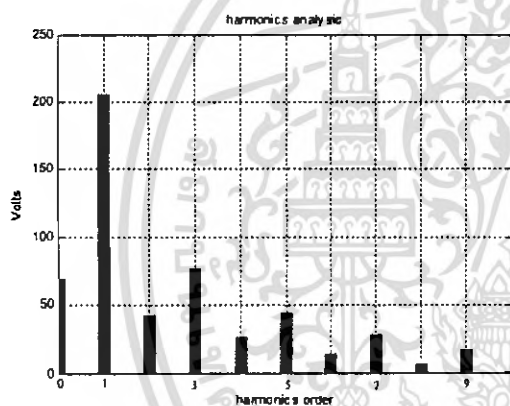
ทดลอง



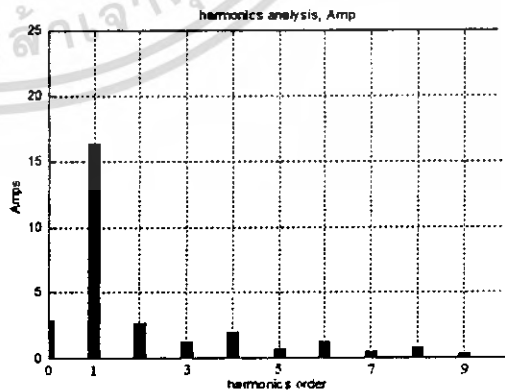
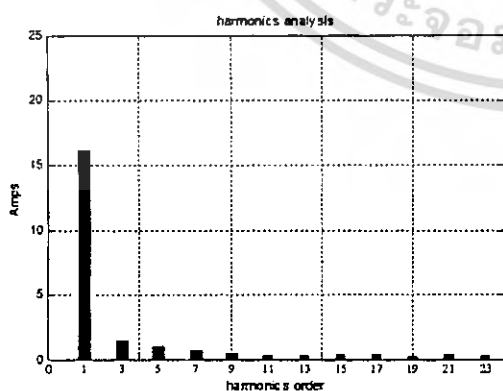
simulation



รูปที่ 4.7 คลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.8 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

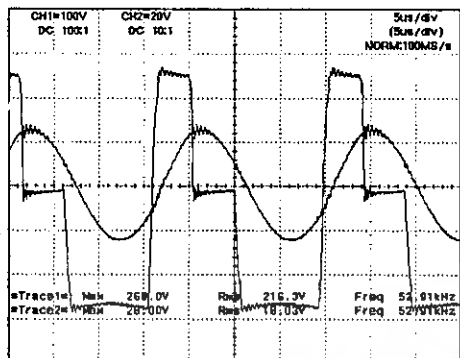


รูปที่ 4.9 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

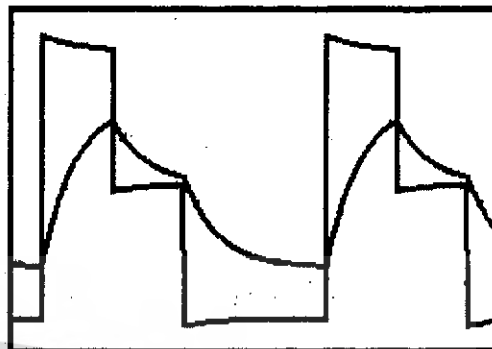
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมเลื่อนเฟส 90 องศา

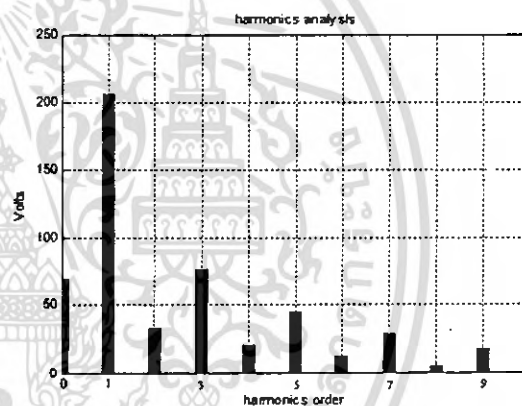
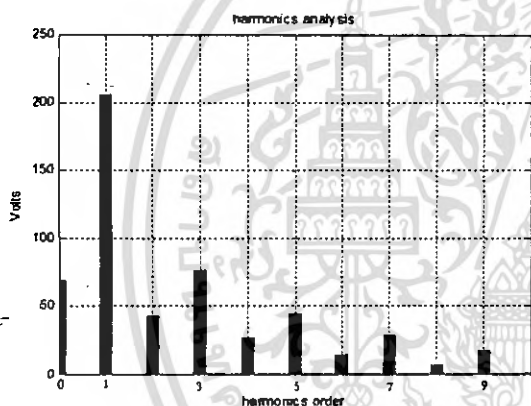
ทดลอง



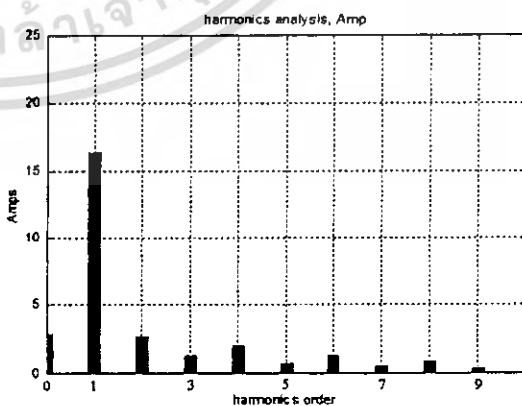
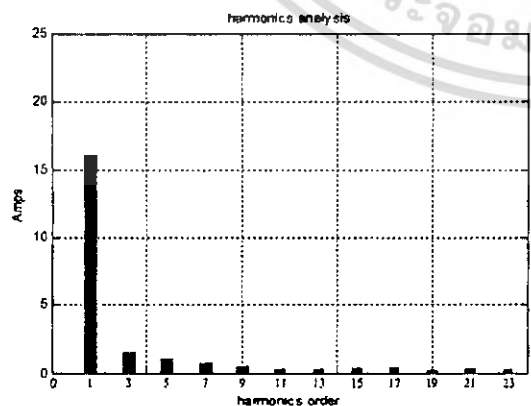
simulation



รูปที่ 4.10 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.11 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

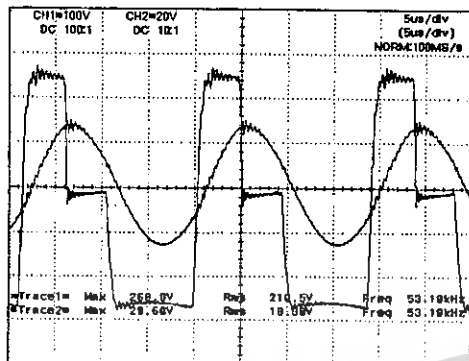


รูปที่ 4.12 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

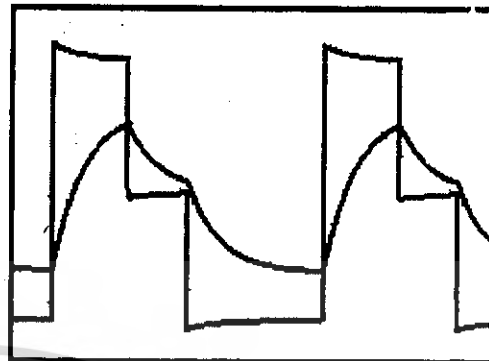
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมุมเคลื่อนเฟส 80 องศา

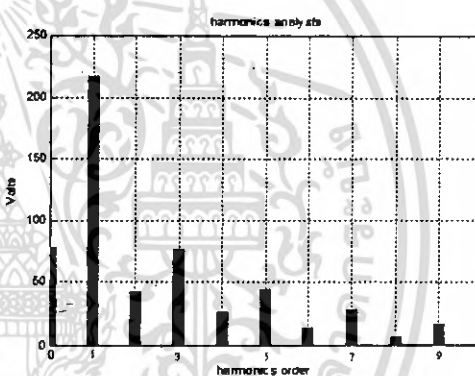
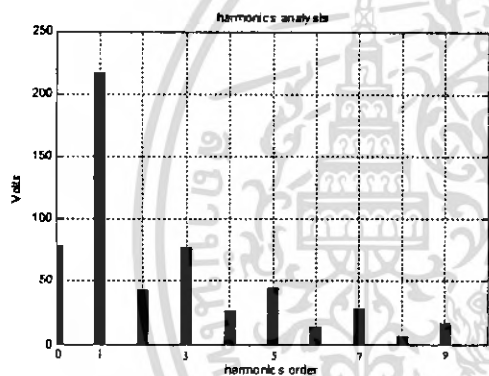
ทดลอง



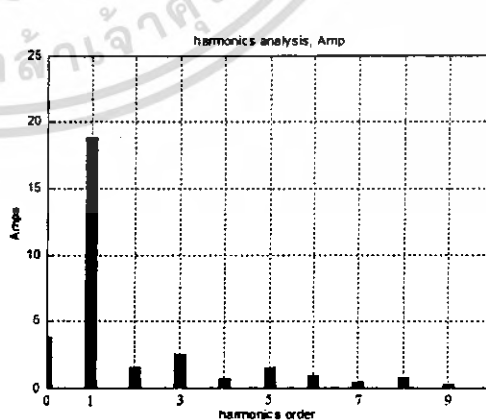
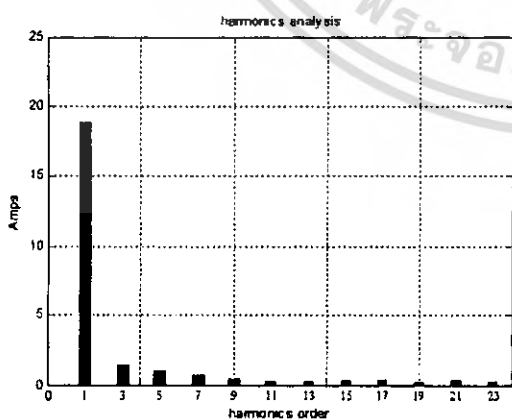
simulation



รูปที่ 4.13 คลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.14 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

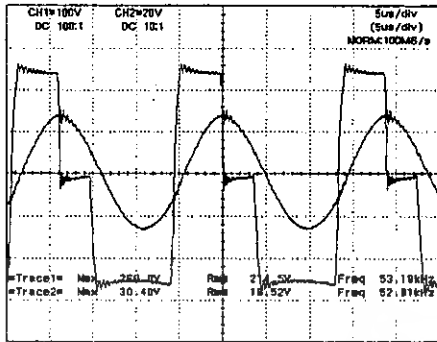


รูปที่ 4.15 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

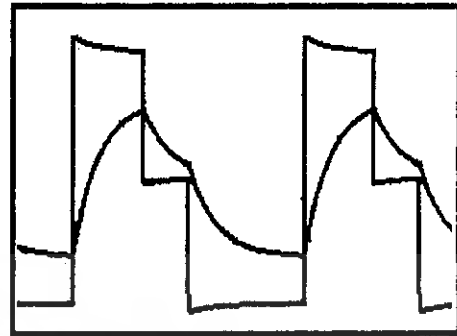
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมคลื่นเฟส 70 องศา

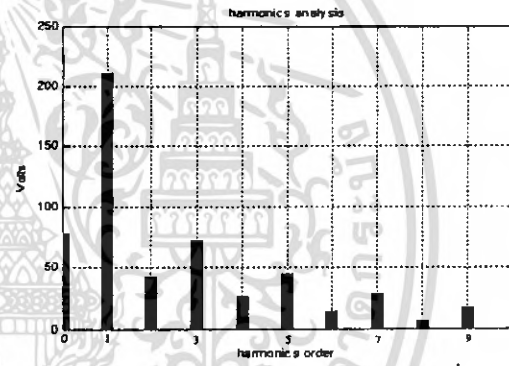
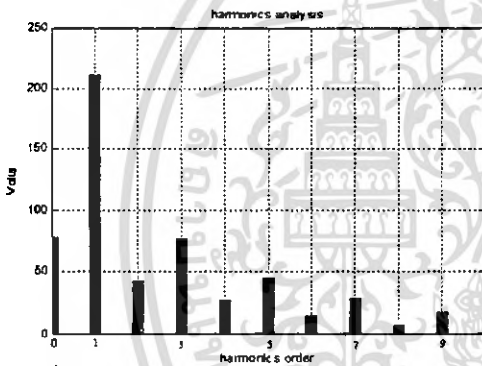
ทดลอง



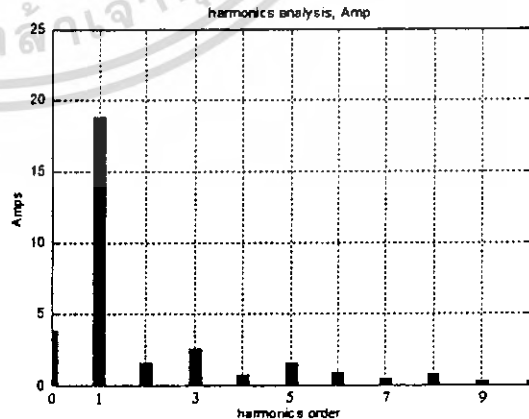
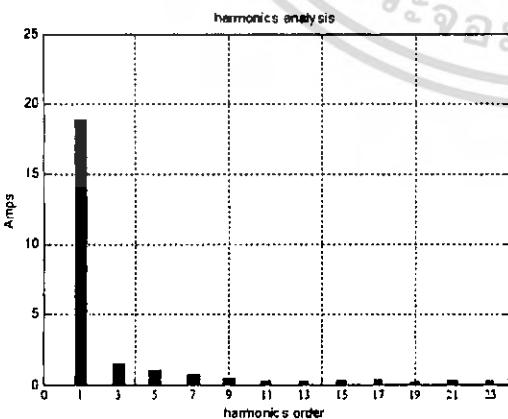
simulation



รูปที่ 4.16 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.17 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

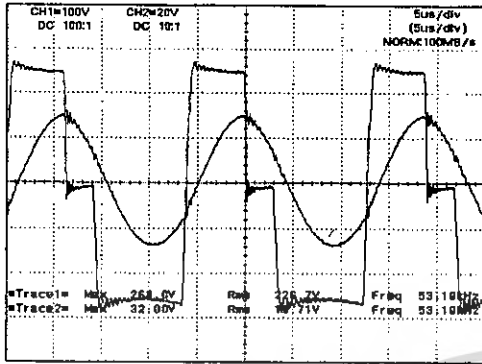


รูปที่ 4.18 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

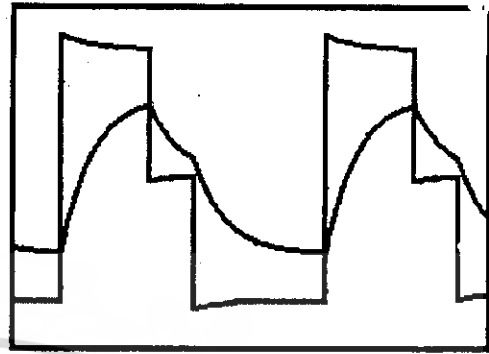
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมเดือนเฟส 60 องศา

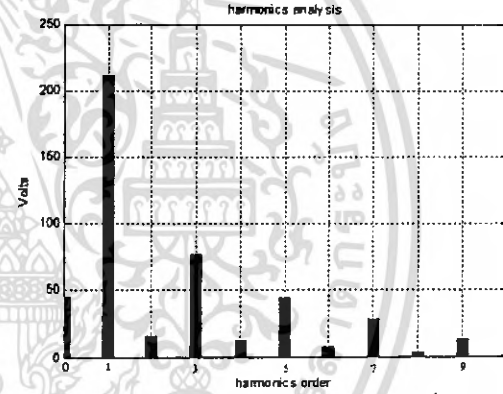
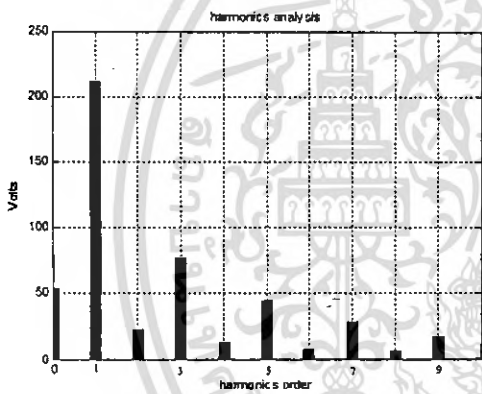
ทดลอง



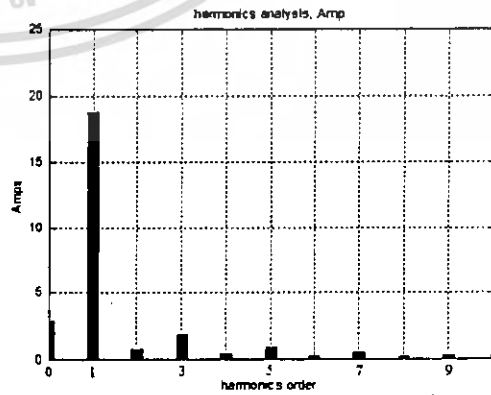
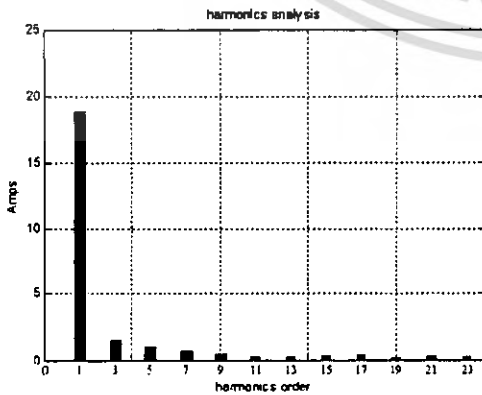
simulation



รูปที่ 4.19 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.20 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

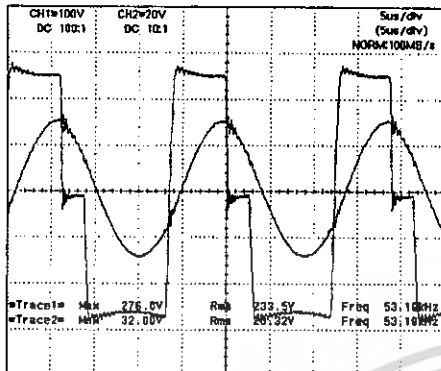


รูปที่ 4.21 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulation

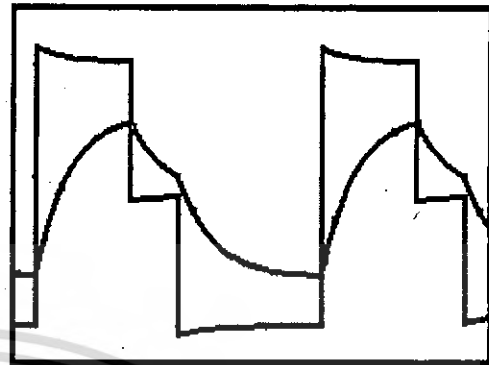
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมคลื่นเฟส 50 องศา

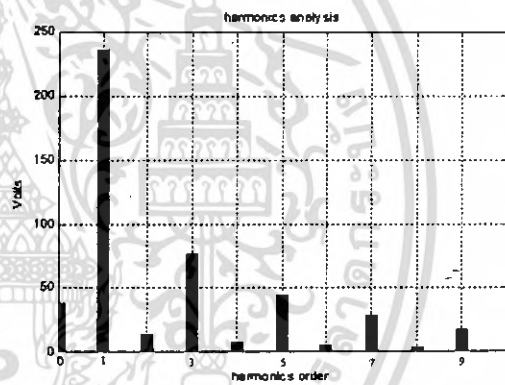
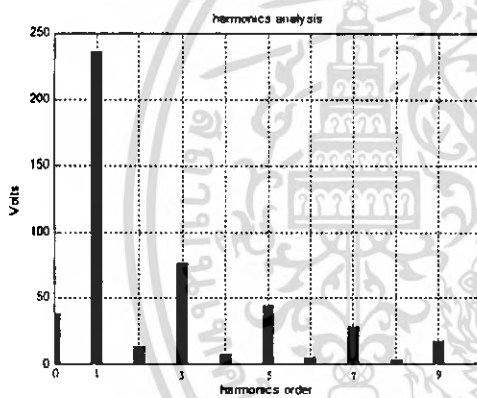
ทดลอง



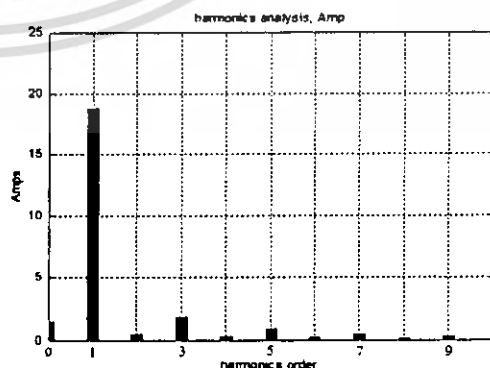
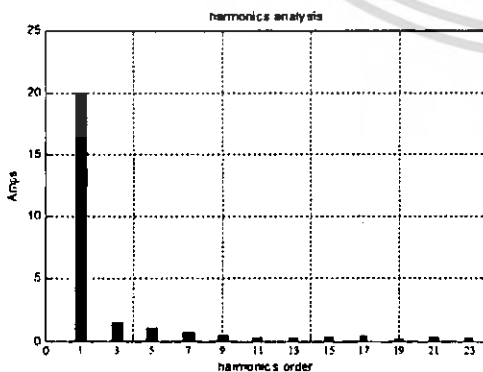
simulation



รูปที่ 4.22 คลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.23 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

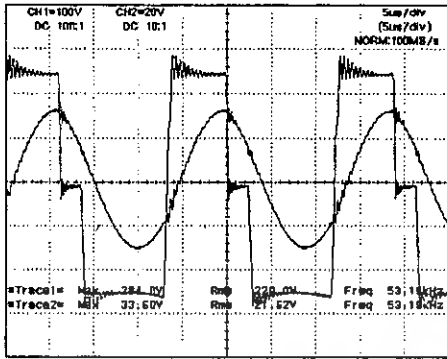


รูปที่ 4.24 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการsimulation

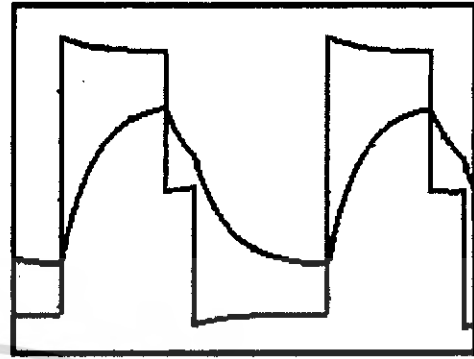
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมคลื่นเฟส 40 องศา

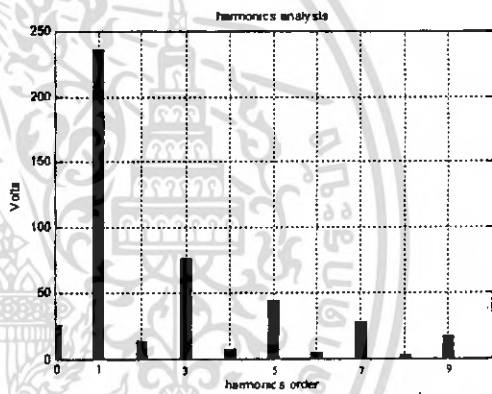
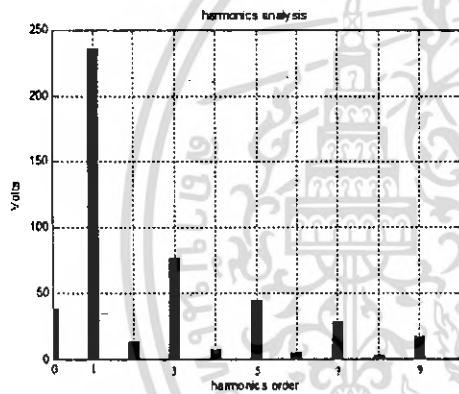
ทดลอง



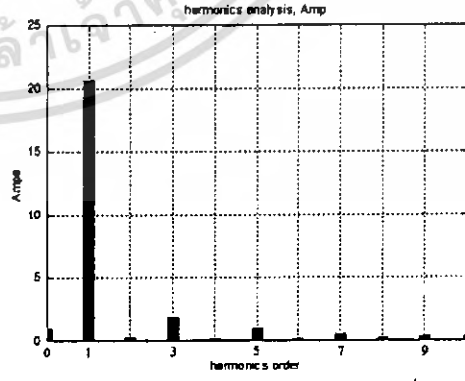
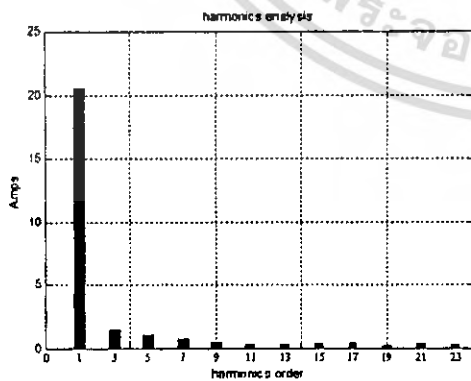
simulation



รูปที่ 4.25 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.26 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

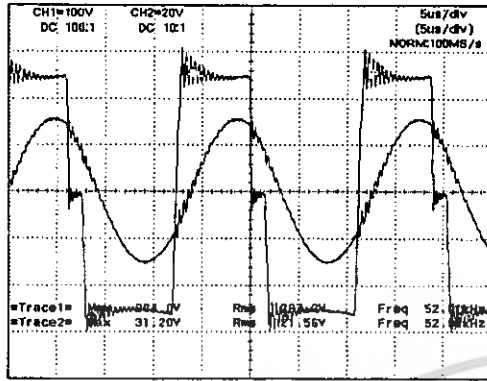


รูปที่ 4.27 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาท์พุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

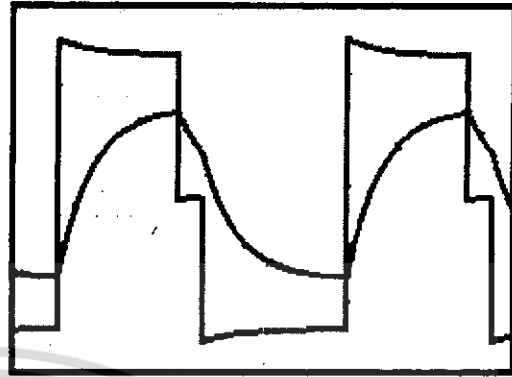
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีหม้อเหนี่ยวนำ 30 องศา

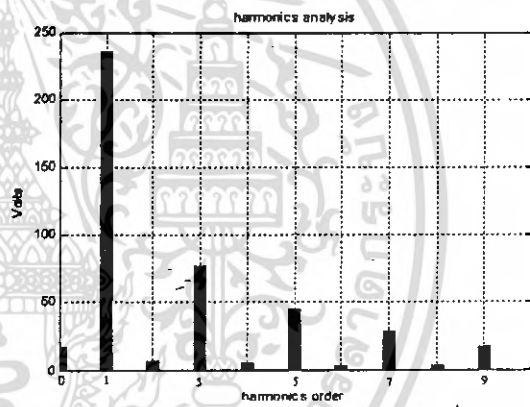
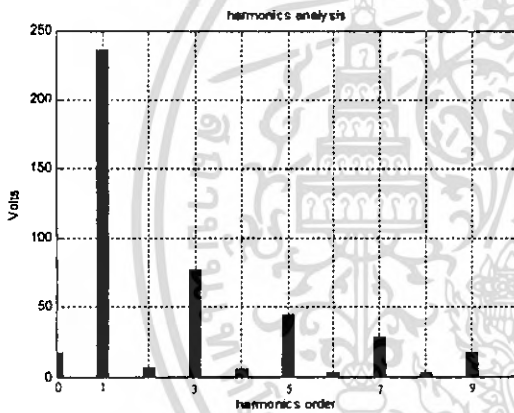
ทดลอง



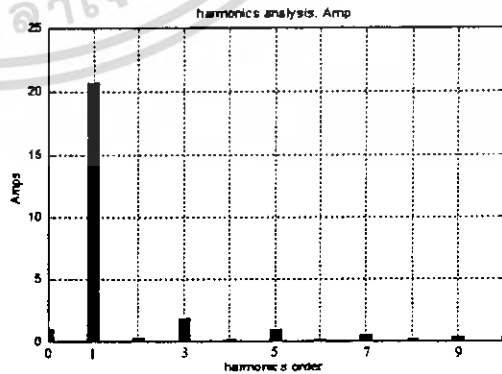
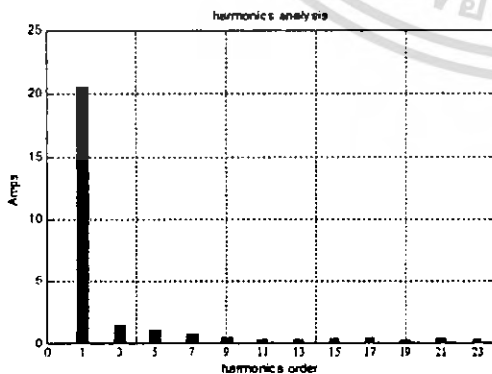
simulation



รูปที่ 4.28 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.29 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

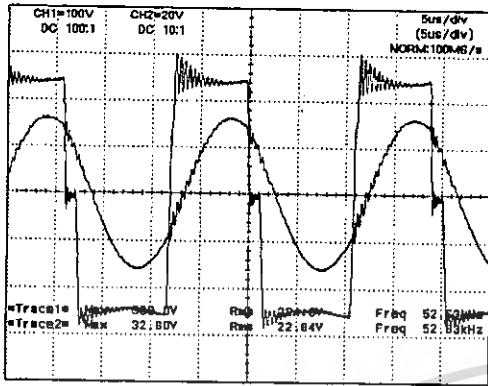


รูปที่ 4.30 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

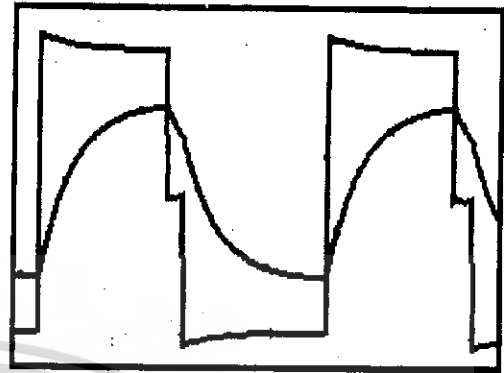
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมคลื่นเฟส 20 องศา

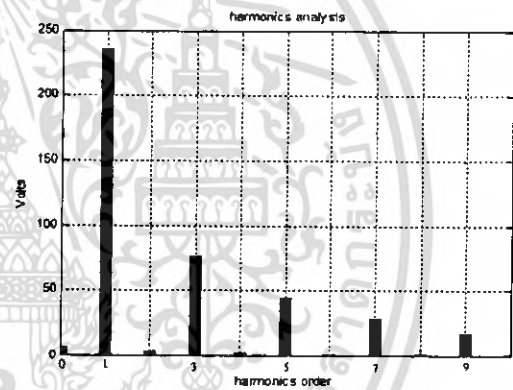
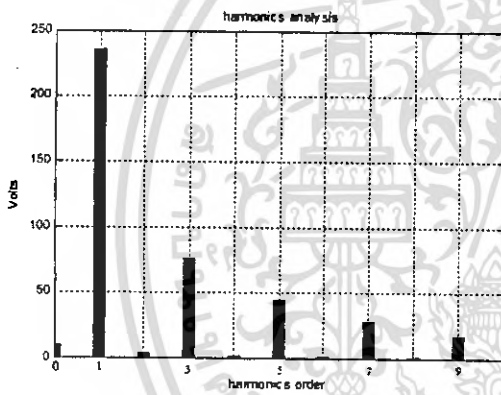
ทดลอง



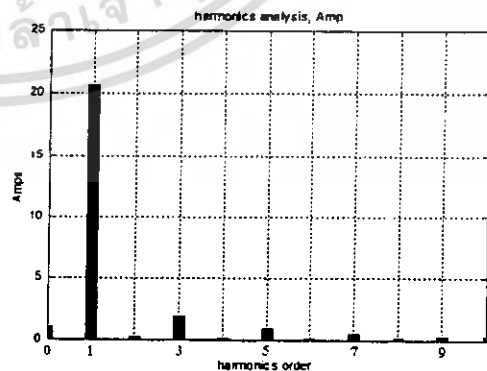
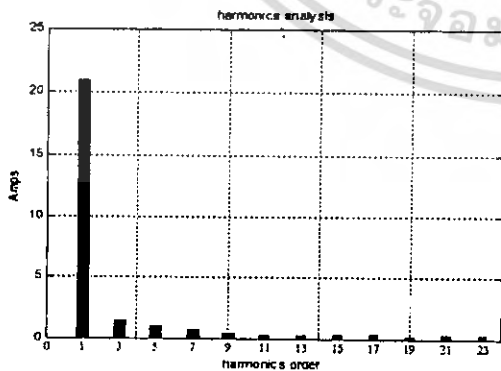
simulation



รูปที่ 4.31 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.32 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

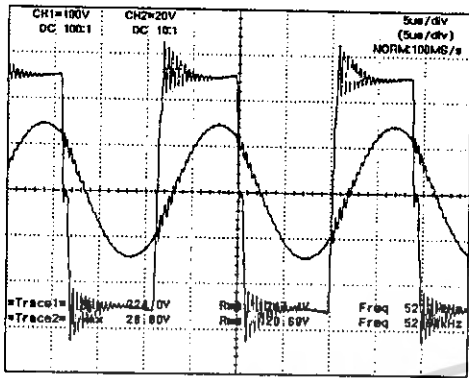


รูปที่ 4.33 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

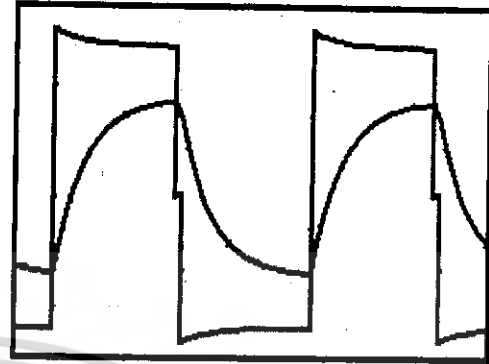
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีคลื่นเฟส 10 องศา

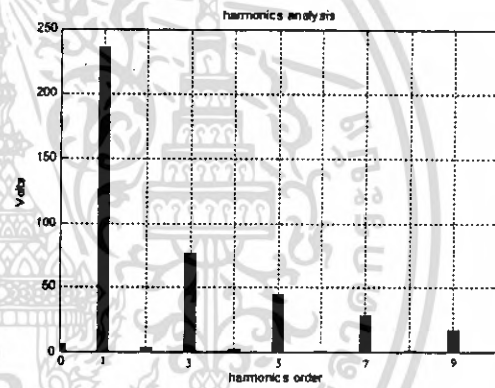
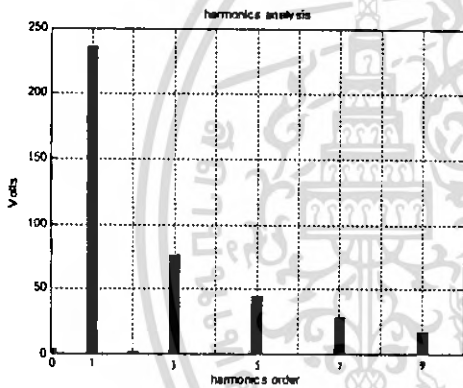
ทดลอง



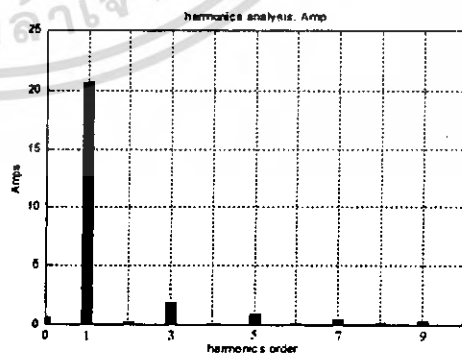
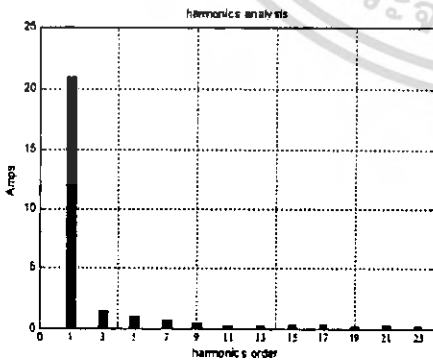
simulation



รูปที่ 4.34 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



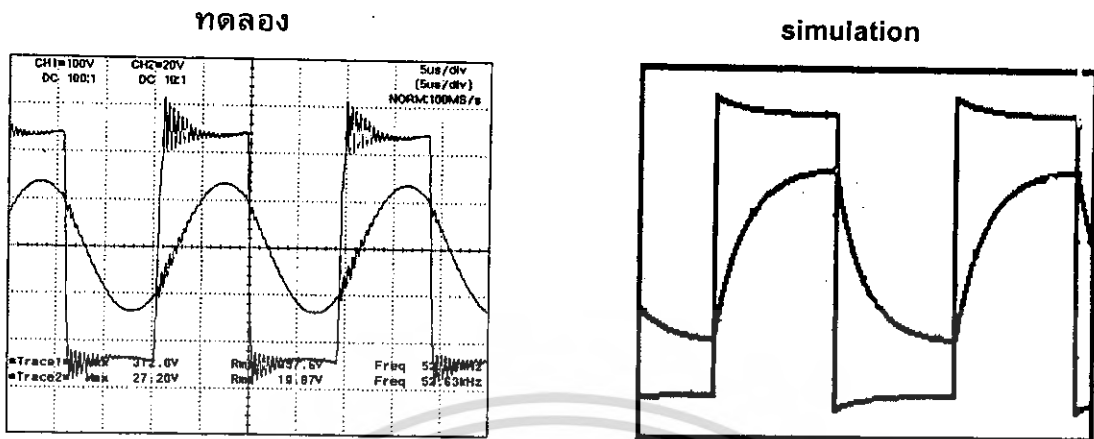
รูปที่ 4.35 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



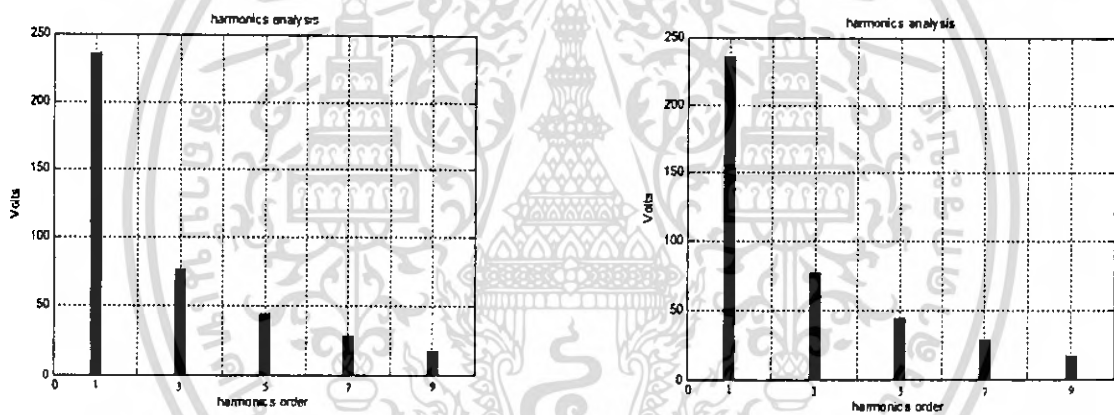
รูปที่ 4.36 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

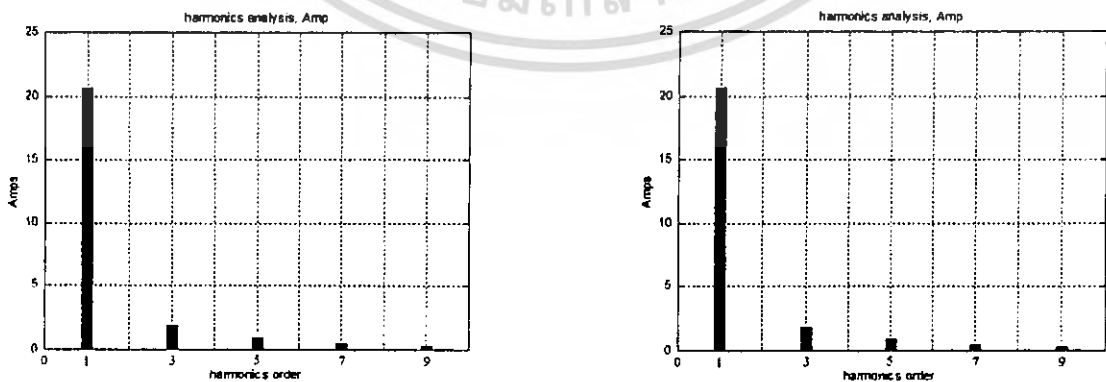
ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา



รูปที่ 4.37 คลื่นแรงดันและกระแสต้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



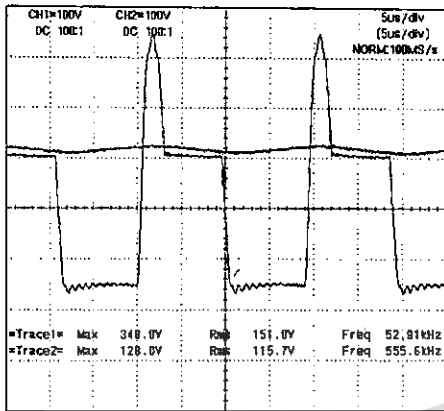
รูปที่ 4.38 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



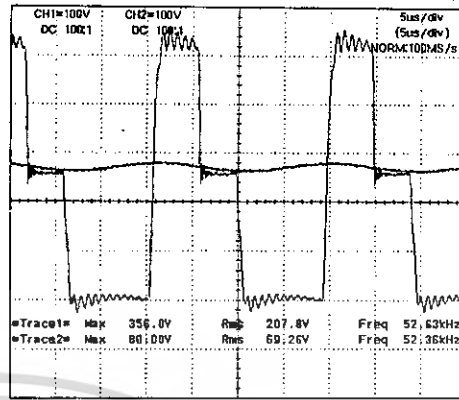
รูปที่ 4.39 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านเอาต์พุตของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

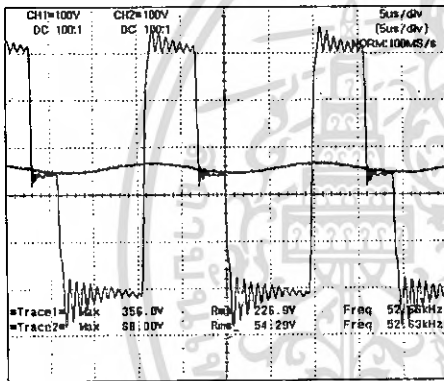
คลื่นแรงดันที่ C Blocking



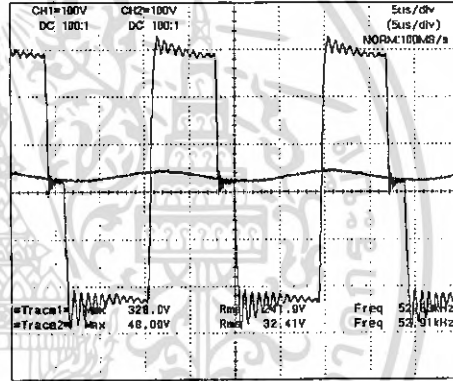
รูปที่ 4.40 ที่ C Blocking ณ มุม 60 องศา



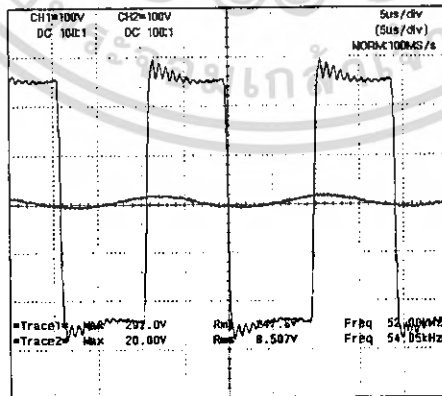
รูปที่ 4.41 ที่ C Blocking ณ มุม 90 องศา



รูปที่ 4.42 ที่ C Blocking ณ มุม 120 องศา



รูปที่ 4.43 ที่ C Blocking ณ มุม 150 องศา

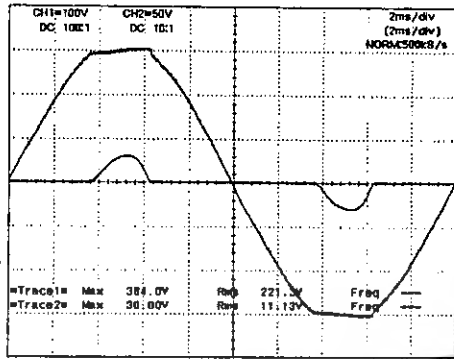


รูปที่ 4.44 ที่ C Blocking ณ มุม 180 องศา

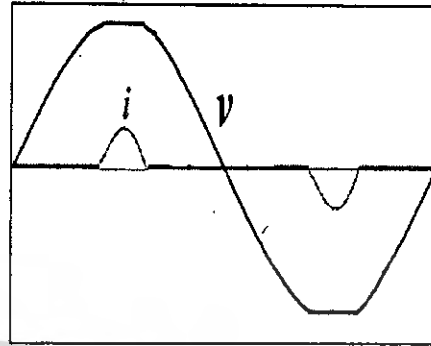
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีคลื่นเคลื่อนที่ 120 องศา

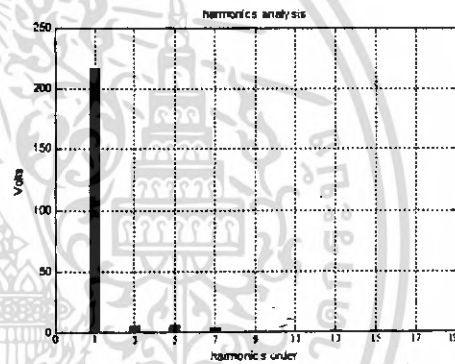
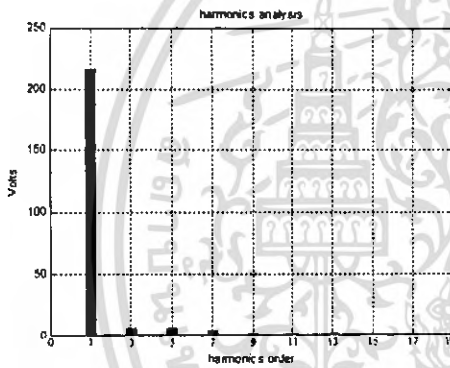
ทดลอง



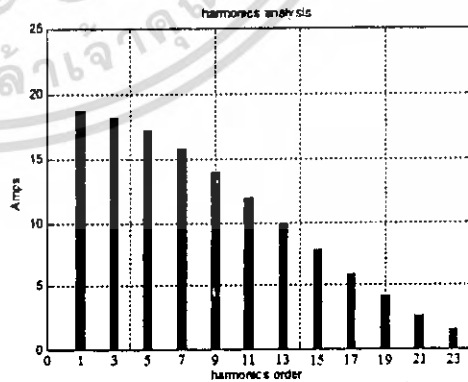
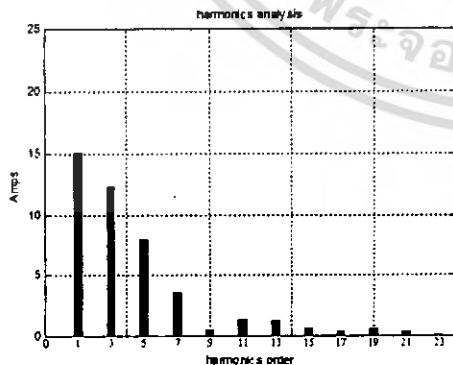
simulation



รูปที่ 4.45 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.46 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

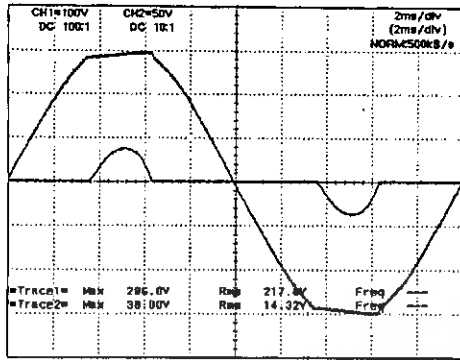


รูปที่ 4.47 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

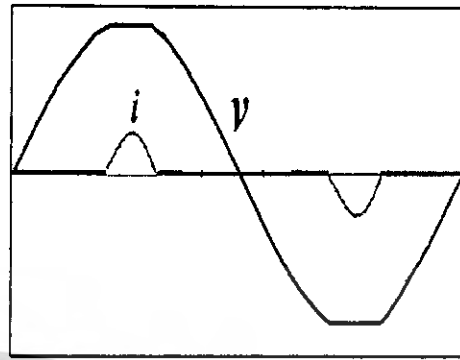
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อเคลื่อนเฟส 110 องศา

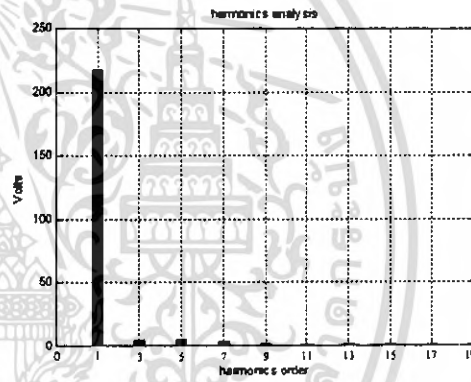
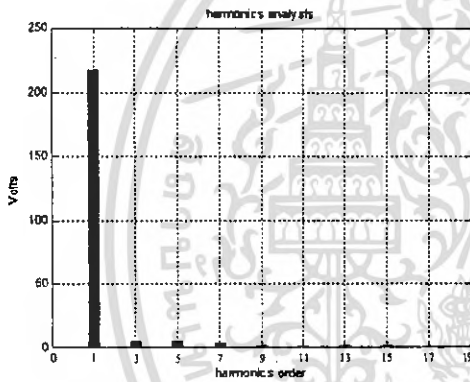
ทดลอง



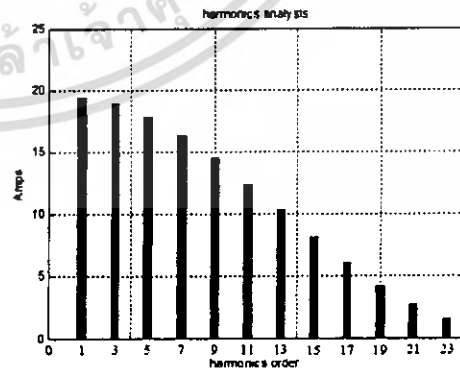
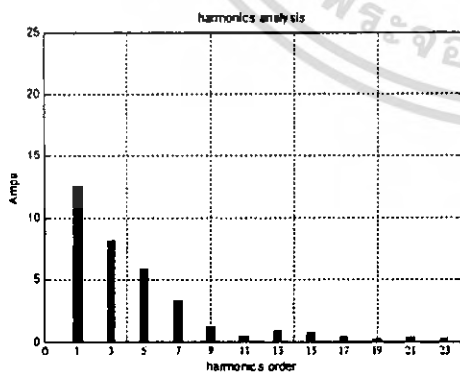
simulation



รูปที่ 4.48 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.49 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

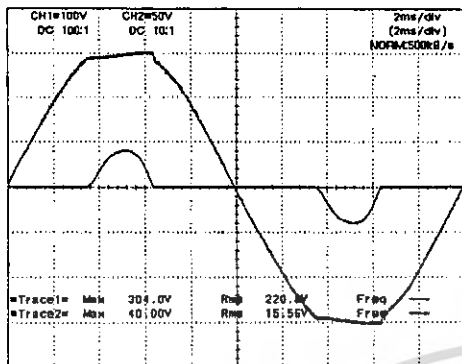


รูปที่ 4.50 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

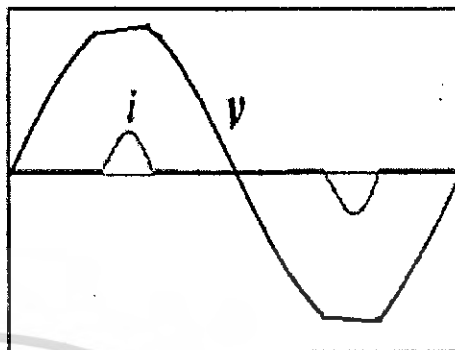
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมคลื่นเฟส 100 องศา

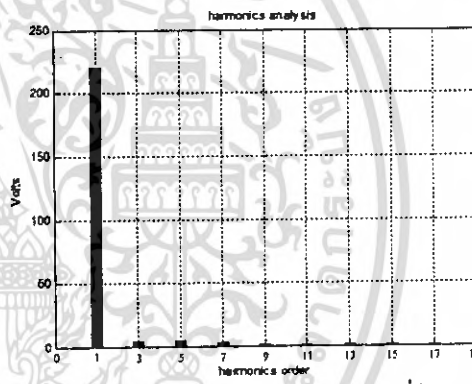
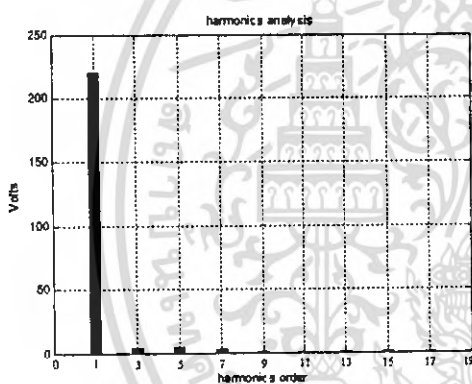
ทดลอง



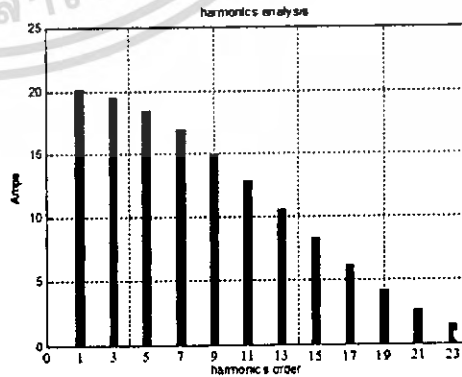
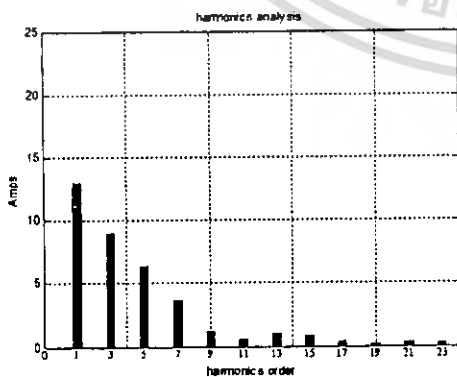
simulation



รูปที่ 4.51 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.52 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

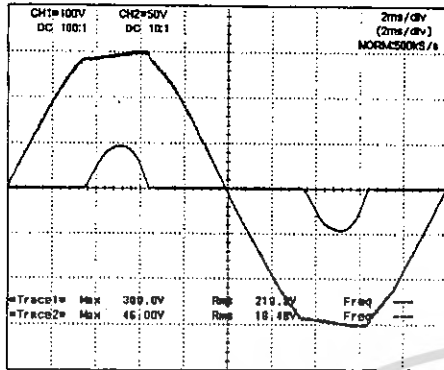


รูปที่ 4.53 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

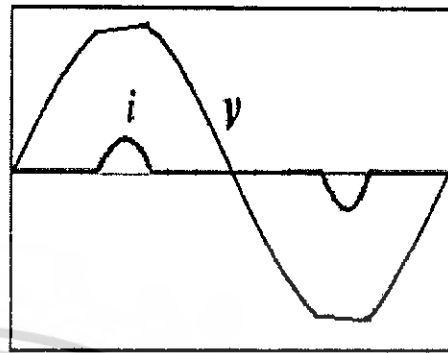
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมเลื่อนเฟส 90 องศา

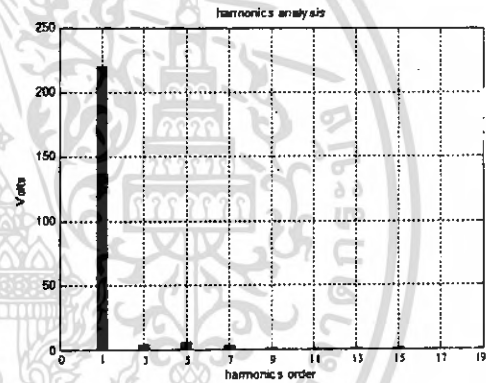
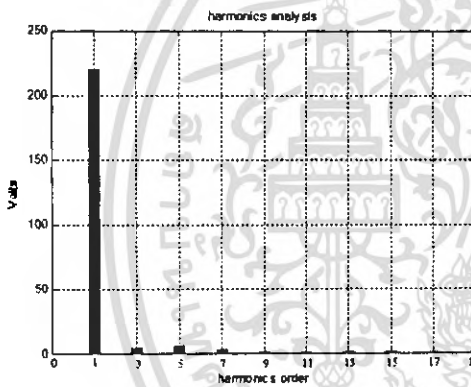
ทดลอง



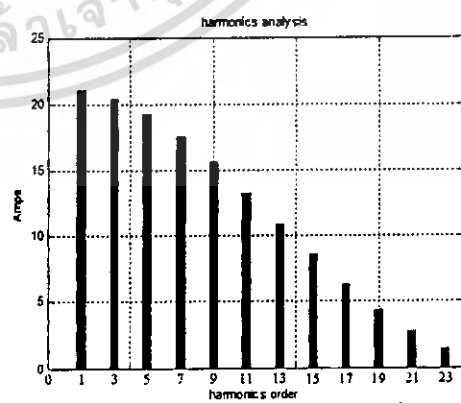
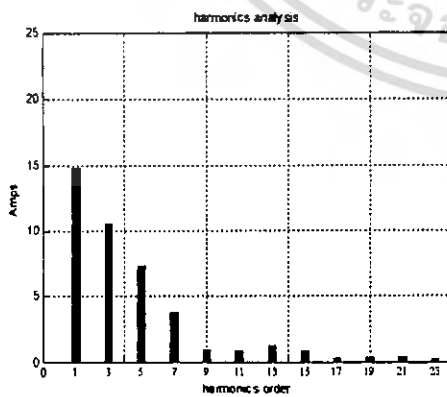
simulation



รูปที่ 4.54 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.55 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

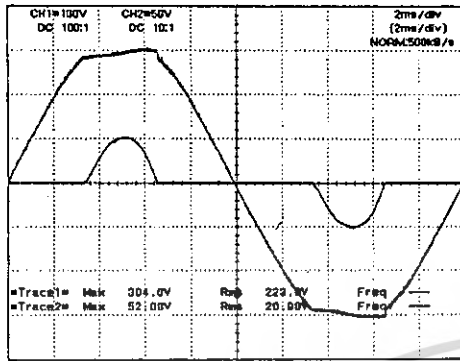


รูปที่ 4.56 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

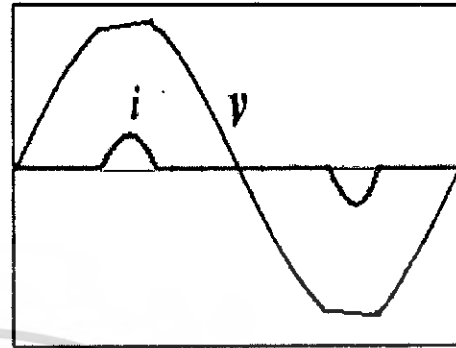
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมคลื่นเฟส 80 องศา

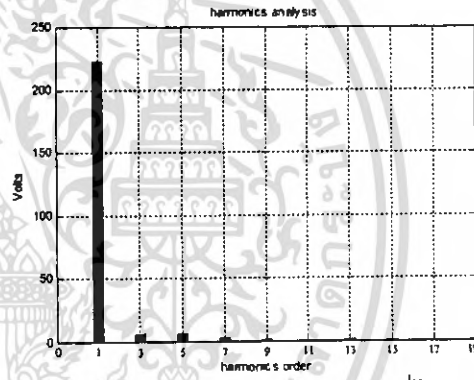
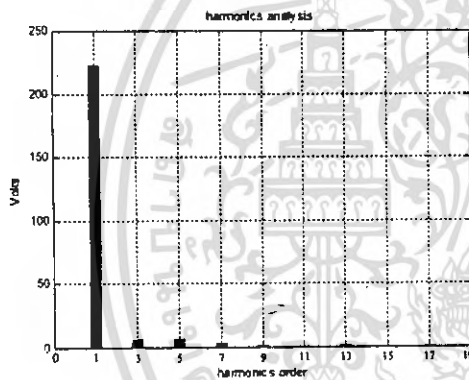
ทดลอง



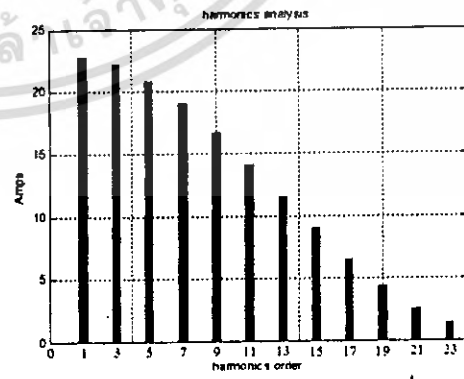
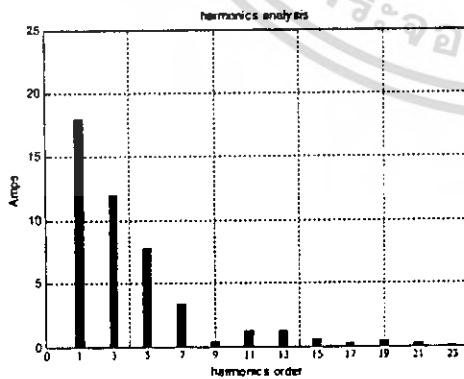
simulation



รูปที่ 4.57 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.58 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

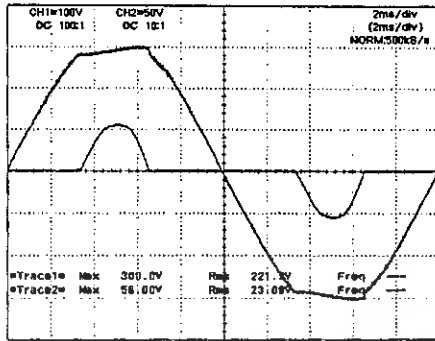


รูปที่ 4.59 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

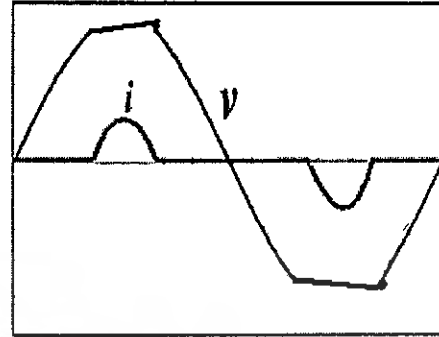
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมเดือนเฟส 70 องศา

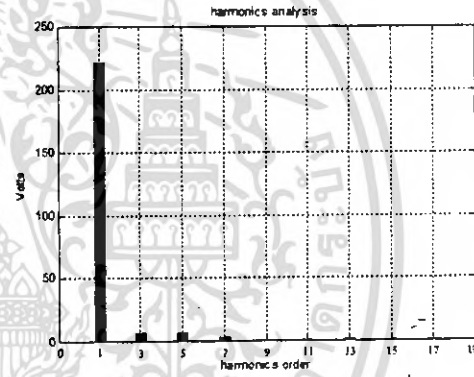
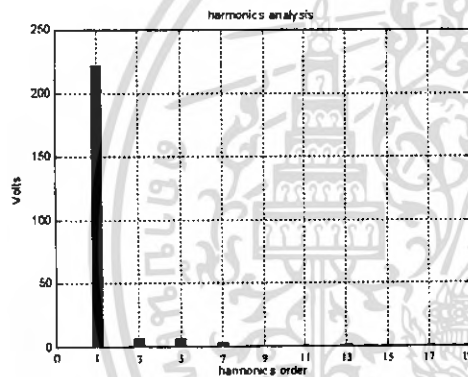
ทดลอง



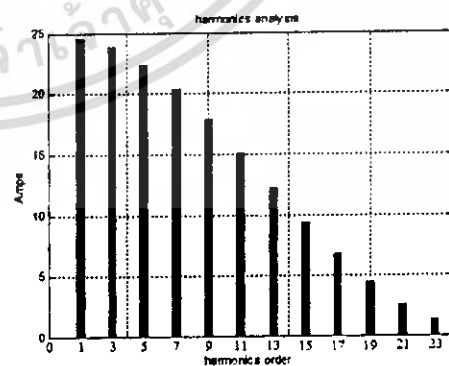
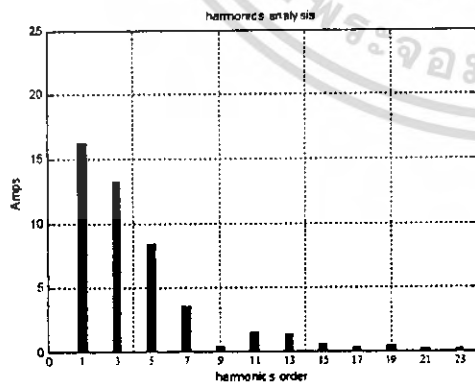
simulation



รูปที่ 4.60 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.61 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

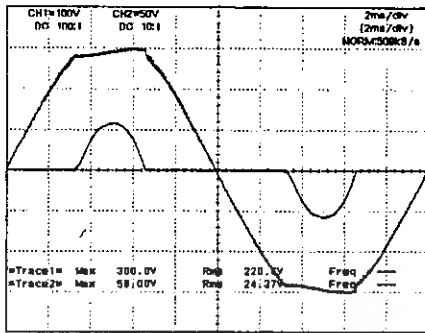


รูปที่ 4.62 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

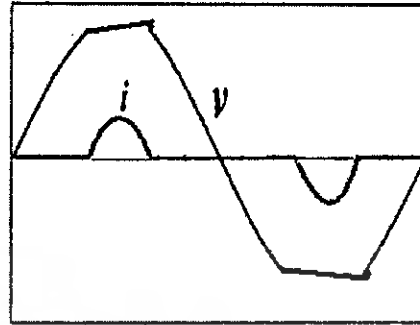
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมคลื่นเฟส 60 องศา

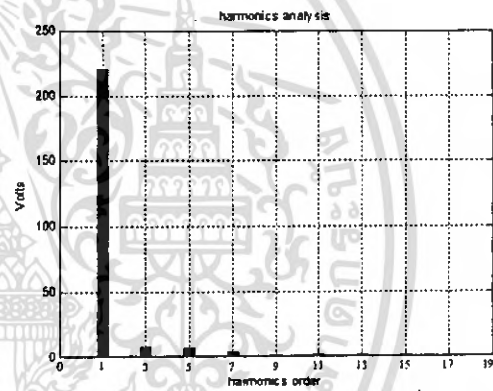
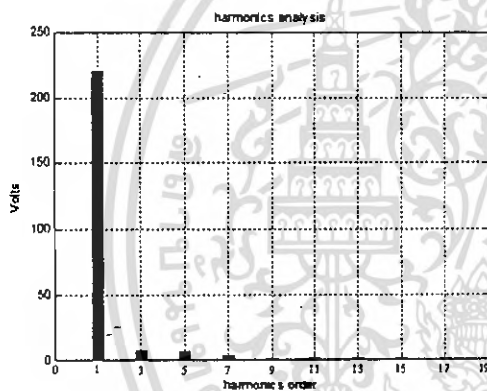
ทดลอง



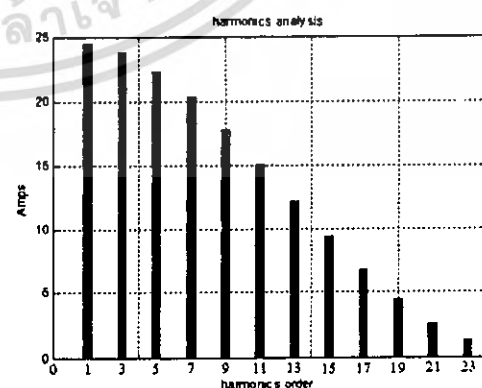
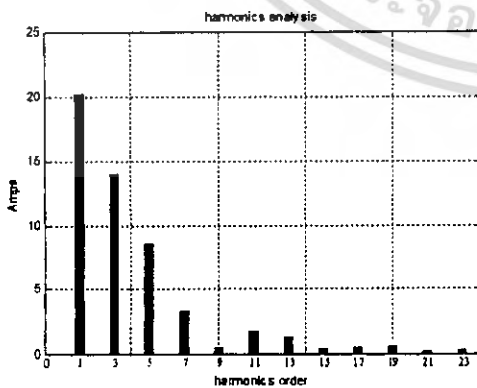
simulation



รูปที่ 4.63 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.64 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

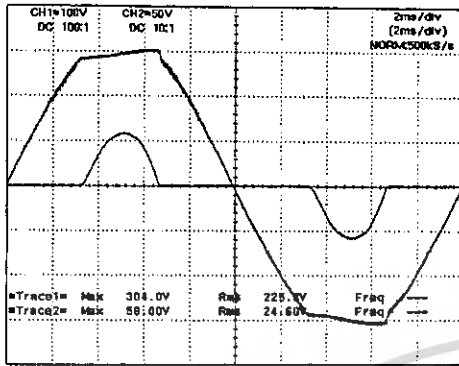


รูปที่ 4.65 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

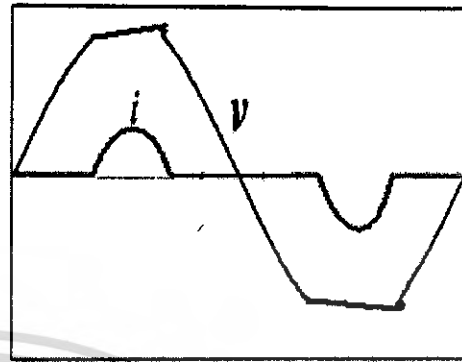
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมคลื่นเฟส 50 องศา

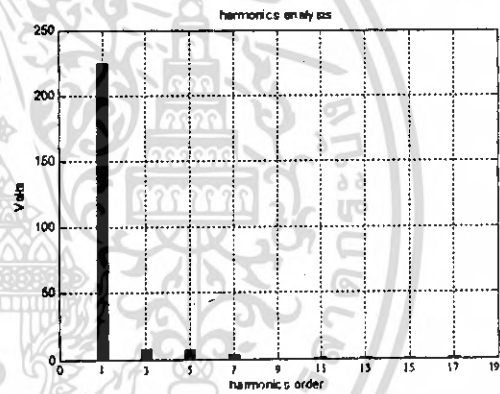
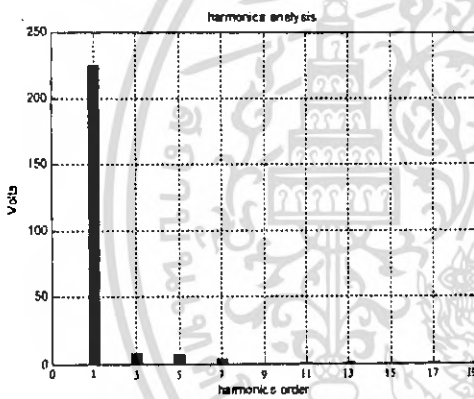
ทดลอง



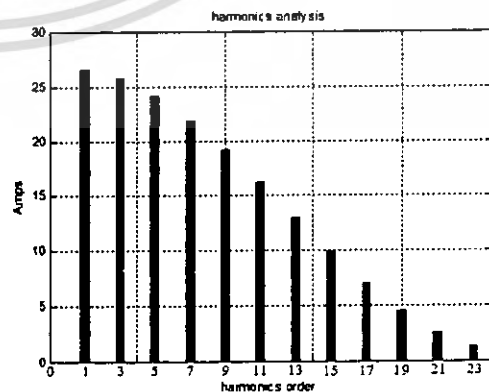
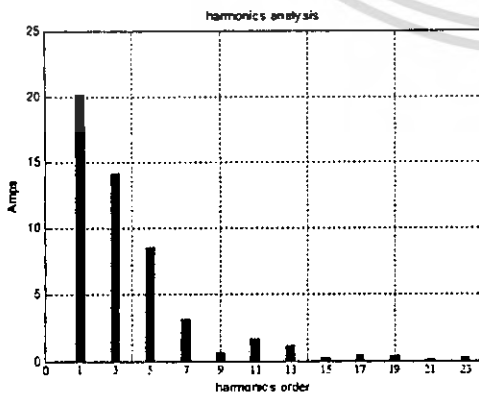
simulation



รูปที่ 4.66 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.67 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

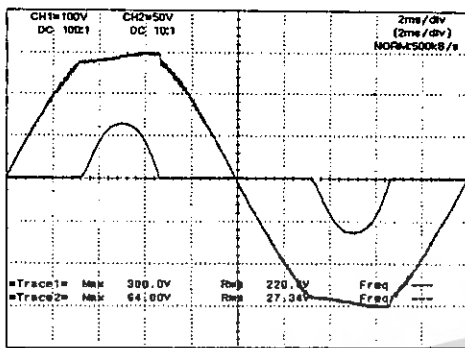


รูปที่ 4.68 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

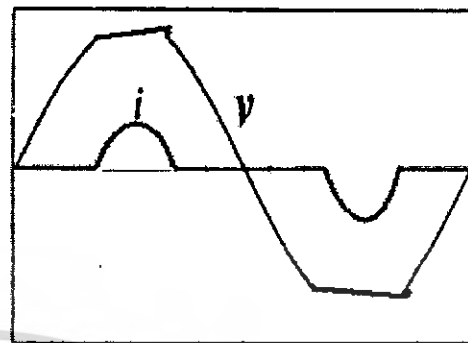
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อต้มไฟฟ้า 40 องศา

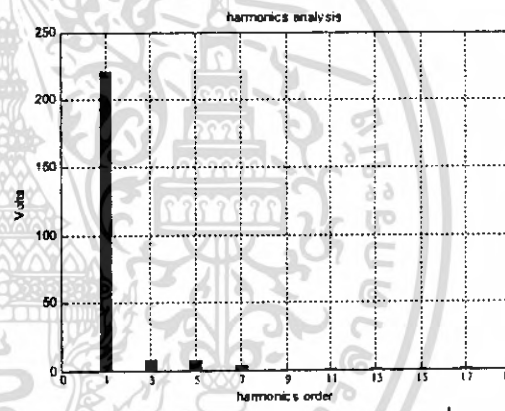
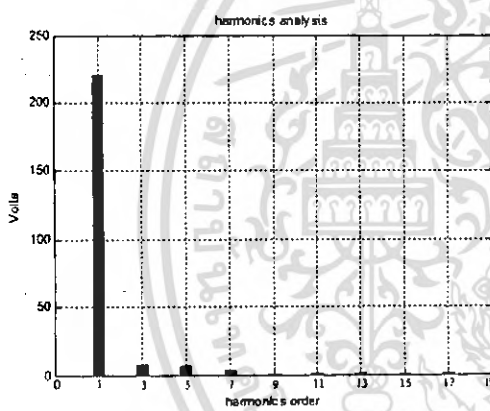
ทดลอง



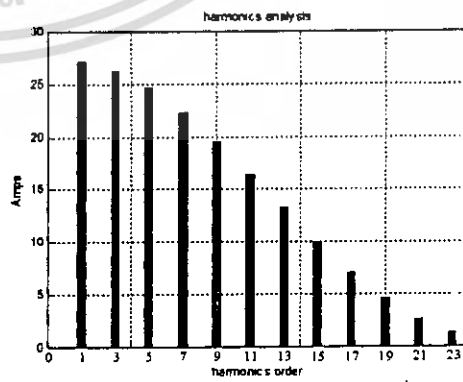
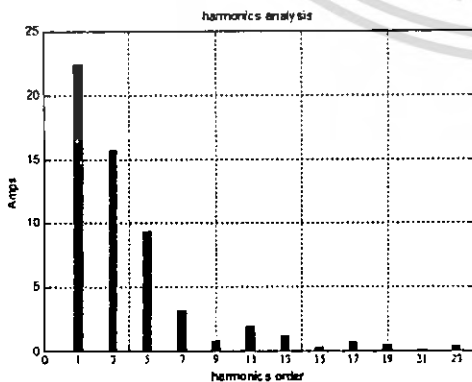
simulation



รูปที่ 4.69 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.70 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

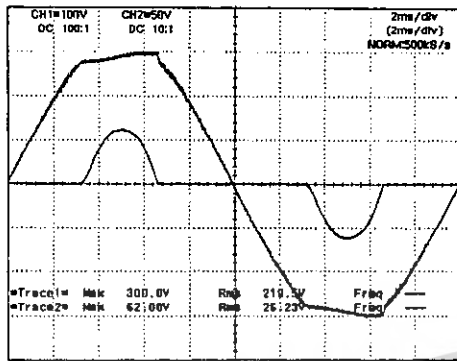


รูปที่ 4.71 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

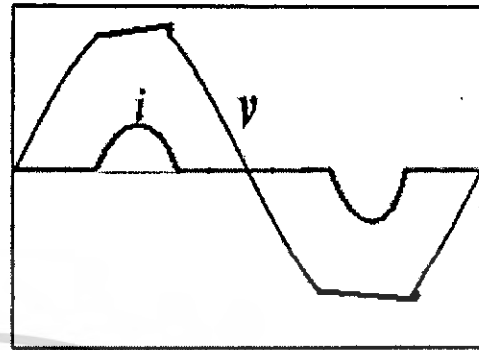
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อเหนี่ยวนำ 30 องศา

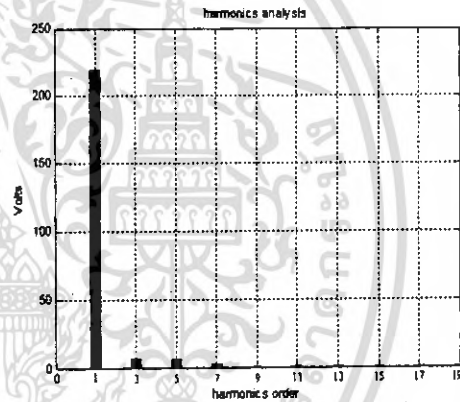
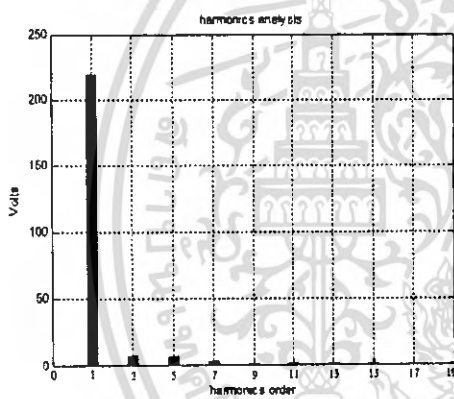
ทดลอง



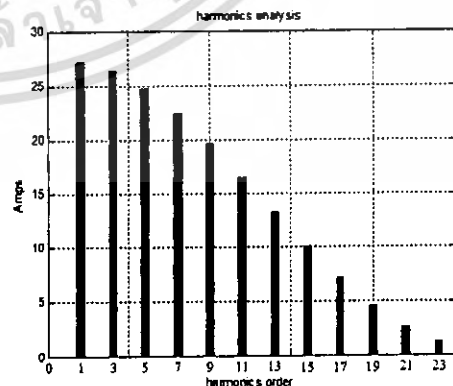
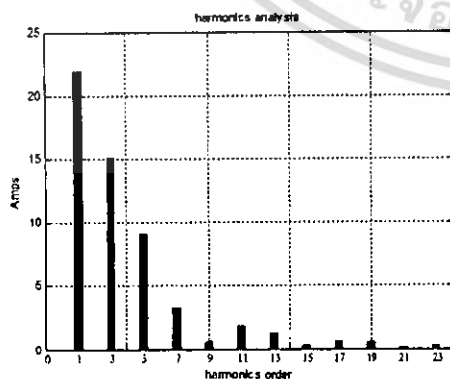
simulation



รูปที่ 4.72 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.73 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

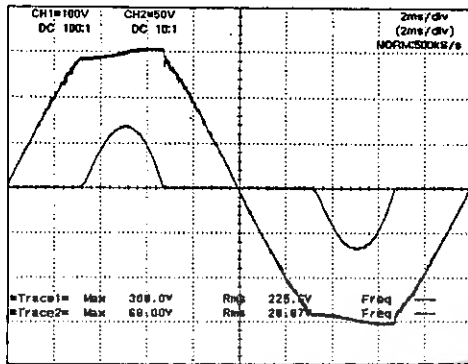


รูปที่ 4.74 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

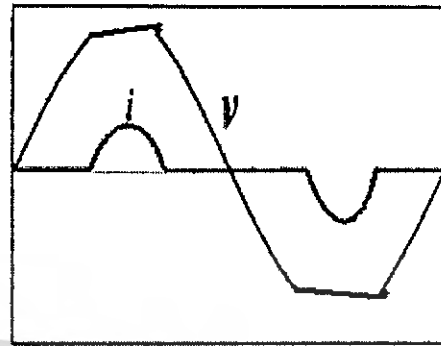
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อต้มไฟฟ้า 20 องศา

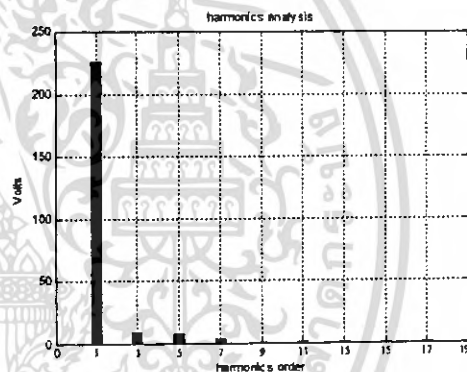
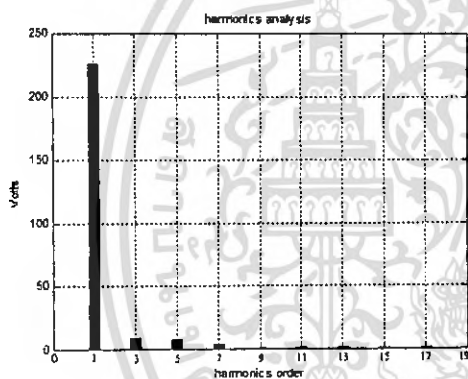
ทดลอง



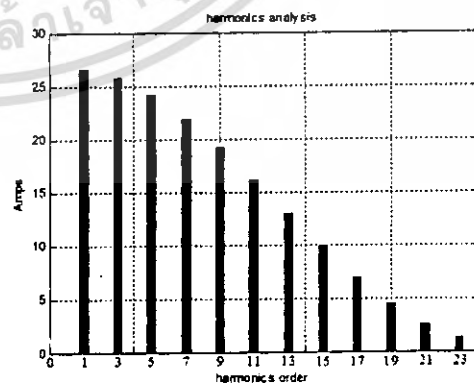
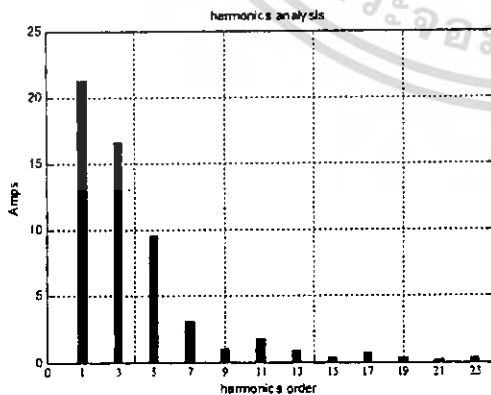
simulation



รูปที่ 4.75 คลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.76 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

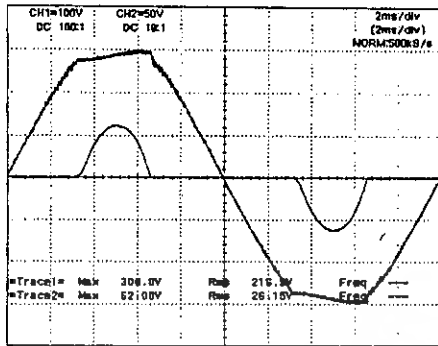


รูปที่ 4.77 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

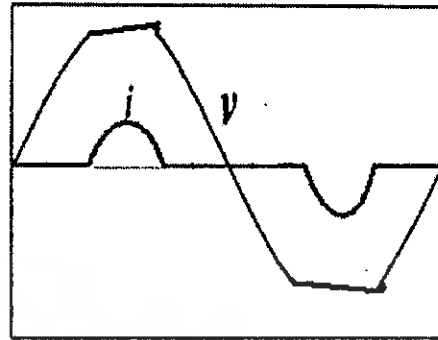
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมคลื่นเฟส 10 องศา

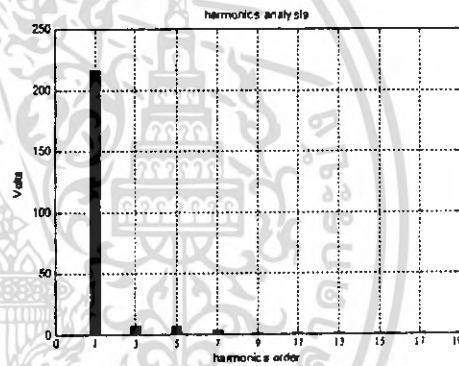
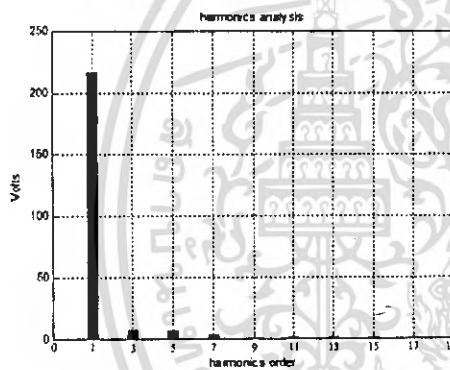
ทดลอง



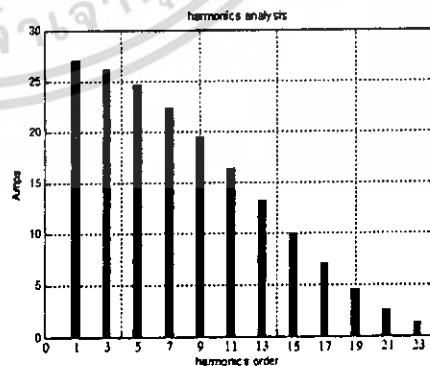
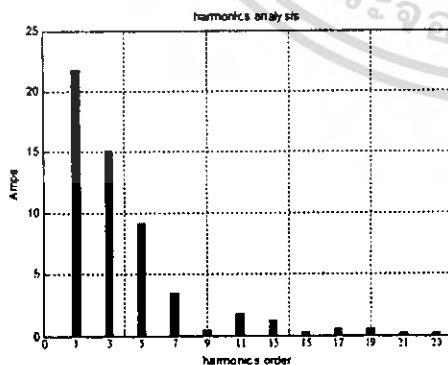
simulation



รูปที่ 4.78 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation



รูปที่ 4.79 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

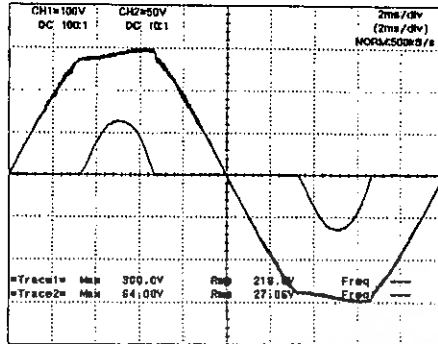


รูปที่ 4.80 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

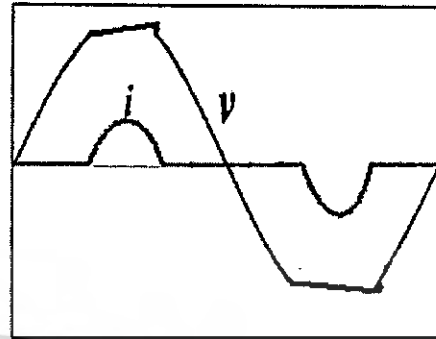
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา

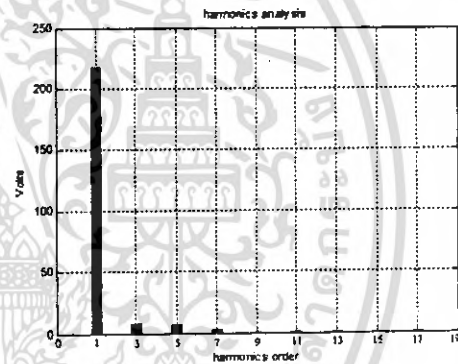
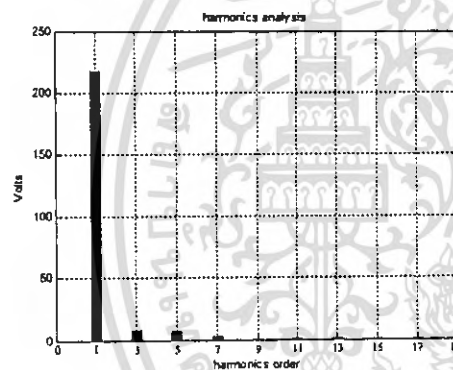
ทดลอง



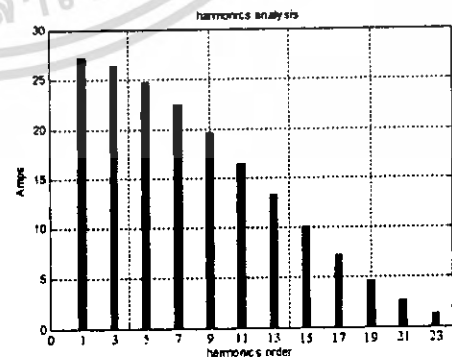
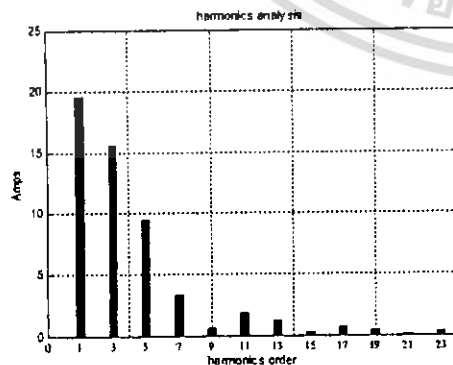
simulation



รูปที่ 4.81 คลื่นแรงดันและกระแสต้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

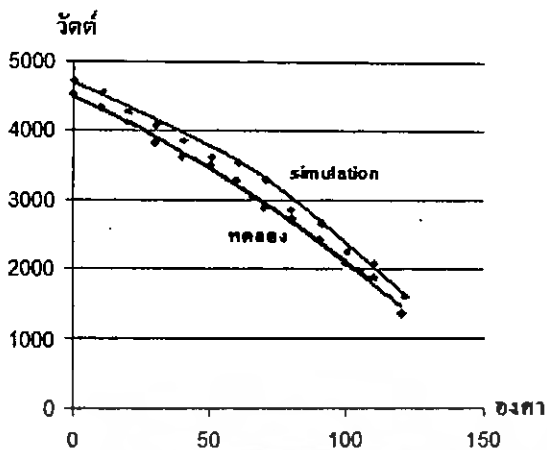


รูปที่ 4.82 ลักษณะของสเปกตรัมของแรงดันทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

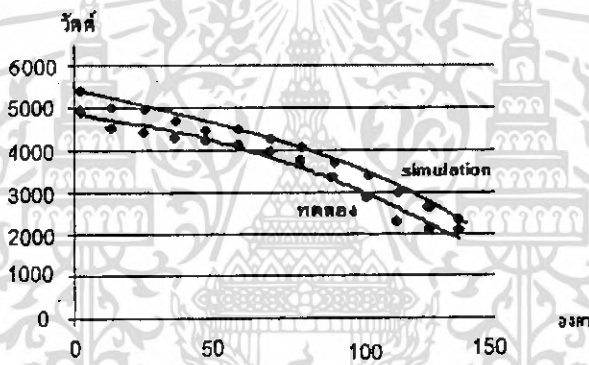


รูปที่ 4.83 ลักษณะของสเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุทของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

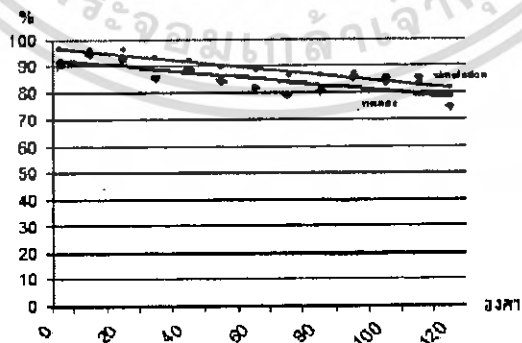
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.84 กราฟค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลลดเหนียวหน้าที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับการ simulation โดยการปรับมุมเลื่อนเฟส



รูปที่ 4.85 กราฟค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุทเหนียวหน้าที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับการ simulation โดยการปรับมุมเลื่อนเฟส



รูปที่ 4.86 ประสิทธิภาพ ของ Induction Heating ที่ได้จากการทดลองและการ simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการคำนวณและทดลองเกี่ยวกับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับเลือนเฟสแบบไม่สมมาตรสามารถสรุปประเด็นสำคัญต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีชุดขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมแท่งเหล็กสามารถรับแรงดันที่มีการป้อนตรงจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 220 V ผ่านวงจรรีโวลเวอร์เตอร์ได้โดยตรง โดยมีกระแสค่าจำกัดตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้ประมาณ 100 A ได้

2. จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้านอินพุท ได้เริ่มต้นคำนวณลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า จากนั้นได้นำไปคำนวณหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้า ด้านแหล่งจ่าย เช่น กำลังไฟฟ้าอินพุท(Pin) ด้านแหล่งจ่าย เป็นต้น พร้อมกับทำการทดลองเพื่อนำผลที่ได้ทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องทางทฤษฎีซึ่งปรากฏว่าได้ค่าใกล้เคียงกัน

3. ในทำนองเดียวกับข้อ 2 ทางด้านเอาต์พุทของวงจรรีโวลเวอร์เตอร์ก็ได้ทำการคำนวณหาลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุทอินเวอร์เตอร์ โดยใช้หลักการของเซวินินเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น จากนั้นได้นำคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้ไปคำนวณหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าด้านเอาต์พุทอินเวอร์เตอร์ เช่น กำลังไฟฟ้าเอาต์พุท(Pout) เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงเป็นต้น เมื่อนำค่าเหล่านี้ไปเทียบกับผลการทดลองปรากฏว่าได้ค่าใกล้เคียงกันด้วย

4. ในการออกแบบเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำ จะเริ่มต้นจากการกำหนดขนาดของแท่งเหล็กให้เหมาะสมกับการใช้งานและช่วงเวลาที่ต้องการให้ความร้อน จากนั้นจึงทำการคำนวณและทดสอบหาปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการชุบแข็งผิวโลหะดังกล่าวให้สามารถให้ความร้อนจนเหล็กแดงได้ภายในช่วงเวลาตามที่กำหนด จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการกำหนด จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ ระยะ Gap ระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำและแท่งเหล็ก และความถี่สวิตซ์ที่ใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] John E. Neely "Practical Metallurgy and Materials of Industry" third Edition, pp. 146
- [2] L.Grajales, J. A. Sabate, K R. Wang, W. A. Tabisz, and F. C. Lee, " Design of a 10 kW, Phase-Shift Controlled Series - Resonant Inverter for Induction Heating " Proc. of Industry Applications Society, Toronto, Canada 1993, pp. 843-849.
- [3]. H. Fujita , H. Akagi , K. Sano , K. Mita and R.H. Leonard, "Pulse Density Modulation Based Power Control of 4 kW 400 kHz Voltage – Source Inverter for Induction Heating Application" Power Conference YOKOHAMA 1993, Conf.Rec., 1993, pp. 111-116.
- [4]. P. Vriya, T. Thomas, "Power Transfer Characteristics of a Phase-Shift Controlled ZVS Inverter for the Application of Induction Heating" IPEC-Tokyo Conf.Rec., 2000.
- [5]. Henry W. Koertzen, Jacobus D. Van Wyk , Jan A. Ferreira "Investigation the Influence of Material Properties On The Efficiency of An Induction Heating Load Transformer using FEM Simulation" Industry Applications Conf., 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS'95., Conference Record of the 1995 IEEE, Volume:1, 1995 Page(s): 868 -873 vol.1
- [6.] D.L. Loverless "Solid State Power Supply for Modern Induction Metal Heat Treating" 17th ASM Heat Treating Society Conference Proceedings Including the 1st International Induction Heat Treating Symposium.
- [7.] โหม้ส ธรรมาธิษฐาน และ วิริยะ พิเชษฐจำเริญ. " การพิจารณาเงื่อนไขการเกิดZVSใน วงจรอินเวอร์เตอร์ควบคุมด้วยการเลื่อนเฟสสำหรับโหลดให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ " การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 22-23 พฤศจิกายน 2544.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

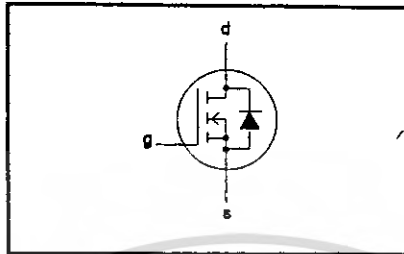
**PowerMOS transistors
Avalanche energy rated**

IRFP460

FEATURES

- Repetitive Avalanche Rated
- Fast switching
- Stable off-state characteristics
- High thermal cycling performance
- Low thermal resistance

SYMBOL



QUICK REFERENCE DATA

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

GENERAL DESCRIPTION

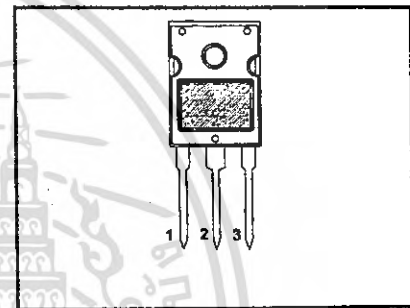
N-channel, enhancement mode field-effect power transistor, intended for use in off-line switched mode power supplies, T.V. and computer monitor power supplies, d.c. to d.c. converters, motor control circuits and general purpose switching applications.

The IRFP460 is supplied in the SOT429 (TO247) conventional leaded package.

PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	gate
2	drain
3	source
tab	drain

SOT429 (TO247)



LIMITING VALUES

Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{DSS}	Drain-source voltage	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$ to $150\text{ }^\circ\text{C}$	-	500	V
V_{DGR}	Drain-gate voltage	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$ to $150\text{ }^\circ\text{C}$; $R_{GS} = 20\text{ k}\Omega$	-	500	V
V_{GS}	Gate-source voltage		-	± 30	V
I_D	Continuous drain current	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $V_{GS} = 10\text{ V}$	-	20	A
		$T_{mb} = 100\text{ }^\circ\text{C}$; $V_{GS} = 10\text{ V}$	-	12.4	A
I_{DM}	Pulsed drain current	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	80	A
P_D	Total dissipation	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	250	W
T_J, T_{sto}	Operating junction and storage temperature range		-55	150	$^\circ\text{C}$

AVALANCHE ENERGY LIMITING VALUES

Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
E_{AS}	Non-repetitive avalanche energy	Unclamped inductive load, $I_{AS} = 20\text{ A}$; $t_b = 0.2\text{ ms}$; T_J prior to avalanche = $25\text{ }^\circ\text{C}$; $V_{DD} \leq 50\text{ V}$; $R_{GS} = 50\ \Omega$; $V_{GS} = 10\text{ V}$	-	1300	mJ
E_{AR}	Repetitive avalanche energy ¹	$I_{AR} = 20\text{ A}$; $t_b = 2.5\ \mu\text{s}$; T_J prior to avalanche = $25\text{ }^\circ\text{C}$; $R_{GS} = 50\ \Omega$; $V_{GS} = 10\text{ V}$	-	32	mJ
I_{AS}, I_{AR}	Repetitive and non-repetitive avalanche current		-	20	A

¹ pulse width and repetition rate limited by T_J max.

PowerMOS transistors
Avalanche energy rated

IRFP460

THERMAL RESISTANCES

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$R_{th(j-mb)}$	Thermal resistance junction to mounting base		-	-	0.5	K/W
$R_{th(j-a)}$	Thermal resistance junction to ambient	SOT429 package, in free air	-	45	-	K/W

ELECTRICAL CHARACTERISTICS $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$V_{(BR)DSS}$	Drain-source breakdown voltage	$V_{GS} = 0\text{ V}; I_D = 0.25\text{ mA}$	500	-	-	V
$\Delta V_{(BR)DSS} / \Delta T_j$	Drain-source breakdown voltage temperature coefficient	$V_{DS} = V_{GS}; I_D = 0.25\text{ mA}$	-	0.1	-	%/K
$R_{DS(ON)}$	Drain-source on resistance	$V_{GS} = 10\text{ V}; I_D = 10\text{ A}$	-	0.2	0.27	Ω
$V_{GS(TH)}$	Gate threshold voltage	$V_{DS} = V_{GS}; I_D = 0.25\text{ mA}$	2.0	3.0	4.0	V
g_{fs}	Forward transconductance	$V_{DS} = 30\text{ V}; I_D = 10\text{ A}$	13	18	-	S
I_{DSS}	Drain-source leakage current	$V_{DS} = 500\text{ V}; V_{GS} = 0\text{ V}$	-	2	50	μA
I_{GSS}	Gate-source leakage current	$V_{DS} = 400\text{ V}; V_{GS} = 0\text{ V}; T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$ $V_{GS} = \pm 30\text{ V}; V_{DS} = 0\text{ V}$	-	100	1000	μA
$Q_{g(tot)}$	Total gate charge	$I_D = 20\text{ A}; V_{DD} = 400\text{ V}; V_{GS} = 10\text{ V}$	-	147	190	nC
Q_{gs}	Gate-source charge		-	12	18	nC
Q_{gd}	Gate-drain (Miller) charge		-	78	100	nC
$t_{d(on)}$	Turn-on delay time	$V_{DD} = 250\text{ V}; R_D = 12\text{ }\Omega;$	-	23	-	ns
t_r	Turn-on rise time	$R_G = 3.9\text{ }\Omega$	-	72	-	ns
$t_{d(off)}$	Turn-off delay time		-	150	-	ns
t_f	Turn-off fall time		-	75	-	ns
L_d	Internal drain inductance	Measured from tab to centre of die	-	3.5	-	nH
L_d	Internal drain inductance	Measured from drain lead to centre of die	-	4.5	-	nH
L_s	Internal source inductance	Measured from source lead to source bond pad	-	7.5	-	nH
C_{iss}	Input capacitance	$V_{GS} = 0\text{ V}; V_{DS} = 25\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$	-	3000	-	pF
C_{oss}	Output capacitance		-	480	-	pF
C_{rss}	Feedback capacitance		-	270	-	pF

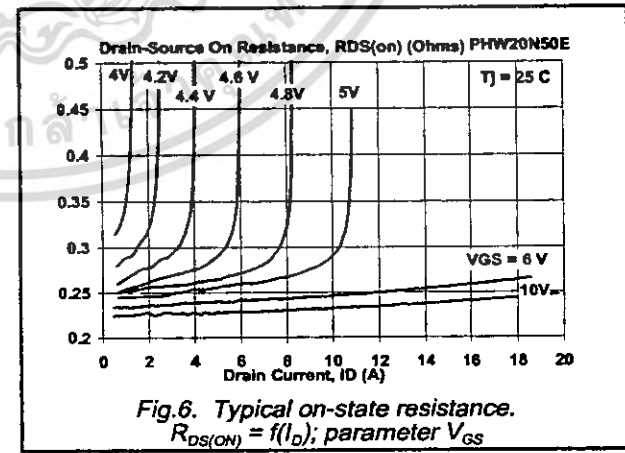
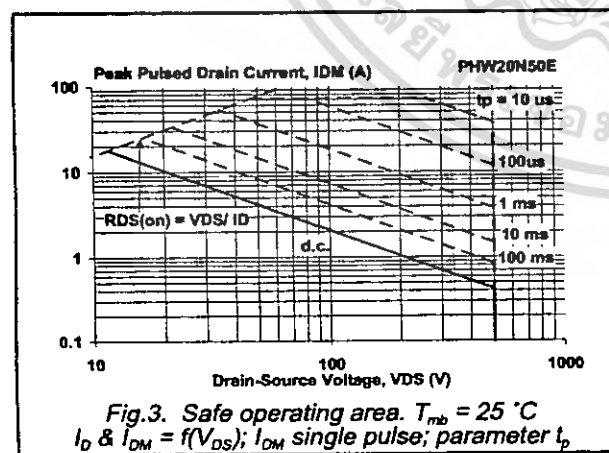
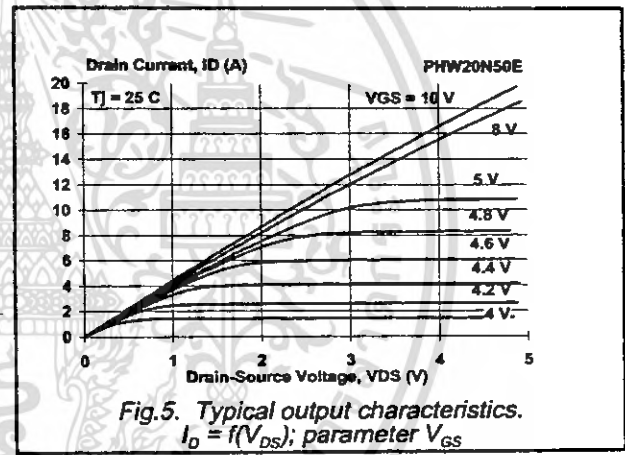
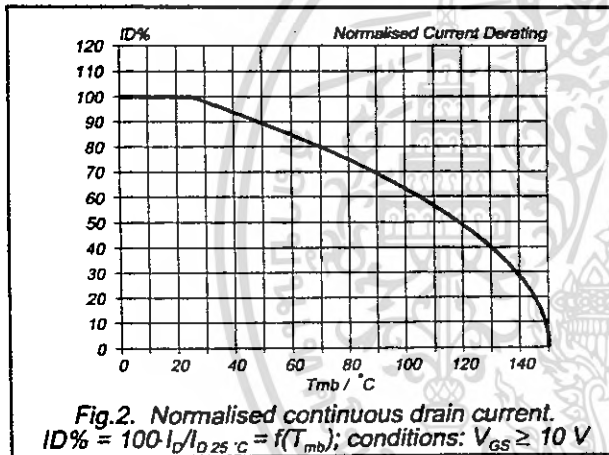
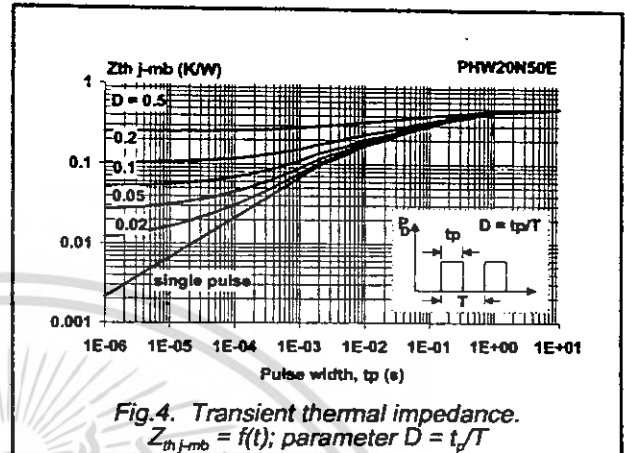
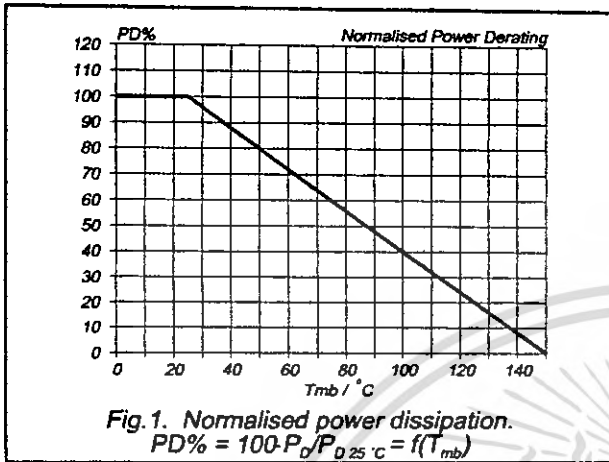
SOURCE-DRAIN DIODE RATINGS AND CHARACTERISTICS $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
I_S	Continuous source current (body diode)	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	20	A
i_{SM}	Pulsed source current (body diode)	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	80	A
V_{SD}	Diode forward voltage	$I_S = 20\text{ A}; V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	1.5	V
t_{rr}	Reverse recovery time	$I_S = 20\text{ A}; V_{GS} = 0\text{ V}; di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$	-	900	-	ns
Q_{rr}	Reverse recovery charge		-	15	-	μC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

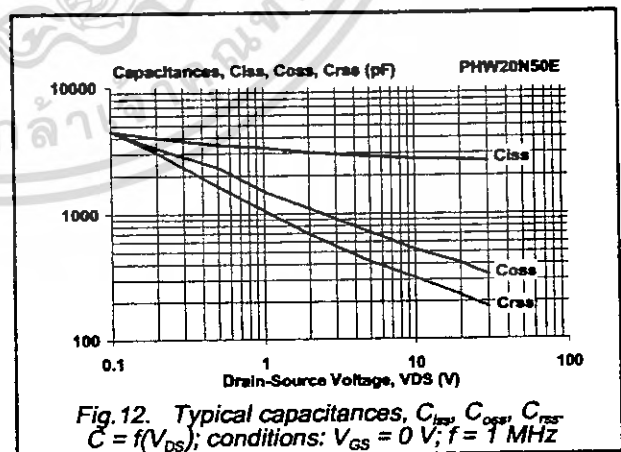
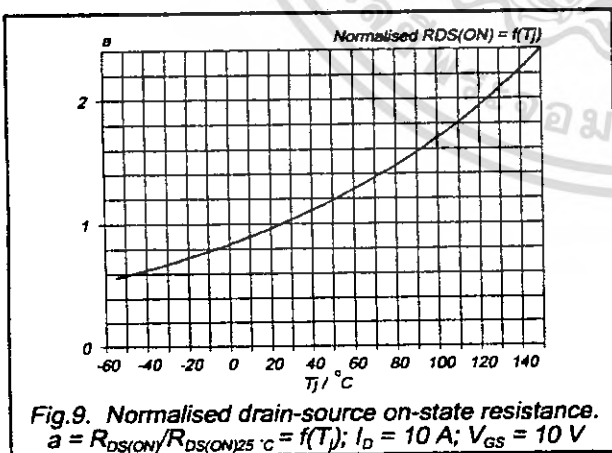
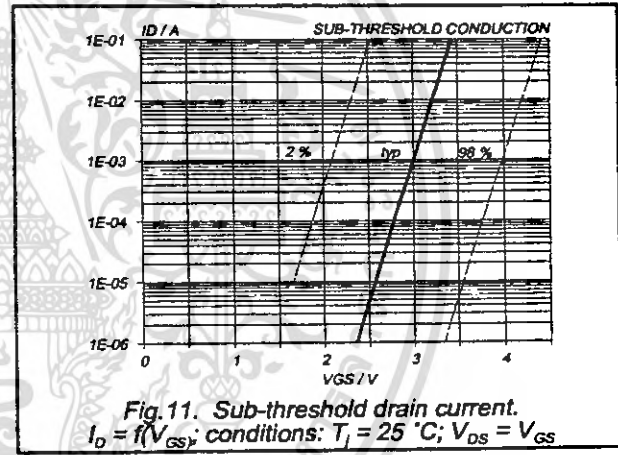
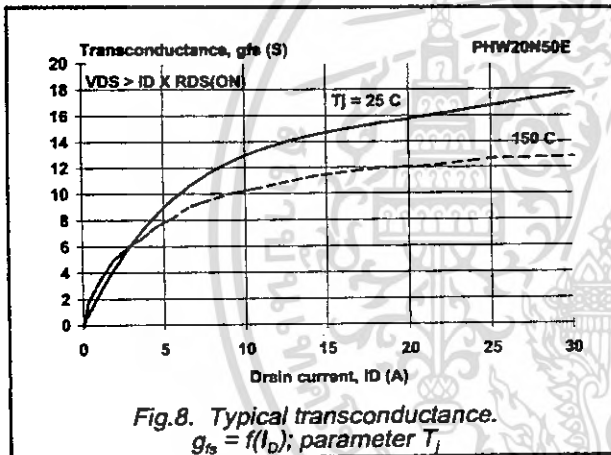
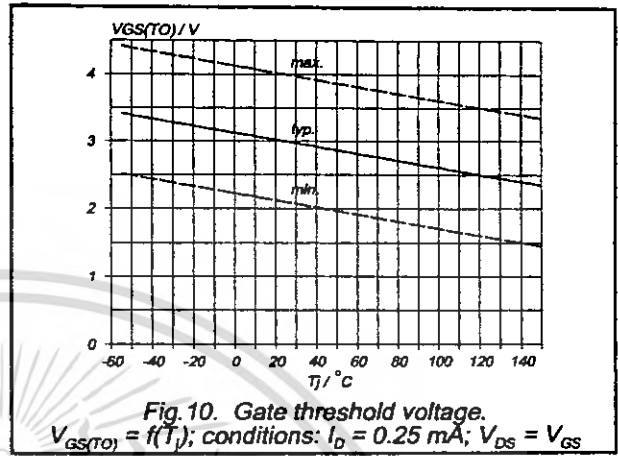
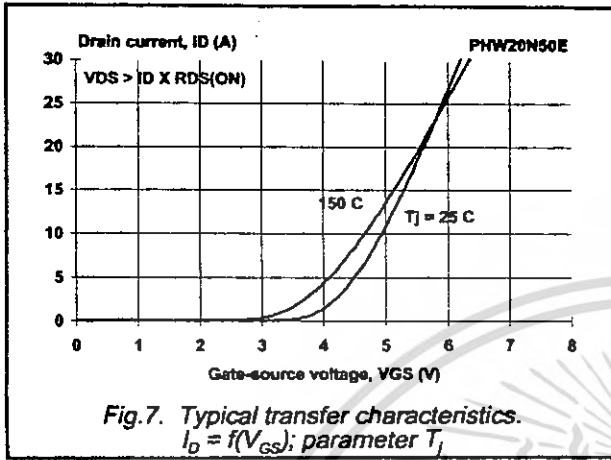
PowerMOS transistors
Avalanche energy rated

IRFP460



PowerMOS transistors
Avalanche energy rated

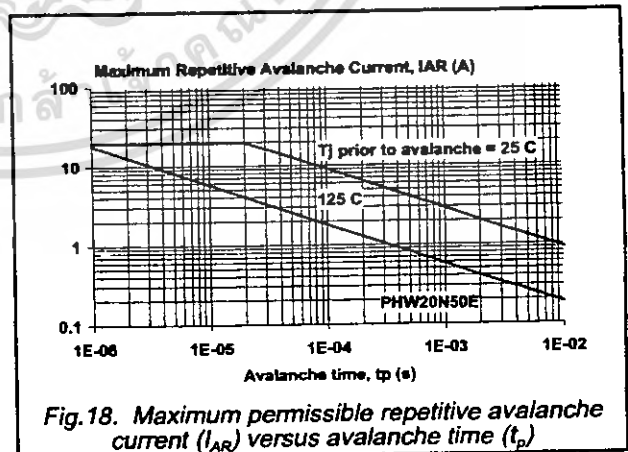
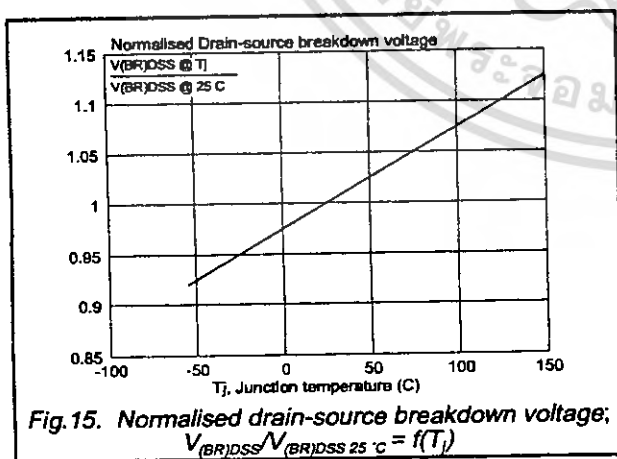
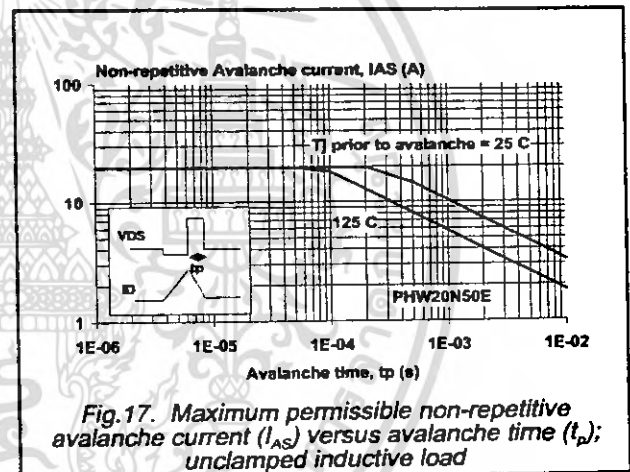
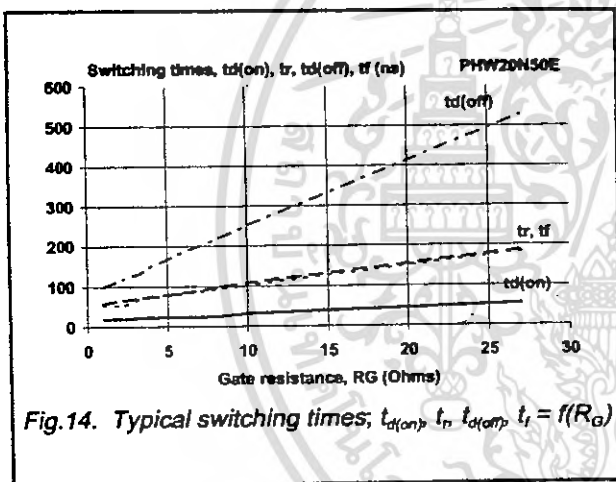
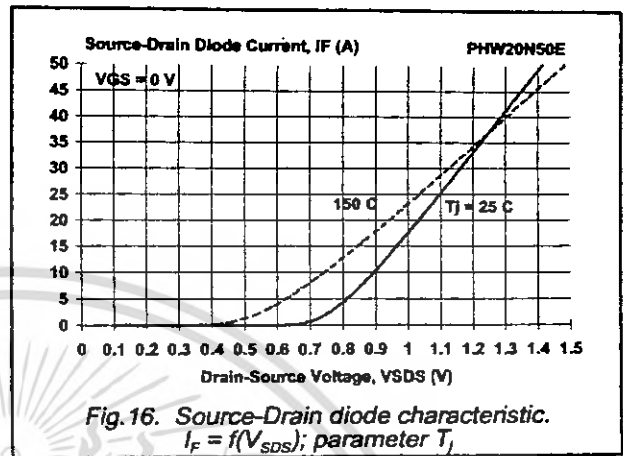
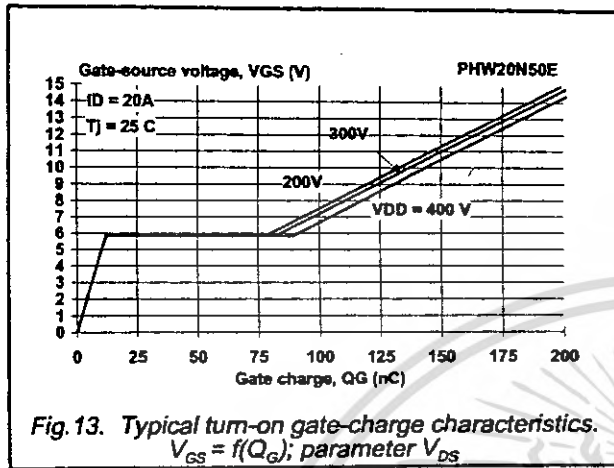
IRFP460



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PowerMOS transistors
Avalanche energy rated

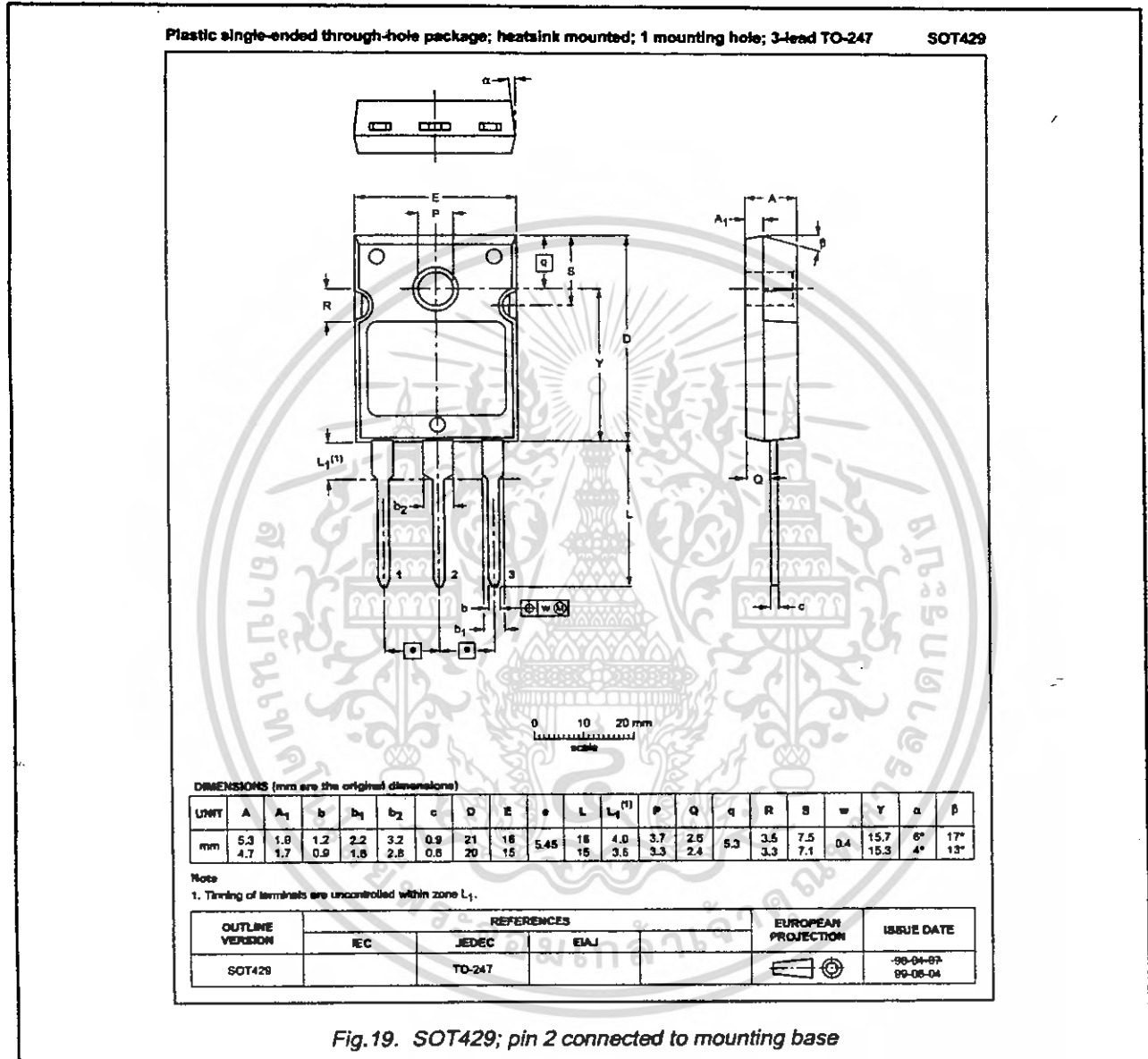
IRFP460



PowerMOS transistors
Avalanche energy rated

IRFP460

MECHANICAL DATA



Notes

1. Observe the general handling precautions for electrostatic-discharge sensitive devices (ESDs) to prevent damage to MOS gate oxide.
2. Refer to mounting instructions for SOT429 envelope.
3. Epoxy meets UL94 V0 at 1/8".

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PowerMOS transistors
Avalanche energy rated**

IRFP460

DEFINITIONS

Data sheet status	
Objective specification	This data sheet contains target or goal specifications for product development.
Preliminary specification	This data sheet contains preliminary data; supplementary data may be published later.
Product specification	This data sheet contains final product specifications.
Limiting values	
Limiting values are given in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134). Stress above one or more of the limiting values may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at these or at any other conditions above those given in the Characteristics sections of this specification is not implied. Exposure to limiting values for extended periods may affect device reliability.	
Application information	
Where application information is given, it is advisory and does not form part of the specification.	
© Philips Electronics N.V. 1999	
All rights are reserved. Reproduction in whole or in part is prohibited without the prior written consent of the copyright owner.	
The information presented in this document does not form part of any quotation or contract, it is believed to be accurate and reliable and may be changed without notice. No liability will be accepted by the publisher for any consequence of its use. Publication thereof does not convey nor imply any license under patent or other industrial or intellectual property rights.	

LIFE SUPPORT APPLICATIONS

These products are not designed for use in life support appliances, devices or systems where malfunction of these products can be reasonably expected to result in personal injury. Philips customers using or selling these products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Philips for any damages resulting from such improper use or sale.

5.6A, 100V, 0.540 Ohm, N-Channel Power MOSFET

This N-Channel enhancement mode silicon gate power field effect transistor is an advanced power MOSFET designed, tested, and guaranteed to withstand a specified level of energy in the breakdown avalanche mode of operation. All of these power MOSFETs are designed for applications such as switching regulators, switching convertors, motor drivers, relay drivers, and drivers for high power bipolar switching transistors requiring high speed and low gate drive power. These types can be operated directly from integrated circuits.

Formerly developmental type TA17441.

Ordering Information

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
IRF510	TO-220AB	IRF510

NOTE: When ordering, include the entire part number.

Features

- 5.6A, 100V
- $r_{DS(ON)} = 0.540\Omega$
- Single Pulse Avalanche Energy Rated
- SOA is Power Dissipation Limited
- Nanosecond Switching Speeds
- Linear Transfer Characteristics
- High Input Impedance
- Related Literature
 - TB334 "Guidelines for Soldering Surface Mount Components to PC Boards"

Symbol



Packaging



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRF510

Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

	IRF510	UNITS
Drain to Source Voltage (Note 1)	V_{DS}	100 V
Drain to Gate Voltage ($R_{GS} = 20k\Omega$) (Note 1)	V_{DGR}	100 V
Continuous Drain Current	I_D	5.6 A
$T_C = 100^\circ\text{C}$	I_D	4 A
Pulsed Drain Current (Note 3)	I_{DM}	20 A
Gate to Source Voltage	V_{GS}	± 20 V
Maximum Power Dissipation	P_D	43 W
Linear Derating Factor		0.29 $\text{W}/^\circ\text{C}$
Single Pulse Avalanche Energy Rating (Note 4)	E_{AS}	19 mJ
Operating and Storage Temperature Range	T_J, T_{STG}	-55 to 175 $^\circ\text{C}$
Maximum Temperature for Soldering		
Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s	T_L	300 $^\circ\text{C}$
Package Body for 10s, See Techbrief 334	T_{pkg}	260 $^\circ\text{C}$

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTE:

- $T_J = 25^\circ\text{C}$ to 150°C .

Electrical Specifications $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
Drain to Source Breakdown Voltage	BV_{DSS}	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$ (Figure 10)	100	-	-	V	
Gate to Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{DS}, I_D = 250\mu A$	2.0	-	4.0	V	
Zero-Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = 95V, V_{GS} = 0V$	-	-	25	μA	
		$V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } BV_{DSS}, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$	-	-	250	μA	
On-State Drain Current (Note 2)	$I_{D(ON)}$	$V_{DS} > I_{D(ON)} \times r_{DS(ON)MAX}, V_{GS} = 10V$ (Figure 7)	5.6	-	-	A	
Gate to Source Leakage Current	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20V$	-	-	± 100	nA	
Drain to Source On Resistance (Note 2)	$r_{DS(ON)}$	$V_{GS} = 10V, I_D = 3.4A$ (Figures 8, 9)	-	0.4	0.54	Ω	
Forward Transconductance (Note 2)	g_{fs}	$V_{GS} = 50V, I_D = 3.4A$ (Figure 12)	1.3	2.0	-	S	
Turn-On Delay Time	$t_d(ON)$	$I_D = 5.8A, R_{GS} = 24\Omega, V_{DD} = 50V, R_L = 9\Omega, V_{DD} = 50V, V_{GS} = 10V$	-	8	12	ns	
Rise Time	t_r	MOSFET switching times are essentially independent of operating temperature	-	25	63	ns	
Turn-Off Delay Time	$t_d(OFF)$		-	15	7	ns	
Fall Time	t_f		-	12	59	ns	
Total Gate Charge (Gate to Source + Gate to Drain)	$Q_g(TOT)$	$V_{GS} = 10V, I_D = 5.6A, V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } BV_{DSS}, I_{G(REF)} = 1.5mA$ (Figure 14)	-	5.0	30	nC	
Gate to Source Charge	Q_{gs}	Gate charge is essentially independent of operating temperature.	-	2.0	-	nC	
Gate to Drain "Miller" Charge	Q_{gd}		-	3.0	-	nC	
Input Capacitance	C_{ISS}	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 25V, f = 1.0MHz$ (Figure 11)	-	135	-	pF	
Output Capacitance	C_{OSS}		-	80	-	pF	
Reverse-Transfer Capacitance	C_{RSS}		-	20	-	pF	
Internal Drain Inductance	L_D	Measured From the Contact Screw On Tab To Center of Die	Modified MOSFET Symbol Showing the Internal Devices Inductances 	-	3.5	-	nH
		Measured From the Drain Lead, 6mm (0.25in) From Package to Center of Die		-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L_S	Measured From The Source Lead, 6mm (0.25in) From Header to Source Bonding Pad		-	7.5	-	nH
Junction to Case	$R_{\theta JC}$		-	-	3.5	$^\circ\text{C}/\text{W}$	
Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	Free air operation	-	-	80	$^\circ\text{C}/\text{W}$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Source to Drain Diode Specifications

PARAMETER	SYMBOL	Test Conditions	MIN	TYP	MAX	UNITS
Continuous Source to Drain Current	I_{SD}	Modified MOSFET Symbol Showing the Integral Reverse P-N Junction Diode	-	-	5.6	A
Pulse Source to Drain Current (Note 3)	I_{SDM}		-	-	20	A
Source to Drain Diode Voltage (Note 2)	V_{SD}	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{SD} = 5.6\text{A}$, $V_{GS} = 0\text{V}$ (Figure 13)	-	-	2.5	V
Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{SD} = 5.6\text{A}$, $dI_{SD}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	4.6	96	200	ns
Reverse Recovered Charge	Q_{RR}	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{SD} = 5.6\text{A}$, $dI_{SD}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	0.17	0.4	0.83	μC

NOTES:

2. Pulse test: pulse width $\leq 300\mu\text{s}$, duty cycle $\leq 2\%$.
3. Repetitive rating: pulse width limited by max junction temperature. See Transient Thermal Impedance curve (Figure 3).
4. $V_{DD} = 25\text{V}$, start $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 910\mu\text{H}$, $R_G = 25\Omega$, peak $I_{AS} = 5.6\text{A}$.

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified

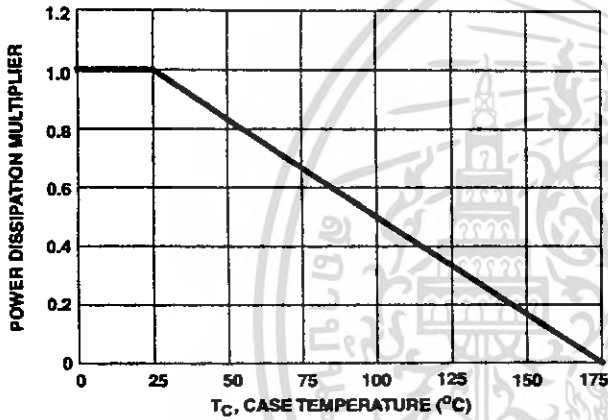


FIGURE 1. NORMALIZED POWER DISSIPATION vs CASE TEMPERATURE

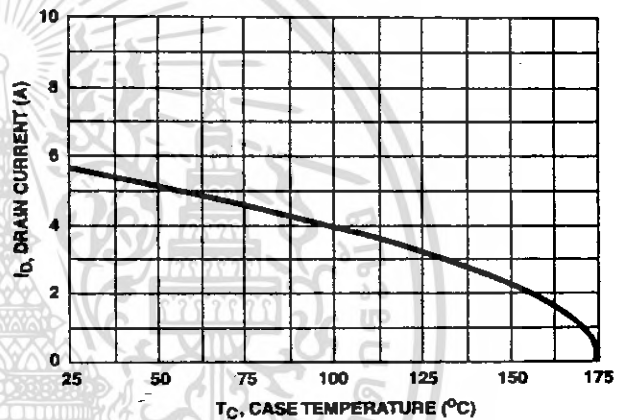


FIGURE 2. MAXIMUM CONTINUOUS DRAIN CURRENT vs CASE TEMPERATURE

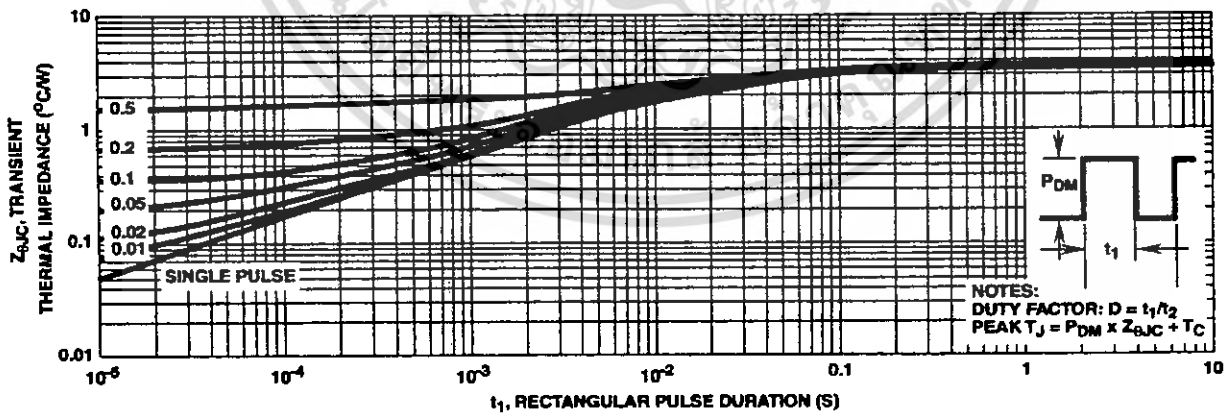


FIGURE 3. MAXIMUM TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified (Continued)

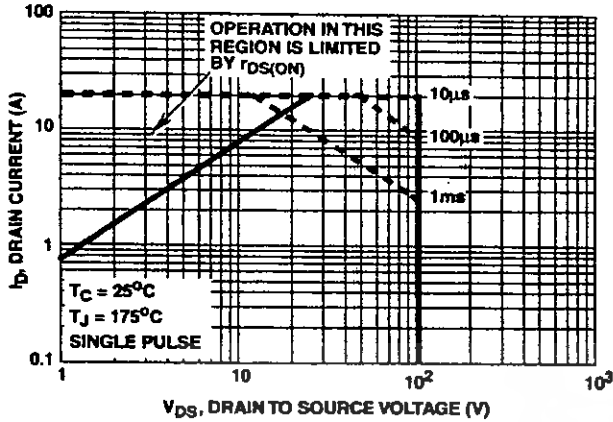


FIGURE 4. FORWARD BIAS SAFE OPERATING AREA

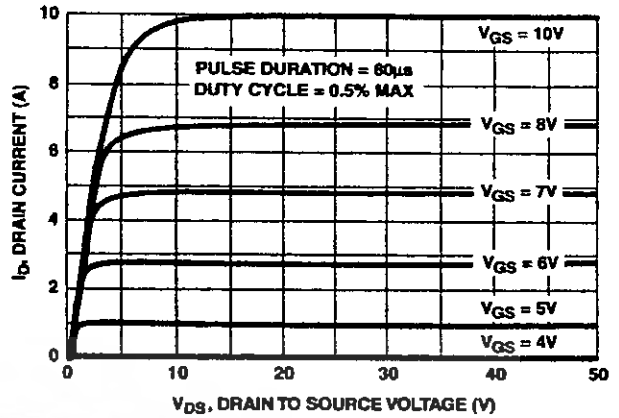


FIGURE 5. OUTPUT CHARACTERISTICS

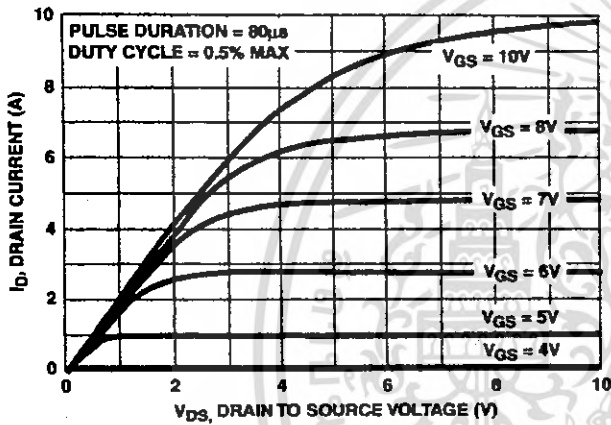


FIGURE 6. SATURATION CHARACTERISTICS

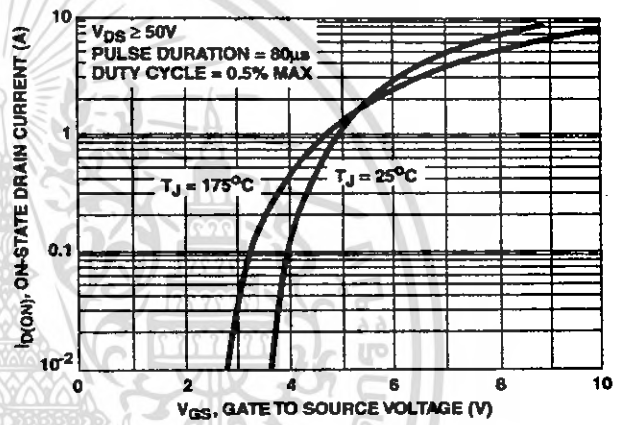


FIGURE 7. TRANSFER CHARACTERISTICS

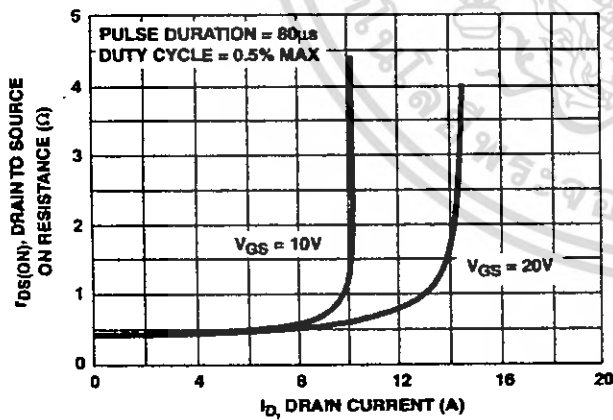


FIGURE 8. DRAIN TO SOURCE ON RESISTANCE vs GATE VOLTAGE AND DRAIN CURRENT

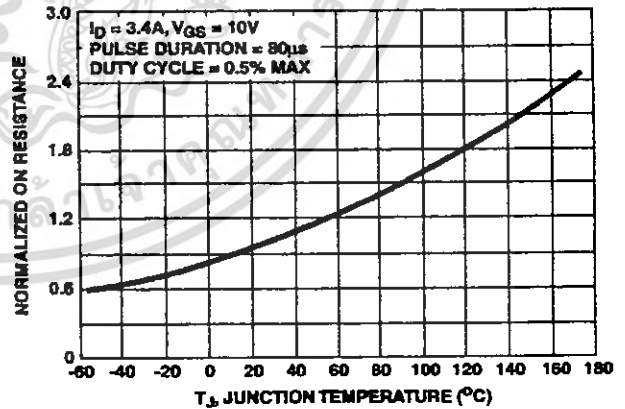


FIGURE 9. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE ON RESISTANCE vs JUNCTION TEMPERATURE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified (Continued)

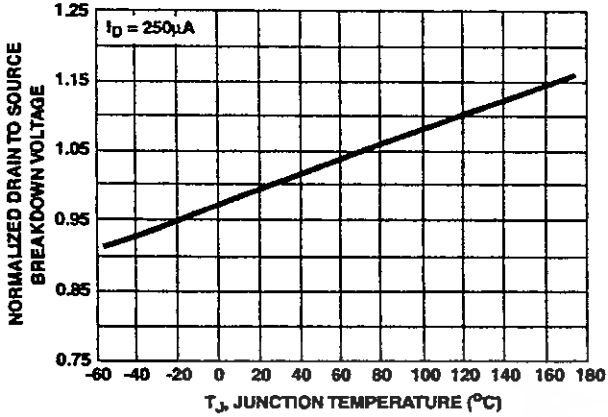


FIGURE 10. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE BREAKDOWN VOLTAGE vs JUNCTION TEMPERATURE

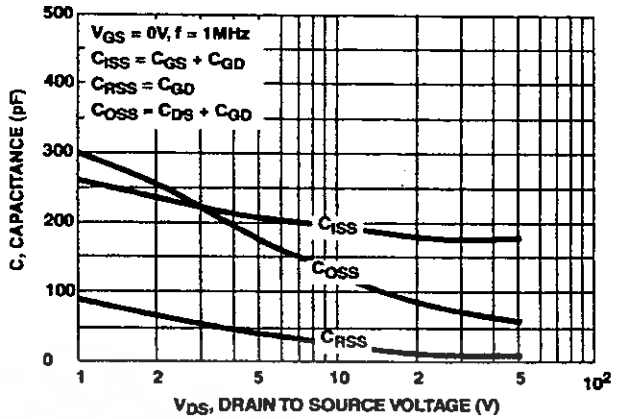


FIGURE 11. CAPACITANCE vs DRAIN TO SOURCE VOLTAGE

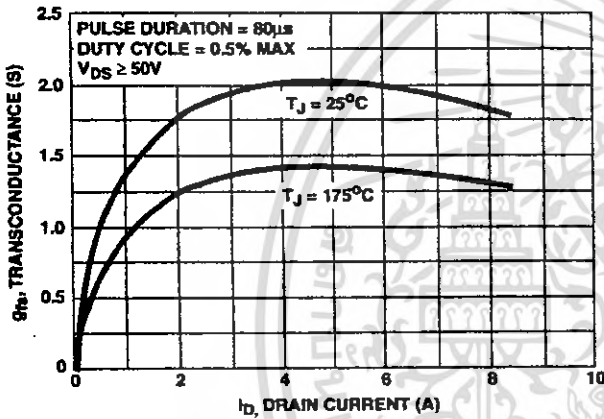


FIGURE 12. TRANSCONDUCTANCE vs DRAIN CURRENT

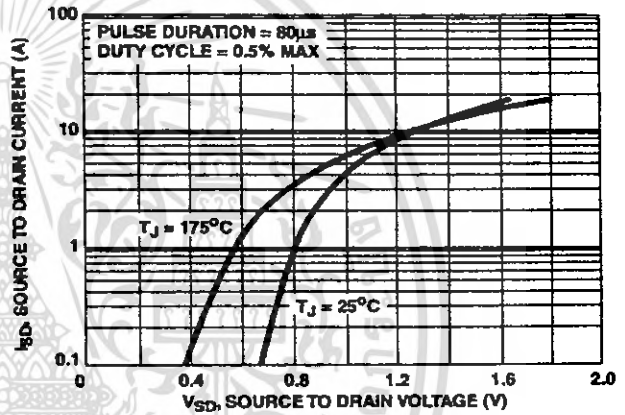


FIGURE 13. SOURCE TO DRAIN DIODE VOLTAGE

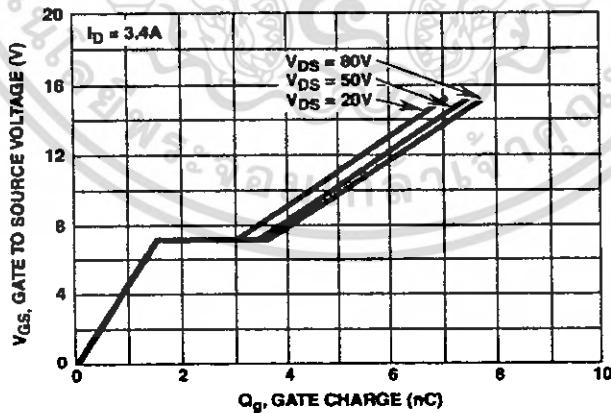


FIGURE 14. GATE TO SOURCE VOLTAGE vs GATE CHARGE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuits and Waveforms

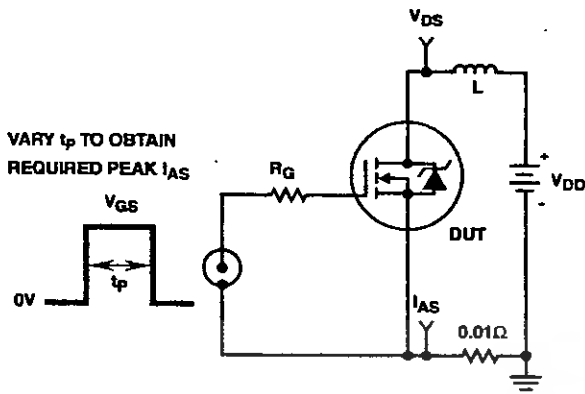


FIGURE 15. UNCLAMPED ENERGY TEST CIRCUIT

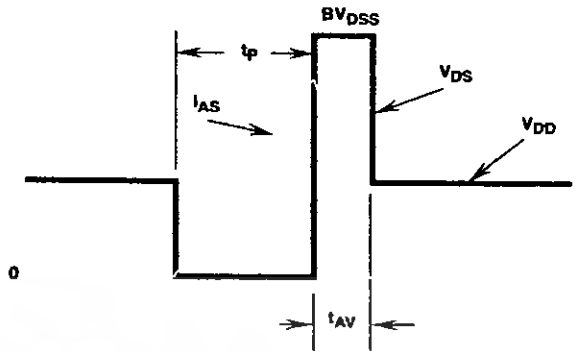


FIGURE 16. UNCLAMPED ENERGY WAVEFORMS

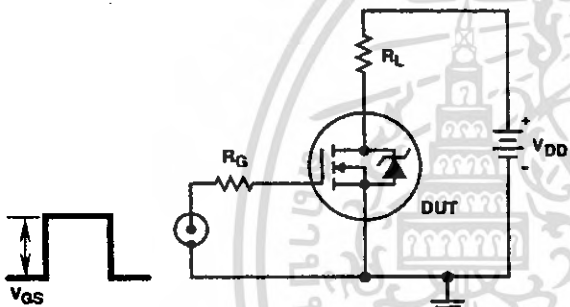


FIGURE 17. SWITCHING TIME TEST CIRCUIT

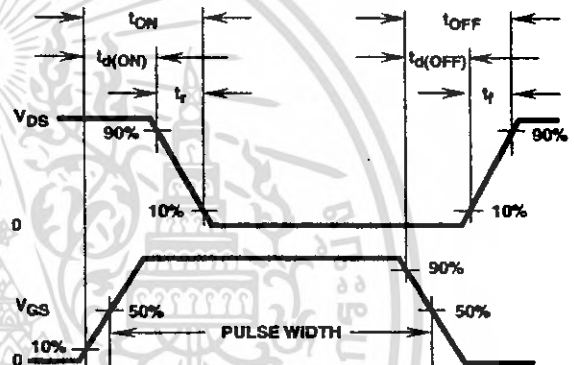


FIGURE 18. RESISTIVE SWITCHING WAVEFORMS

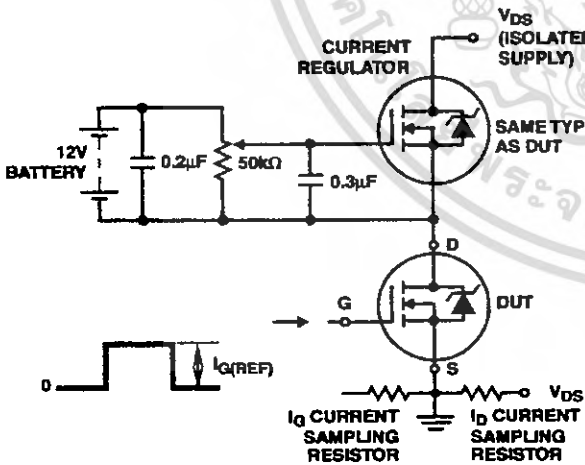


FIGURE 19. GATE CHARGE TEST CIRCUIT

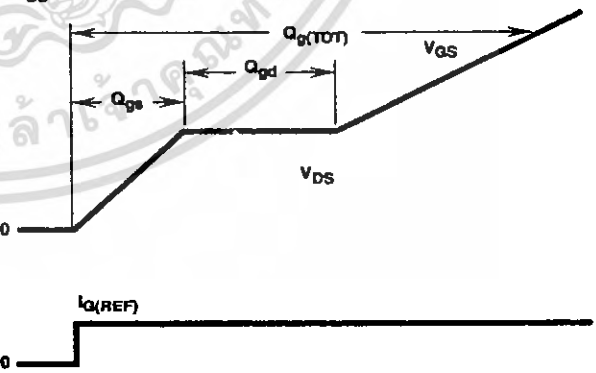


FIGURE 20. GATE CHARGE WAVEFORM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRADEMARKS

The following are registered and unregistered trademarks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

ACEx™	FAST®	OPTOLOGIC™	SMART START™	VCX™
Bottomless™	FASTr™	OPTOPLANAR™	STAR*POWER™	
CoolFET™	FRFET™	PACMAN™	Stealth™	
CROSSVOLT™	GlobalOptoisolator™	POP™	SuperSOT™-3	
DenseTrench™	GTO™	Power247™	SuperSOT™-6	
DOME™	HiSeC™	PowerTrench®	SuperSOT™-8	
EcoSPARK™	ISOPLANAR™	QFET™	SyncFET™	
E ² C MOS™	LittleFET™	QS™	TinyLogic™	
EnSigna™	MicroFET™	QT Optoelectronics™	TruTranslation™	
FACT™	MicroPak™	Quiet Series™	UHC™	
FACT Quiet Series™	MICROWIRE™	SILENT SWITCHER®	UltraFET®	

STAR*POWER is used under license

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

PRODUCT STATUS DEFINITIONS

Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative or In Design	This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	This datasheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
No Identification Needed	Full Production	This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
Obsolete	Not In Production	This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild semiconductor. The datasheet is printed for reference information only.

Rev. H4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This datasheet has been download from:

WWW.DATASHEETSPDF.COM

Datasheets for electronics components.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SWITCHMODE™ Pulse Width Modulation Control Circuit

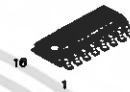
The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for SWITCHMODE power supply control.

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

TL494

SWITCHMODE PULSE WIDTH MODULATION CONTROL CIRCUIT

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA



D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751B
(SO-16)



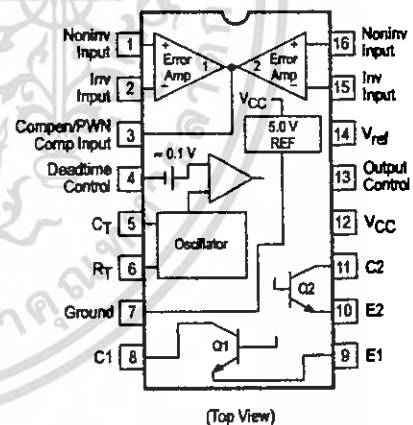
N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648

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

Rating	Symbol	TL494C	TL494I	Unit
Power Supply Voltage	V _{CC}	42		V
Collector Output Voltage	V _{C1} , V _{C2}	42		V
Collector Output Current (Each transistor) (Note 1)	I _{C1} , I _{C2}	500		mA
Amplifier Input Voltage Range	V _{IR}	-0.3 to +42		V
Power Dissipation @ T _A ≤ 45°C	P _D	1000		mW
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	R _{θJA}	80		°C/W
Operating Junction Temperature	T _J	125		°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-55 to +125		°C
Operating Ambient Temperature Range TL494C TL494I	T _A	0 to +70 -25 to +85		°C
Derating Ambient Temperature	T _A	45		°C

NOTE: 1. Maximum thermal limits must be observed.

PIN CONNECTIONS



ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
TL494CD	T _A = 0° to +70°C	SO-16
TL494CN		Plastic
TL494IN	T _A = -25° to +85°C	Plastic

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Voltage	V _{CC}	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	V _{C1} , V _{C2}	–	30	40	V
Collector Output Current (Each transistor)	I _{C1} , I _{C2}	–	–	200	mA
Amplified Input Voltage	V _{in}	–0.3	–	V _{CC} – 2.0	V
Current Into Feedback Terminal	I _{fb}	–	–	0.3	mA
Reference Output Current	I _{ref}	–	–	10	mA
Timing Resistor	R _T	1.8	30	500	kΩ
Timing Capacitor	C _T	0.0047	0.001	10	μF
Oscillator Frequency	f _{osc}	1.0	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ, unless otherwise noted.)

For typical values T_A = 25°C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
-----------------	--------	-----	-----	-----	------

REFERENCE SECTION

Reference Voltage (I _O = 1.0 mA)	V _{ref}	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation (V _{CC} = 7.0 V to 40 V)	Reg _{line}	–	2.0	25	mV
Load Regulation (I _O = 1.0 mA to 10 mA)	Reg _{load}	–	3.0	15	mV
Short Circuit Output Current (V _{ref} = 0 V)	I _{SC}	15	35	75	mA

OUTPUT SECTION

Collector Off-State Current (V _{CC} = 40 V, V _{CE} = 40 V)	I _{C(off)}	–	2.0	100	μA
Emitter Off-State Current (V _{CC} = 40 V, V _C = 40 V, V _E = 0 V)	I _{E(off)}	–	–	–100	μA
Collector–Emitter Saturation Voltage (Note 2) Common–Emitter (V _E = 0 V, I _C = 200 mA) Emitter–Follower (V _C = 15 V, I _E = –200 mA)	V _{sat(C)} V _{sat(E)}	– –	1.1 1.5	1.3 2.5	V
Output Control Pin Current Low State (V _{OC} ≤ 0.4 V) High State (V _{OC} = V _{ref})	I _{OCL} I _{OCH}	– –	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

NOTE: 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

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ, unless otherwise noted.)

For typical values T_A = 25°C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
ERROR AMPLIFIER SECTION					
Input Offset Voltage (V _O (Pin 3) = 2.5 V)	V _{IO}	–	2.0	10	mV
Input Offset Current (V _O (Pin 3) = 2.5 V)	I _{IO}	–	5.0	250	μA
Input Bias Current (V _O (Pin 3) = 2.5 V)	I _{IB}	–	–0.1	–1.0	μA
Input Common Mode Voltage Range (V _{CC} = 40 V, T _A = 25°C)	V _{ICR}	–0.3 to V _{CC} –2.0			V
Open Loop Voltage Gain (ΔV _O = 3.0 V, V _O = 0.5 V to 3.5 V, R _L = 2.0 kΩ)	A _{VOL}	70	95	–	dB
Unity–Gain Crossover Frequency (V _O = 0.5 V to 3.5 V, R _L = 2.0 kΩ)	f _{C–}	–	350	–	kHz
Phase Margin at Unity–Gain (V _O = 0.5 V to 3.5 V, R _L = 2.0 kΩ)	φ _m	–	65	–	deg.
Common Mode Rejection Ratio (V _{CC} = 40 V)	CMRR	65	90	–	dB
Power Supply Rejection Ratio (ΔV _{CC} = 33 V, V _O = 2.5 V, R _L = 2.0 kΩ)	PSRR	–	100	–	dB
Output Sink Current (V _O (Pin 3) = 0.7 V)	I _{O–}	0.3	0.7	–	mA
Output Source Current (V _O (Pin 3) = 3.5 V)	I _{O+}	2.0	–4.0	–	mA
PWM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 11)					
Input Threshold Voltage (Zero Duty Cycle)	V _{TH}	–	2.5	4.5	V
Input Sink Current (V _O (Pin 3) = 0.7 V)	I _L	0.3	0.7	–	mA
DEADTIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 11)					
Input Bias Current (Pin 4) (V _{Pin 4} = 0 V to 5.25 V)	I _{IB} (DT)	–	–2.0	–10	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push–Pull Mode (V _{Pin 4} = 0 V, C _T = 0.01 μF, R _T = 12 kΩ) (V _{Pin 4} = 0 V, C _T = 0.001 μF, R _T = 30 kΩ)	DC _{max}	45	48	50	%
		–	45	50	
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	V _{th}	–	2.8	3.3	V
		0	–	–	
OSCILLATOR SECTION					
Frequency (C _T = 0.001 μF, R _T = 30 kΩ)	f _{osc}	–	40	–	kHz
Standard Deviation of Frequency* (C _T = 0.001 μF, R _T = 30 kΩ)	σ _{fosc}	–	3.0	–	%
Frequency Change with Voltage (V _{CC} = 7.0 V to 40 V, T _A = 25°C)	Δf _{osc} (ΔV)	–	0.1	–	%
Frequency Change with Temperature (ΔT _A = T _{low} to T _{high}) (C _T = 0.01 μF, R _T = 12 kΩ)	Δf _{osc} (ΔT)	–	–	12	%
UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION					
Turn–On Threshold (V _{CC} increasing, I _{ref} = 1.0 mA)	V _{th}	5.5	6.43	7.0	V
TOTAL DEVICE					
Standby Supply Current (Pin 6 at V _{ref} , All other inputs and outputs open) (V _{CC} = 15 V) (V _{CC} = 40 V)	I _{CC}	–	5.5	10	mA
		–	7.0	15	
Average Supply Current (C _T = 0.01 μF, R _T = 12 kΩ, V _{Pin 4} = 2.0 V) (V _{CC} = 15 V) (See Figure 12)		–	7.0	–	mA

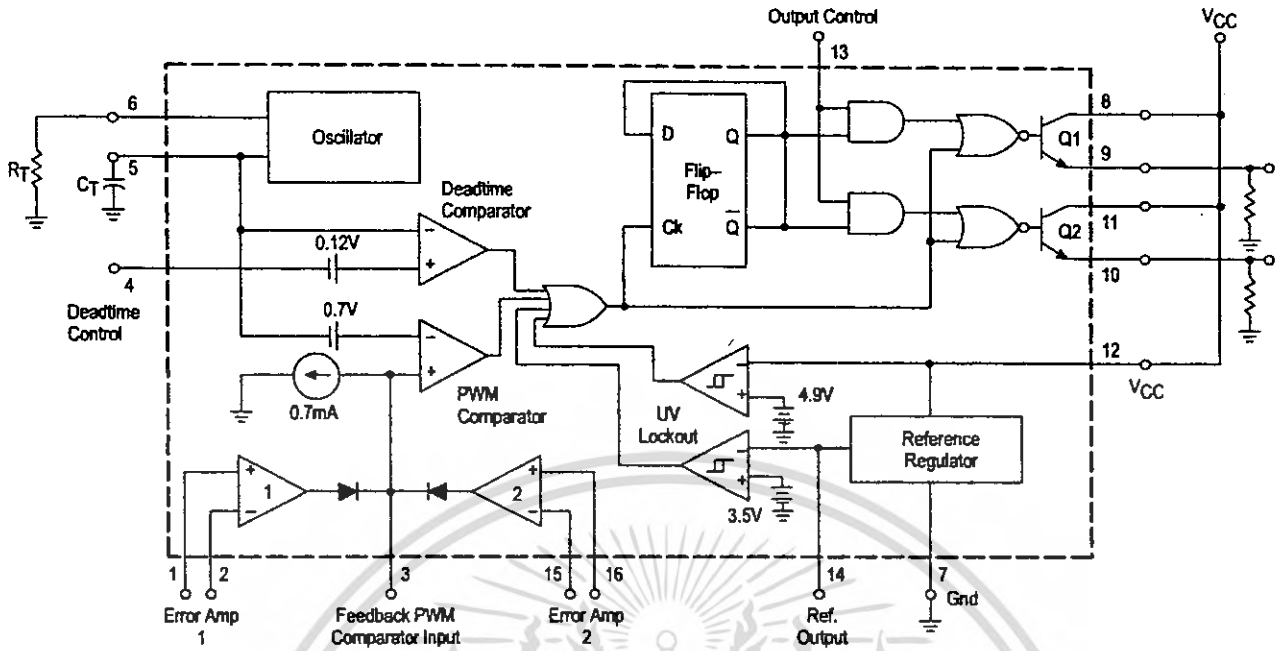
* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula, σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

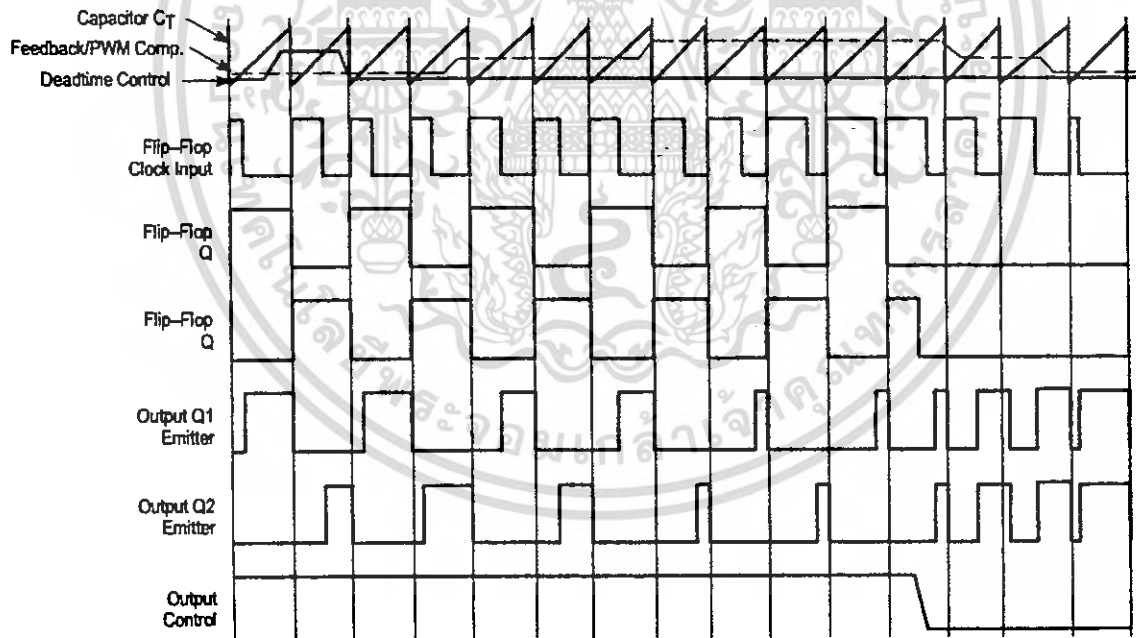
TL494

Figure 1. Representative Block Diagram



This device contains 46 active transistors.

Figure 2. Timing Diagram



APPLICATIONS INFORMATION

Description

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

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

For more information refer to Figure 3.

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

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

Functional Table

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

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the deadtime control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 V to 3.5 V. Both error amplifiers have a common mode input range from -0.3 V to ($V_{CC} - 2V$), and

may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the noninverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

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

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

Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance

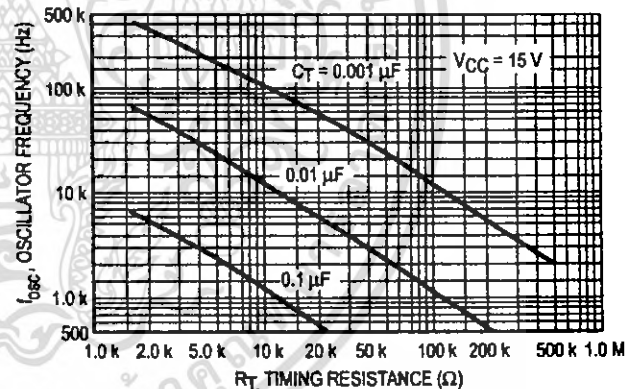


Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

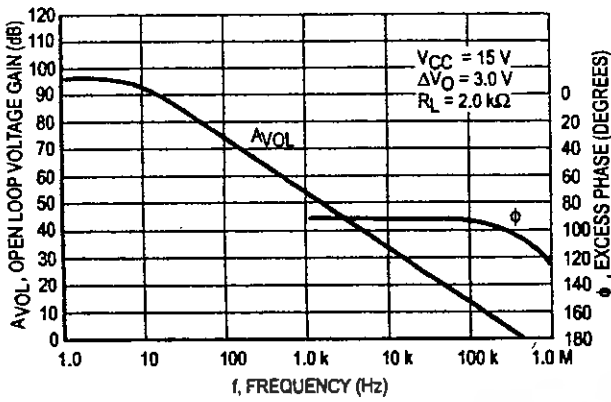


Figure 5. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

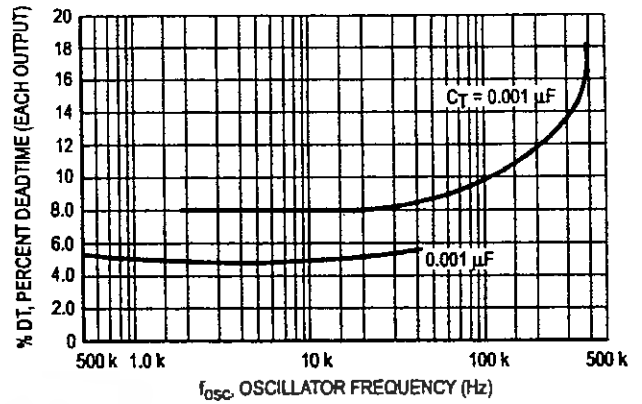


Figure 6. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

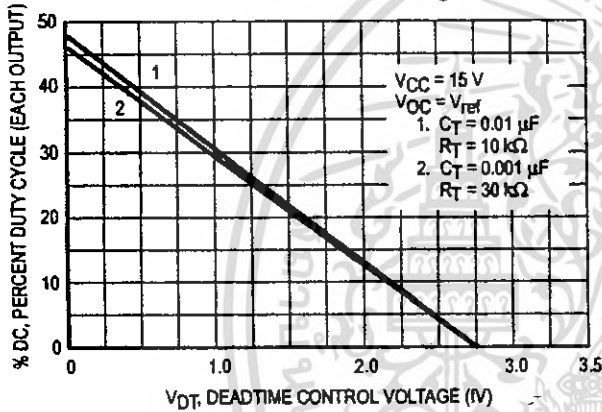


Figure 7. Emitter-Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

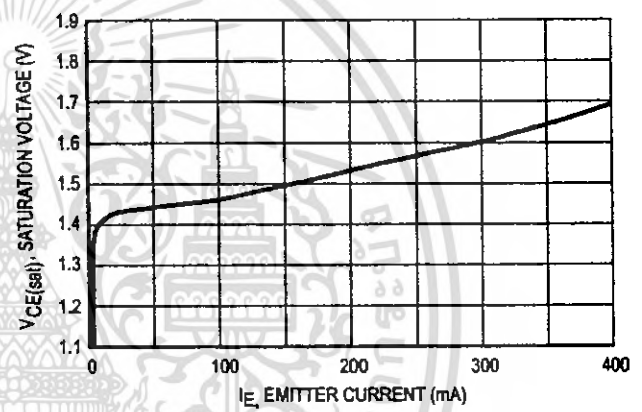


Figure 8. Common-Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

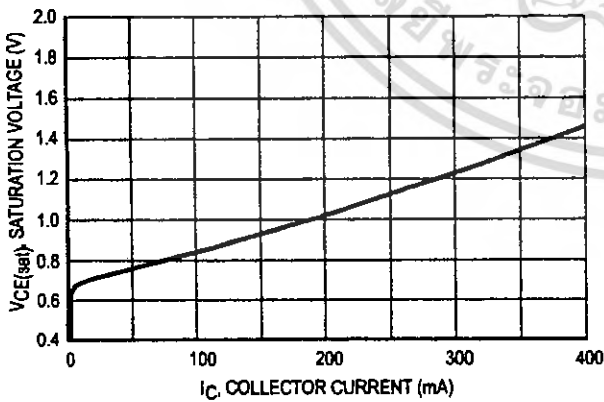
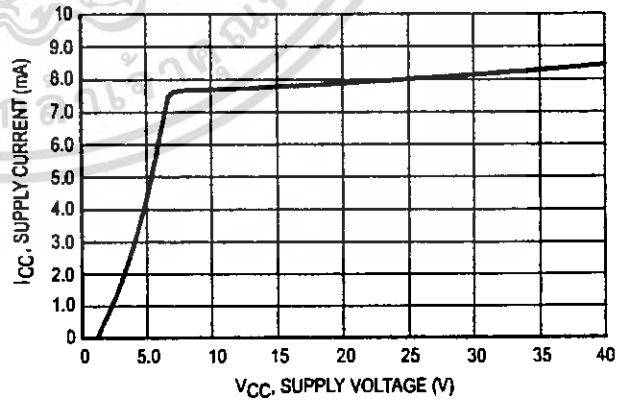


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 10. Error-Amplifier Characteristics

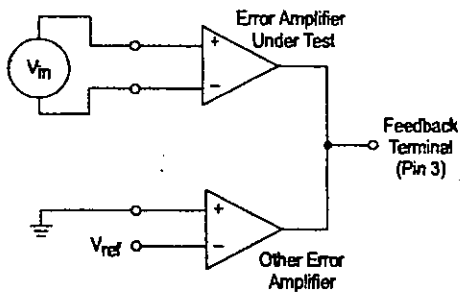


Figure 11. Deadtime and Feedback Control Circuit

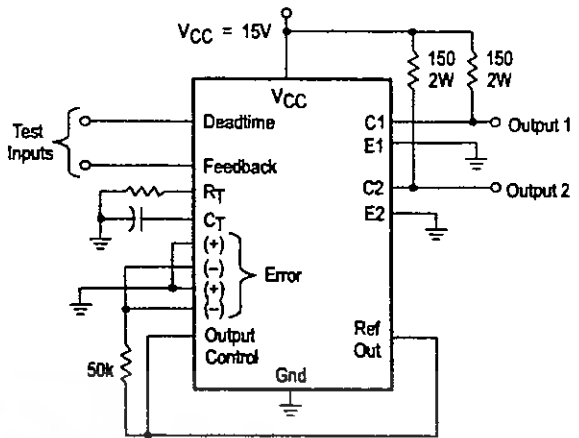


Figure 12. Common-Emitter Configuration Test Circuit and Waveform

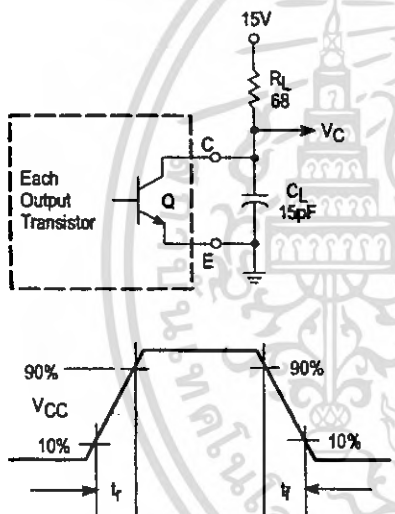
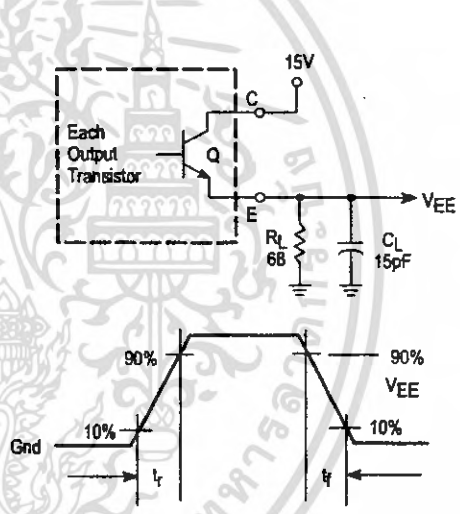


Figure 13. Emitter-Follower Configuration Test Circuit and Waveform



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 14. Error-Amplifier Sensing Techniques

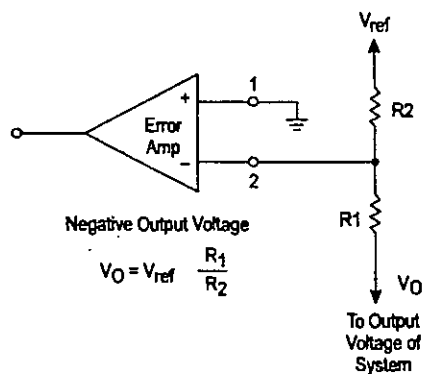
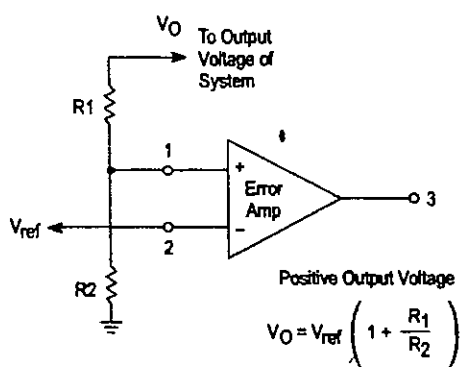


Figure 15. Deadtime Control Circuit

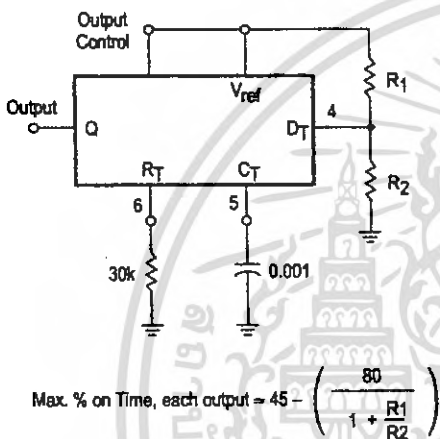


Figure 16. Soft-Start Circuit

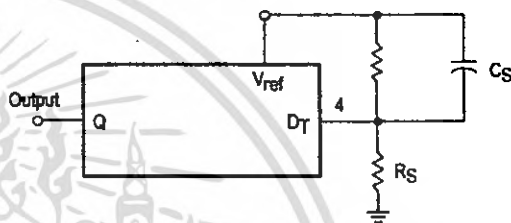
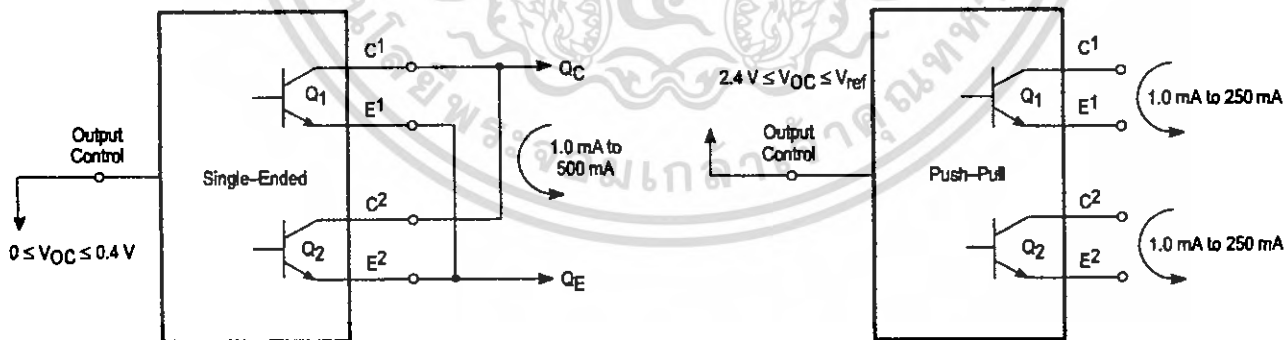


Figure 17. Output Connections for Single-Ended and Push-Pull Configurations



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

Figure 18. Slaving Two or More Control Circuits

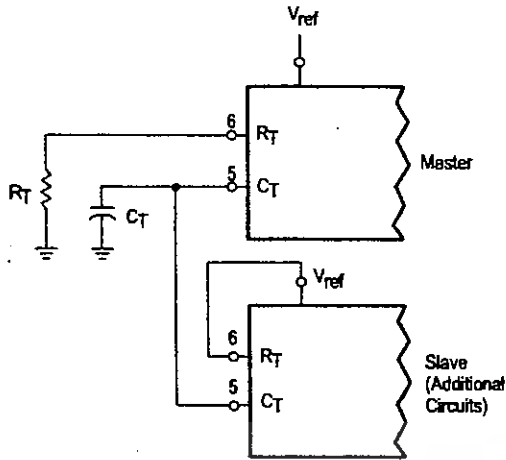


Figure 19. Operation with $V_{in} > 40\text{ V}$ Using External Zener

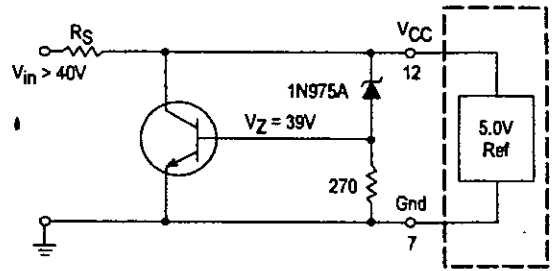
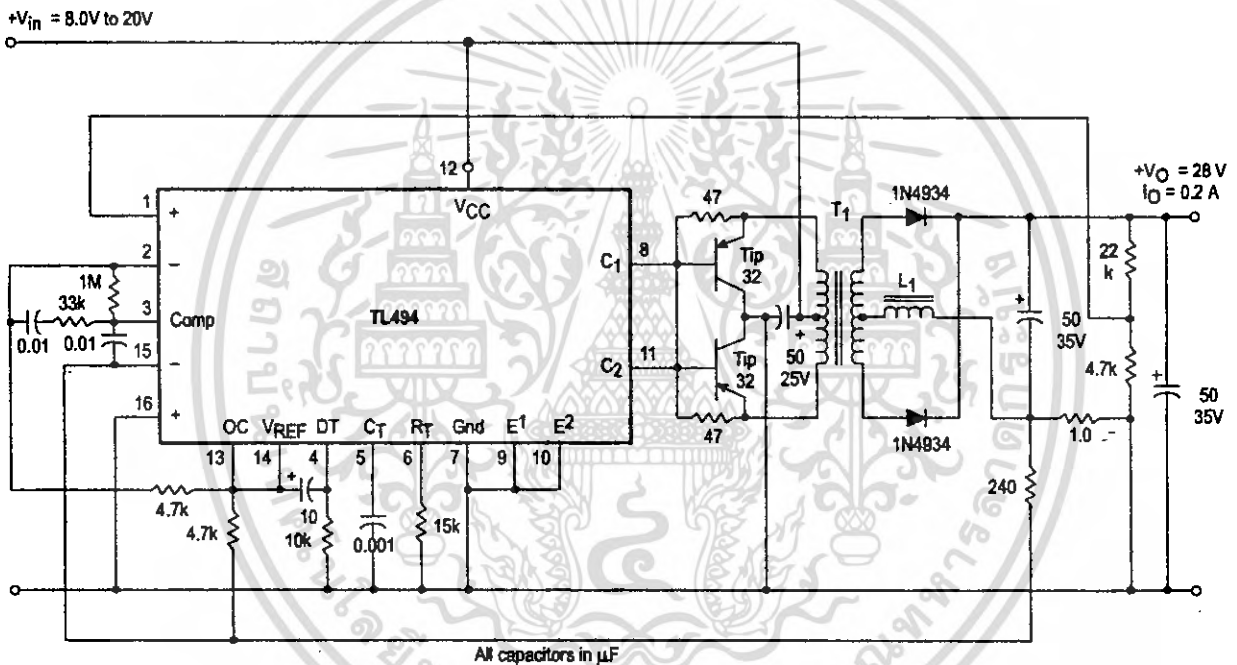


Figure 20. Pulse Width Modulated Push-Pull Converter



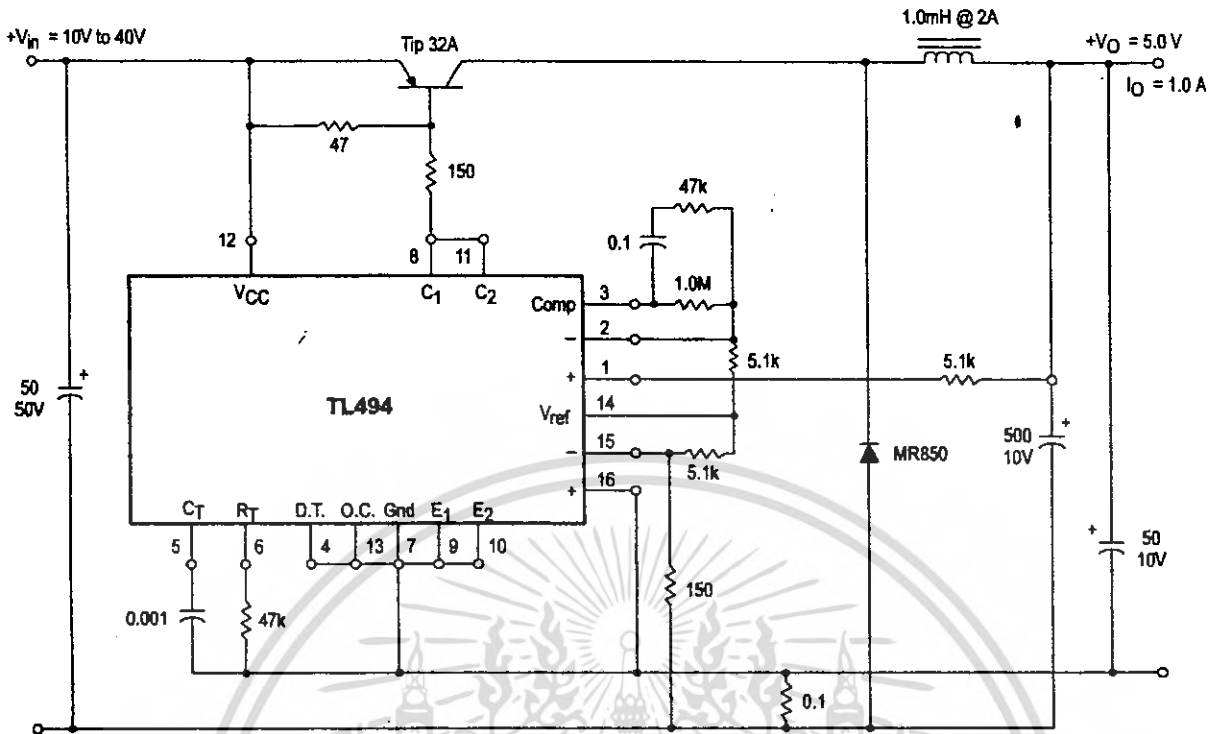
Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 10\text{ V to } 40\text{ V}$	14 mV 0.28%
Load Regulation	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ mA to } 1.0\text{ A}$	3.0 mV 0.06%
Output Ripple	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	65 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 28\text{ V},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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

Figure 21. Pulse Width Modulated Step-Down Converter

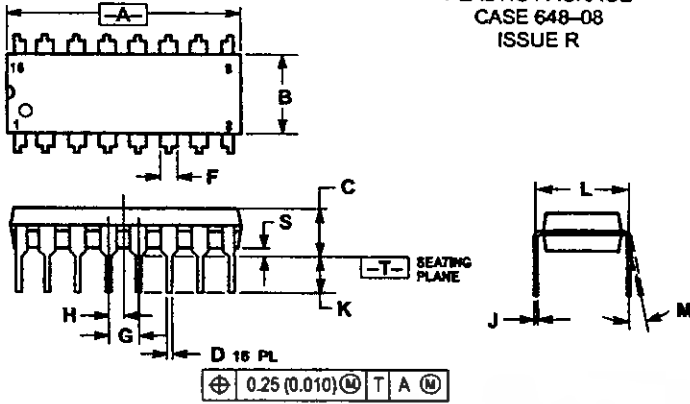


Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 8.0 \text{ V to } 40 \text{ V}$	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 0.2 \text{ mA to } 200 \text{ mA}$	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	40 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in}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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494 OUTLINE DIMENSIONS

N SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 648-08 ISSUE R

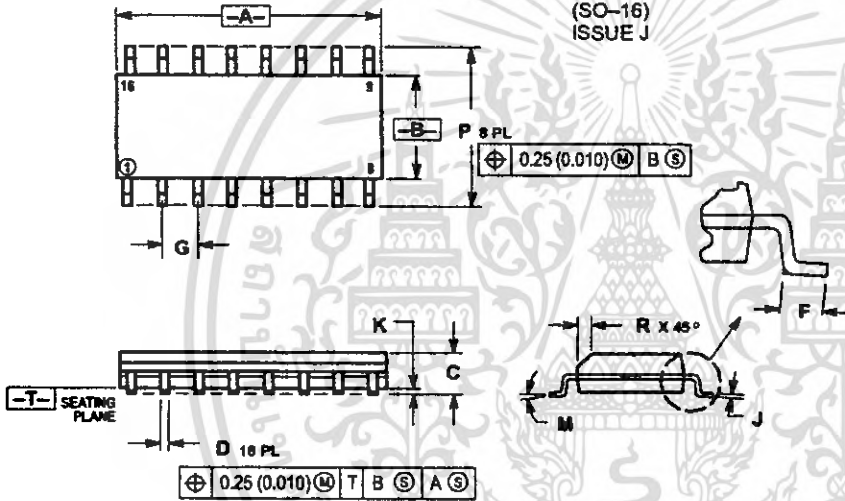


NOTES:

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

DIMENSION		MILLIMETERS		INCHES	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX	
A	2.90	10.00	0.395	0.393	
B	3.80	4.00	0.150	0.157	
C	1.35	1.75	0.054	0.068	
D	0.35	0.43	0.014	0.019	
F	0.40	1.25	0.016	0.049	
G	1.27	BSC	-	0.050	BSC
J	0.18	0.25	0.008	0.009	
K	0.10	0.25	0.004	0.009	
M	0°	7°	0°	7°	
P	5.90	6.20	0.229	0.244	
R	0.25	0.50	0.010	0.019	

D SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 751B-05 (SO-16) ISSUE J




NOTES:

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

DIM	MILLIMETERS		INCHES		
	MIN	MAX	MIN	MAX	
A	2.90	10.00	0.395	0.393	
B	3.80	4.00	0.150	0.157	
C	1.35	1.75	0.054	0.068	
D	0.35	0.43	0.014	0.019	
F	0.40	1.25	0.016	0.049	
G	1.27	BSC	-	0.050	BSC
J	0.18	0.25	0.008	0.009	
K	0.10	0.25	0.004	0.009	
M	0°	7°	0°	7°	
P	5.90	6.20	0.229	0.244	
R	0.25	0.50	0.010	0.019	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expense, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and  registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

How to reach us:

USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;
P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1-800-441-2447 or 602-303-5454

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com – TOUCHTONE 602-244-6609
INTERNET: <http://Design-NET.com>

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi-SPD-JLDC, 6F Seibu-Butsuryu-Center,
3-14-2 Tatsumi Koto-Ku, Tokyo 135, Japan. 03-81-3521-8315

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298



MOTOROLA

TL494/D



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้