สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



สวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็มเฟสชิฟท์โดยมีการสวิตช์แรงดันศูนย์

PWM Phase-shift controlled ZVS DC Power Supply

โดย

นายดำเนิน สิทธิชัยณรงค์

นายธนวัช คีรีศรี

นายธนัฐ ลีลาอนันตวงษ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 45976
วัน, เดือน, ปี 26 ก.พ. 2546

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2544

สวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็มเฟสชิฟท์โดยมีการสวิตช์แรงดันศูนย์

PWM Phase-shift controlled ZVS DC Power Supply

โดย

นายดำเนิน สิทธิชัยณรงค์

นายธนวัช คีรีศรี

นายธนัฐ ลีลาอนันตวงษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

ผศ. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็มเฟสชิฟท์โดยมีการสวิตช์แรงดันศูนย์

ผู้จัดทำ

1. นายดำเนิน สิทธิชัยณรงค์
2. นายธนวัช คีรีศรี
3. นายธนัฐ ลีลาอนันตวงษ์

_____อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ)

_____อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.อนุวัฒน์ จางวณิชเลิศ)

_____อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
หลักการรีโซแนนท์	3
ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบซีรี่ส์รีโซแนนท์	6
สภาวะการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์	9
บทที่ 3 หลักการ	12
การใช้งานฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	12
ซีโร่โวลต์เตจสวิตช์ชิ่ง (ZVS) ในวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	12
กำลังสูญเสียในรูปความร้อนของไดโอด	14
วงจรสนับเบอร์	15
บทที่ 4 ส่วนประกอบของวงจร	19
ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์	19
วงจรกำลัง	19
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	27
การวัดค่าที่จุดต่างๆของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	27
การทดสอบเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ภาระโหลดต่างๆ	35
การทดลองเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าต่างๆของแรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์	40
สรุปผลการทดลองและวิจารณ์งานที่ได้	64
กิตติกรรมประกาศ	
บรรณานุกรม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็มเฟสชิฟท์โดยมีการสวิตช์แรงดันศูนย์

นายดำเนิน สิทธิชัยณรงค์
นายธนวัช คีรีศรี
นายธนัฐ ลีลาอนันตวงษ์
ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาและทดลองสร้างเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) โดยอาศัยหลักการฟูลบริดจ์แบบซีรี่ส์รีโซแนนท์ โดยมีการควบคุมแบบปรับเฟสชิฟท์ และใช้หลักการสภาวะแรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ (Zero Voltage Switching) ส่วนประกอบของวงจรทั้งหมดประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ หม้อแปลงความถี่สูง วงจรเรียงกระแส (ใช้ไดโอดแบบฟาสต์รีคัฟเวอรี่) และชุดของโหลด วงจรควบคุมที่ประกอบด้วยวงจรสร้างความถี่ วงจรปรับเฟสชิฟท์ หลักการทำงานพื้นฐานของวงจรนั้นจะเป็นการนำวงจรอินเวอร์เตอร์แบบซีรี่ส์รีโซแนนท์ มาควบคุมการจ่ายพลังงานให้กับโหลด นอกจากนั้นยังเป็นการรักษาแรงดันตกคร่อมสวิตช์ให้เป็นศูนย์เป็นการลดการสูญเสียพลังงานที่เกิดกับมอสเฟต สวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้งานมีความถี่ประมาณ 80 กิโลเฮิรตซ์ โดยมีพิกัด 1.5 กิโลวัตต์ แรงดัน 42 โวลต์ กระแสประมาณ 30 ถึง 40 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PWM Phase-shift controlled Zero Voltage Switch DC Power Supply

Mr. Damnoen Sittichainarong
Mr.Tanawat Kirisri
Mr.Thanat Leelaanuntawong
Adviser
Assist.Prof.Dr Vijit Kinares
Assist.Prof.Anuwat Jangwanitlert
Mr.Surin Khamfoi
2001

Abstract

This project proposes the DC Power Supply by using the application of series resonant full bridge inverter that is controlled with PWM phase-shift. It makes voltage across switch be zero. The system consists of rectifier circuit; high frequency series resonant full bridge inverter, high frequency transformer, high frequency rectifier, and load equipment. Furthermore, the control circuit comprises oscillator, adjustable phase shift, and frequency circuit. From this basic principle, the full bridge inverter can control power delivery by load through L-C series resonant circuit to maintain ZVS (Zero Voltage Switch) condition. Additionally, the condition can decrease the switching loss of power MOSFETs. This DC Power Supply has switching frequency around 80 kHz, and output voltage is about 42 volts. Output current is about 30 to 40 Amperes, and output power is 1.5 kW.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การพล็อตค่า $+jX_L$ และ $-jX_C$ กับความถี่สำหรับวงจรอนุกรม RLC รีโซแนนท์ 3

รูปที่ 2.2 แสดงกราฟ อิมพีแดนซ์ กระแส และมุมเฟสกับความถี่ 4

รูปที่ 2.3 รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในวงจร RLC รีโซแนนท์ 6

รูปที่ 2.4 วงจรซีรี่ส์รีโซแนนท์ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ 7

รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 8

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{V_O}{V_S}$ กับ $\frac{f_S}{f_O}$ 9

รูปที่ 2.7 รูปสัญญาณการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ 10

รูปที่ 3.1 รูปลักษณะวงจรที่ใช้ในการวิจัย 12

รูปที่ 3.2 รูปวงจรและรูปคลื่นกระแสกับแรงดัน 13

รูปที่ 3.3 รูปแสดงลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะเริ่มหยุดนำกระแส 15

รูปที่ 3.4 รูปแสดงลักษณะการลดลงของกระแสและการกระเพื่อมขึ้นของแรงดันของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งขณะเริ่มหยุดกระแส 16

รูปที่ 3.5 รูปแสดงการต่อวงจรสนับเบอร์ช่วยหยุดนำกระแส เพื่อหน่วงแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ 17

รูปที่ 3.6 รูปแสดงการต่อสนับเบอร์ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินเพื่อจำกัดค่ากระแสสูงสุดที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งขณะเริ่มหยุดนำกระแส 18

รูปที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุมการจุดชนวนของมอสเฟท 19

รูปที่ 4.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรกำลัง 20

รูปที่ 4.3 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดัน 21

รูปที่ 4.4 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 21

รูปที่ 4.5 ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ 23

รูปที่ 4.6 ชุดวงจรรีโซแนนท์ 24

รูปที่ 4.7 ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้ทำอินดักเตอร์ 24

รูปที่ 4.8 ขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้ทำหม้อแปลงความถี่สูง 25

รูปที่ 4.9 วงจรรวมทั้งหมดของ DC Power Supply 26

รูปที่ 5.1 รูปแสดงสัญญาณแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับวงจรควบคุม 27

รูปที่ 5.2 รูปสัญญาณที่ออกจากขาเอาท์พุตของ ไอซีเบอร์ UC3879 28

รูปที่ 5.3 รูปสัญญาณที่วัดที่ขาเกทและซอร์ท 29

รูปที่ 5.4 รูปสัญญาณเดดไทม์ของสัญญาณขับขาเกท 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.5 รูปสัญญาณที่วัดที่ขาเกทและขาซอร์ทที่มอสเฟทขนานกัน 31
รูปที่ 5.6 รูปสัญญาณอินพุทของอินเวอร์เตอร์ 31
รูปที่ 5.7 รูปสัญญาณเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ (ไม่มีโหลด) 32
รูปที่ 5.8 รูปสัญญาณแรงดันเอาท์พุทที่ออกจากหม้อแปลง 32
รูปที่ 5.9 รูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด 33
รูปที่ 5.10 รูปสัญญาณเอาท์พุทที่ออกจากไดโอด 34
รูปที่ 5.11 รูปสัญญาณเอาท์พุทที่ตัวเก็บประจุรีโซแนนท์ 34
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Output Current และ Output Power 36
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DC Input Current และ Output Power 36
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage และ Output Power 37
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DC Input Voltage และ Output Power 37
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DC Input Power และ Output Power 38
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Converter Efficiency และ Power Output 38
รูปที่ 5.18 สัญญาณที่ภาระโหลด 26.26% (400 W) 39
รูปที่ 5.19 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 20 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 42
รูปที่ 5.20 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 20 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 43
รูปที่ 5.21 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 40 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 44
รูปที่ 5.22 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 40 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 45
รูปที่ 5.23 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 60 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 46
รูปที่ 5.24 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 60 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 47
รูปที่ 5.25 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 80 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 48
รูปที่ 5.26 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 80 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.27 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 100 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 50
รูปที่ 5.28 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 100 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 51
รูปที่ 5.29 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 120 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 52
รูปที่ 5.30 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 120 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 53
รูปที่ 5.31 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 140 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 54
รูปที่ 5.32 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 140 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 55
รูปที่ 5.33 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 160 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 56
รูปที่ 5.34 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 160 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 57
รูปที่ 5.35 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 180 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 58
รูปที่ 5.36 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 180 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 59
รูปที่ 5.37 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 200 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 60
รูปที่ 5.38 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 200 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 61
รูปที่ 5.39 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 220 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 62
รูปที่ 5.40 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 220 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์ 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ภาระโหลดต่างๆ 35

ตารางที่ 2 ผลการทดลองเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าต่างๆ
ของแรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 40

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์แรงดันกระเพื่อมทางเอาท์พุทที่ค่าต่างๆ
ของแรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

เนื่องจากปริญญานิพนธ์ที่ผ่านมาในอดีต ทั้งเรื่องเครื่องเชื่อมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง ในปีการศึกษา 2542 เครื่องเชื่อมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง ในปีการศึกษา 2543 และวิทยานิพนธ์ เรื่องแหล่งจ่ายไฟแบบความถี่สูงที่แรงดันสวิตช์ศูนย์ในปีการศึกษา 2543 พบว่าหัวข้อวิจัยหลักคือการศึกษา, ออกแบบ, พัฒนาและประยุกต์ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์ชิ่งทั้งสิ้น เหตุที่นิยมใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตช์ชิ่งกันอย่างแพร่หลายนั้น เพราะสามารถให้กำลังไฟฟ้าได้สูงในขณะที่ขนาดเล็กกะทัดรัด สำหรับโครงงานนี้จะเป็นการศึกษาและทดลองสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นมาเพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับรถไฟฟ้าซึ่งใช้พิกัดแรงดันขนาด 42 โวลต์

จากการศึกษาปริญญานิพนธ์ที่ผ่านมาพบว่าในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนั้น จะเป็นการประยุกต์วงจรของ ดีซี - ดีซี คอนเวอร์เตอร์ แบบซีรี่ส์รีโซแนนท์ โดยใช้วงจรเร็กติไฟร์เรียงไฟฟ้ากระแสสลับ 50 เฮิรตซ์ (AC) ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) แล้วส่งต่อไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ซึ่งใช้มอสเฟตเป็นสวิตซ์ในการตัดต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นสัญญาณ สแควร์เวฟที่ความถี่สูง แล้วส่งผ่านไปยังหม้อแปลง โดยก่อนที่สัญญาณจะเข้าหม้อแปลงนั้นจะมีชุดรีโซแนนท์ ซึ่งประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ จากนั้นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์ที่ความถี่สูง และจ่ายไฟให้กับภาระต่อไป สำหรับการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้นจะใช้ ไอซีเบอร์ UC3879 ซึ่งมีข้อดีคือ จะสามารถปรับได้ทั้งเฟสชิฟท์และความถี่ รวมทั้งค่าเดดไทม์ยังคงที่ทุกๆย่านความถี่ที่ใช้งาน

ในหลักการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ จะใช้การปรับ, ควบคุมเฟสชิฟท์ และสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ เพื่อให้ได้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่สูงที่สุด

หลักการที่นำเสนอ คือ

1.) ขนาดพิกัดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 1.5 กิโลวัตต์
2.) การควบคุมการสวิตช์เป็นแบบเฟสชิฟท์
3.) ใช้หลักการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์เพื่อลดความสูญเสีย

ขอบเขตของงานที่ทำการวิจัย

ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายพิกัดขนาด 1.5 กิโลวัตต์, แรงดันประมาณ 42 โวลต์, กระแสประมาณ 30-40 แอมแปร์, ความถี่ ประมาณ 80 กิโลเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตของปริญญานิพนธ์นี้

ประกอบด้วย ทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาอ้างอิงได้แก่ การรีโซแนนท์วงจร ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบซีรีส์รีโซแนนท์ และการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ และหลักการที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็นการนำวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบซีรี่ส์รีโซแนนท์ เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยวงจรทั้งหมดได้แก่ วงจรเร็กติไฟร์แบบฟูลบริดจ์ วงจรควบคุมการสวิตช์, เฟสชิฟท์ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ชุด LC รีโซแนนท์ ซึ่งประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ หม้อแปลงความถี่สูง วงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์ที่ความถี่สูง และ LC ฟิลเตอร์ โดยปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการทดลองและเก็บผลการทดลองทั้งที่การเปลี่ยนภาระโหลด และ แรงดันป้อนเข้า ที่คอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎี

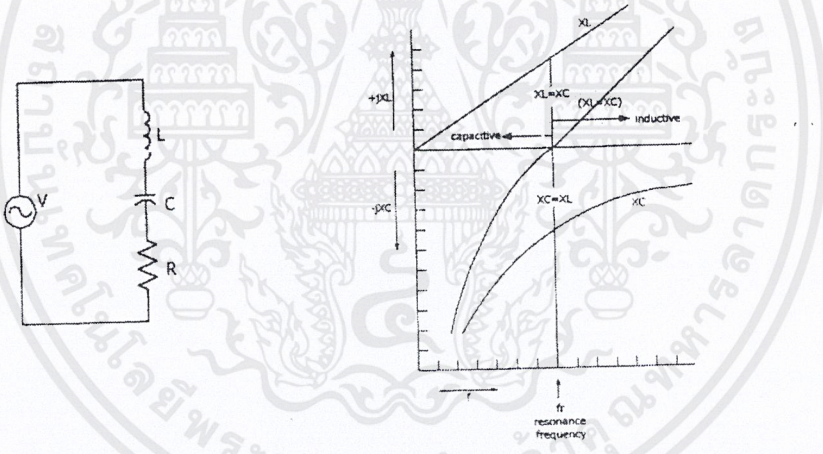
หลักการรีโซแนนท์

เมื่อเราปรับความถี่ที่ป้อนให้กับวงจรอนุกรม RLC จะพบว่าที่ความถี่ค่าหนึ่ง ค่า X_L จะเท่ากับ X_C เป็นผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวงจร RLC มีค่าต่ำสุด นั่นคือ Z = R ในสภาวะเช่นนี้เราเรียกว่าอยู่ในสภาวะรีโซแนนท์ซึ่งความถี่ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความถี่รีโซแนนท์ (Resonance Frequency) เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำสุด กระแสที่ไหลในวงจรจึงมีค่ามากที่สุดและเป็นผลให้แรงดันที่ตกคร่อม L และมีค่าเพิ่มขึ้น

อนุกรมรีโซแนนท์

ผลของความถี่ที่มีต่ออิมพีแดนซ์ของวงจรอนุกรม RLC แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีค่าดังนี้

$$Z = R + j(X_L - X_c)$$



ก) วงจรอนุกรม RLC ข) X_L, X_C เมื่อพล็อตกับความถี่

รูปที่ 2.1 การพล็อตค่า $+jX_L$ และ $-jX_C$ กับความถี่สำหรับวงจรอนุกรม RLC รีโซแนนท์

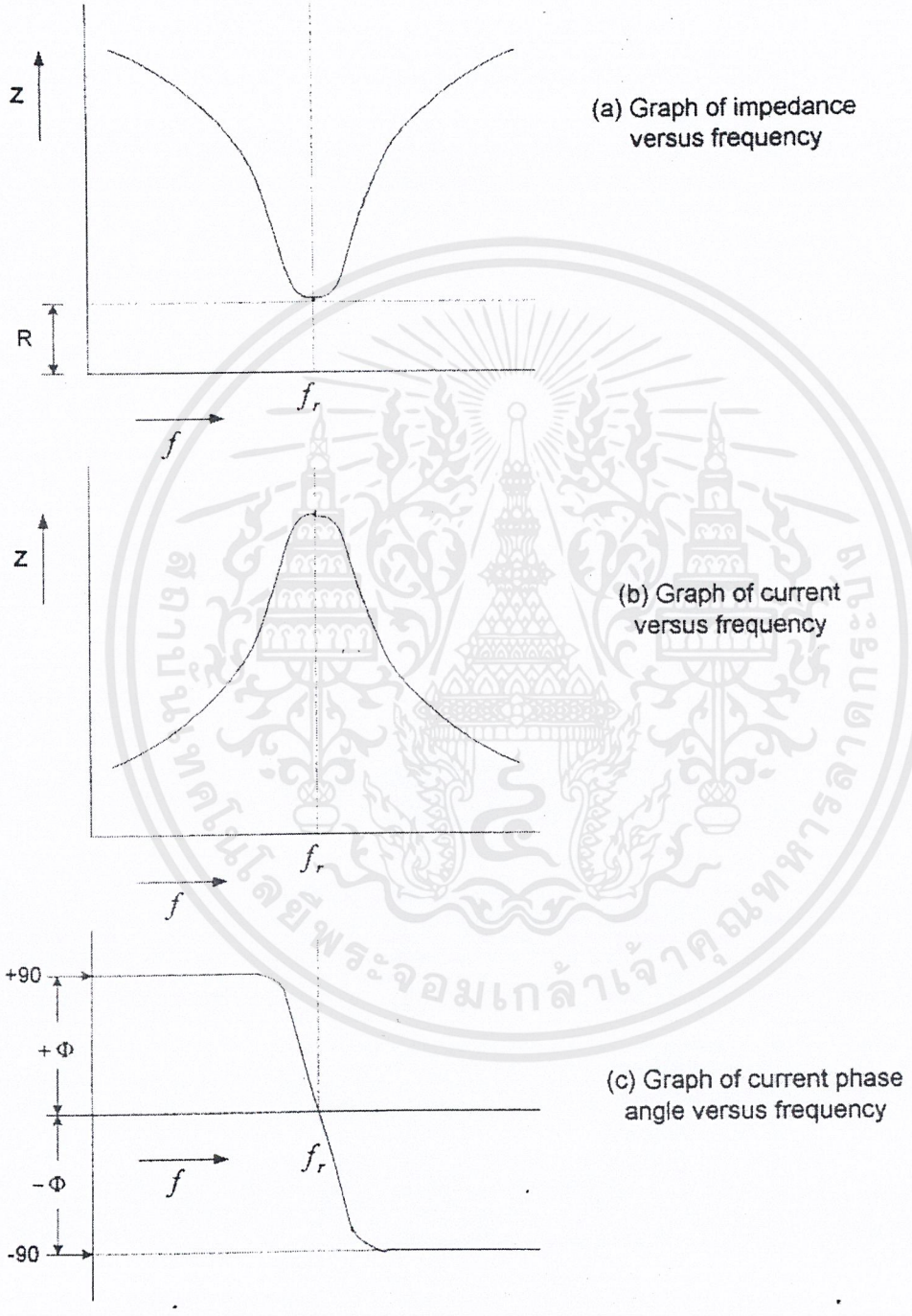
เนื่องจากค่า $X_L = 2\pi fL$ และ $X_C = \frac{1}{2\pi fc}$ ดังนั้นค่าของอิมพีแดนซ์จึงขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ ดังรูปที่ 2.1 ข) จะพบว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า X_L เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น (Linear) ในทางกลับกัน X_C จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่ค่า X_C จะไม่มีทางเท่ากับศูนย์ ผลรวมของรีแอคแตนซ์คือ X_L-X_C ดังแสดงไว้เป็นเส้นประในกราฟของรูปที่ 2.1 ข) ที่ความถี่ต่ำ ค่า X_L จะมีค่าน้อยกว่าค่า X_C ดังนั้นผลรวมของรีแอคแตนซ์จะเป็นค่าของ X_C ที่ความถี่สูง $X_L = X_C$ คือ ค่าที่ความถี่รีโซแนนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = R + j(0)$$

$$Z = R$$

เมื่อ $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟที่แปรผันตามความถี่จะได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงกราฟ อิมพีแดนซ์ กระแส และมุมเฟสกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสในวงจรอนุกรม $$I = \frac{V}{R + j(X_L + X_C)}$$

กระแสที่ไหลเมื่อรีโซแนนท์ ($X_L = X_C$)

$$V = \frac{I}{R}$$

จากรูปจะพบว่ากราฟจะมีค่าต่ำเมื่อความถี่ในวงจรไม่อยู่ที่จุดรีโซแนนท์

ความถี่รีโซแนนท์

$$X_L = 2\pi fC$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

ดังนั้น

เมื่อ L มีหน่วยเป็นเฮนรี่ (Henry)

C มีหน่วยเป็นฟารัด (Farad)

f มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hertz)

แรงดันที่จุดรีโซแนนท์

แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานในวงจร RLC (รูปที่ 2.1 ก) จะมีค่าเท่ากับ $I*R$ และที่จุดรีโซแนนท์แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายส่วนที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าดังนี้

$$V_c = IX_C$$

$$V_L = IX_L$$

พลังงานที่ส่งผ่านระหว่าง L และ C

เมื่อเรานำรูปคลื่นของ V_R V_C และ V_L ที่จุดรีโซแนนท์มาพล็อตดังรูปที่ 3 ก) จะพบว่า V_L จะกลับเฟสกัน 180 องศา ส่วน V_R จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ V_C และ V_L มีค่าเท่ากับศูนย์ จากที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นว่าจะมีการส่งผ่านพลังงานระหว่าง L กับ C กลับไปมา เมื่ออยู่ในสภาวะรีโซแนนท์

Q แฟคเตอร์ของวงจรอนุกรม RLC

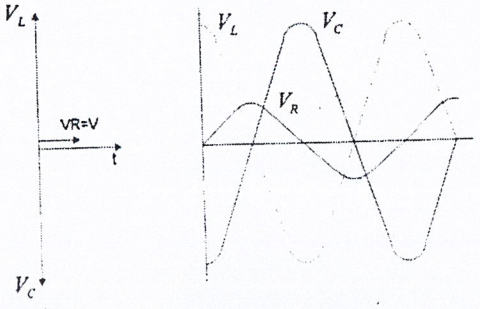
พิจารณาสมการ I, V_C, V_L ที่จุดรีโซแนนท์

$$I = \frac{V}{R}$$

$$V_L = IX_L$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



ก) รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรม ข) รูปคลื่นแรงดัน V_R, V_C และ V_L ของวงจร RLC รีโซแนนท์ที่จุดรีโซแนนท์

รูปที่ 2.3 รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในวงจร RLC รีโซแนนท์

ดังนั้น

$$\frac{V_L}{V} = \frac{X_L}{R}$$

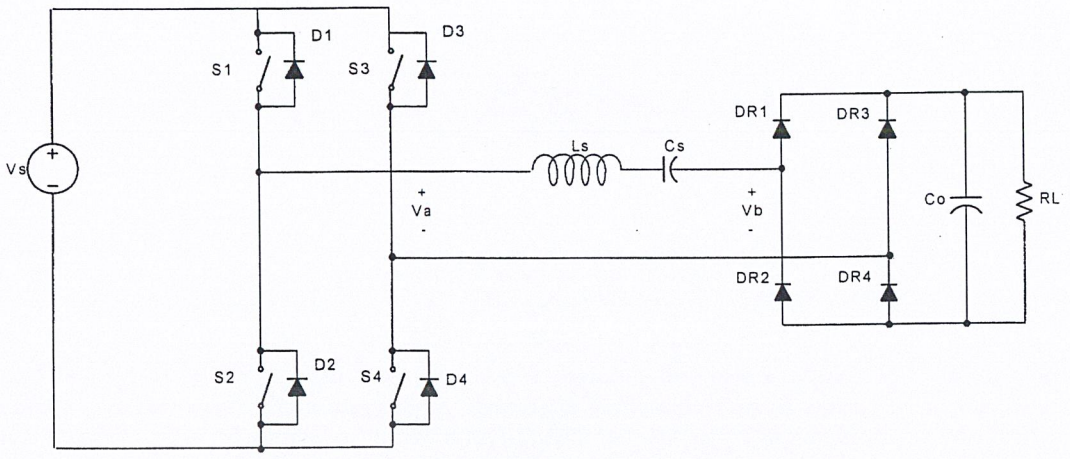
อัตราส่วน V_L / V และ V_C / V คือ ค่า ควอลิตี้ (Quality) ของวงจรรีโซแนนท์หรือค่า Q แฟคเตอร์นั่นเอง

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

ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบซีรี่ส์รีโซแนนท์

สวิตช์ของวงจร ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์จะสลับการทำงานทำให้ได้แรงดันออกเป็นแรงดันไฟสลับ ดังนั้นวงจรฮาล์ฟบริดจ์จึงทำหน้าที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ของวงจรดีซี–ดีซี คอนเวอร์เตอร์ โดยอีกส่วนทางด้านขาออก ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ส่วนตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุนั้นทำให้เกิดการรีโซแนนท์ จึงถือว่าเป็นโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



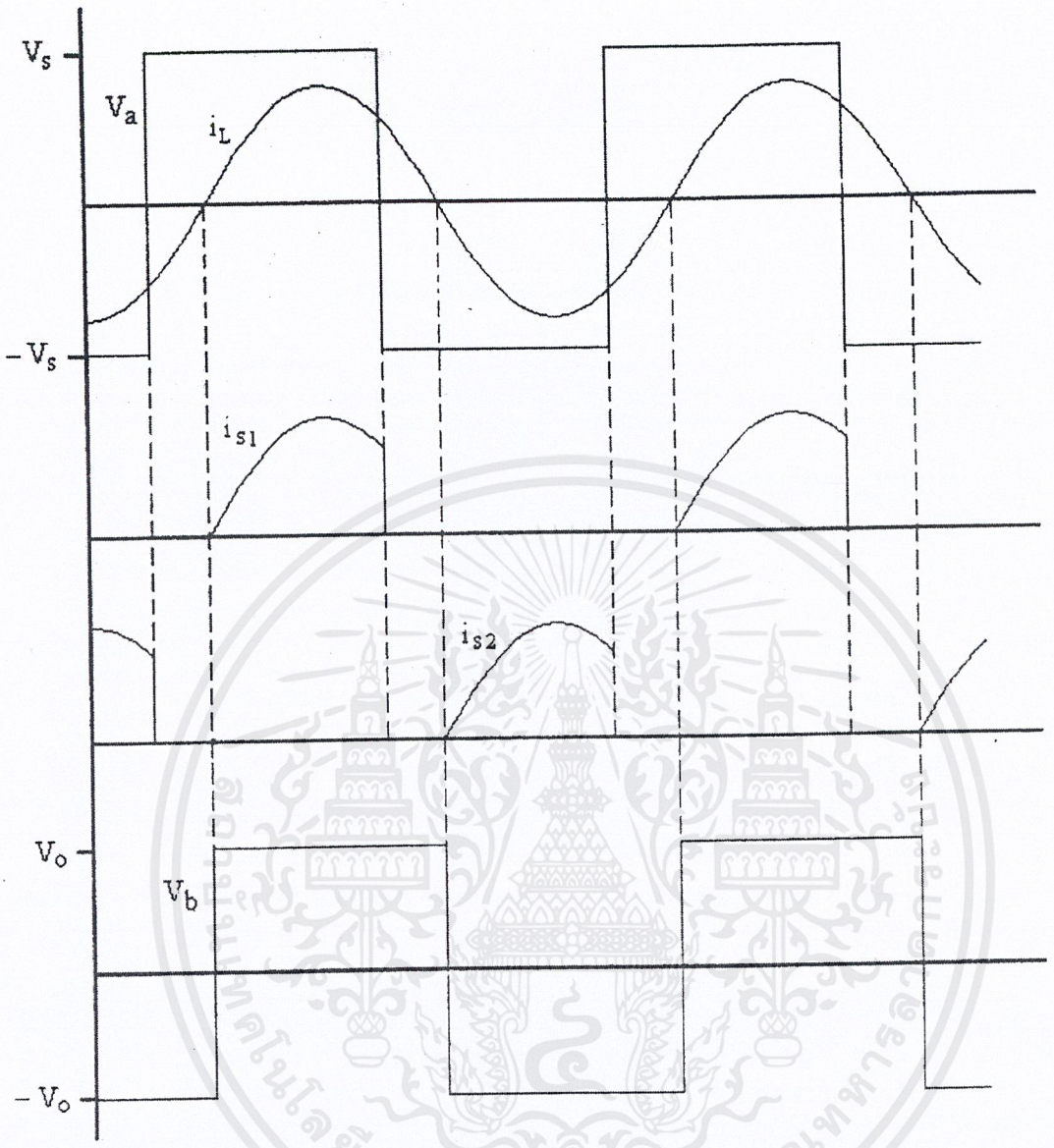
รูปที่ 2.4 วงจรซีรี่ส์รีโซแนนท์ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์

จากวงจรตัวเก็บประจุ Cs ทำหน้าที่รีโซแนนท์กับตัวเหนี่ยวนำ Ls วงจรสมมูลย์ของโหลดของอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำและความต้านทานโหลดต่ออนุกรมกันจึงเรียกว่าวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์นี้ว่าวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์รีโซแนนท์แบบอนุกรมโหลด (Series Load Resonant Converter)

วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ มีข้อดีคือตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดรีโซแนนท์ Cs ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะทำหน้าที่ ปิดกั้นไฟตรงไม่ให้ไหลผ่านหม้อแปลง (Volt-sec Unbalance) นอกจากนี้กระแสไหลผ่านสวิตช์ จะลดลงตามกระแสโหลดเมื่อความต้านทานของโหลดเพิ่ม ทำให้กำลังงานสูญเสียในสวิตช์ลดลงเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น การป้องกันการลัดวงจร โดยออกแบบให้ค่า Q ค่อนข้างสูง ทำให้เกิดกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกับค่าความต้านทานของโหลดน้อย จนเมื่อความต้านทานเป็นศูนย์กระแสจะผ่านสวิตช์จะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก

ข้อเสีย ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ รีโซแนนท์แบบอนุกรมโหลด คือเมื่อไม่สามารถควบคุมค่าแรงดันด้านออกเมื่อไม่มีโหลด เนื่องจากแรงดันด้านออกจะไม่ขึ้นกับความถี่ โดยแรงดันออกจะเปลี่ยนตามความถี่น้อยลงและถ้า No Load จะเป็นเส้นตรงในแนวนอน ดังนั้นจึงไม่สามารถคุมค่าแรงดันด้านออกในขณะไม่มีโหลด แต่เราสามารถแก้โดยใช้ภาคควบคุมการทำงานของสวิตช์เป็นแบบออสซิเลตด้วยตัวเองทำให้วงจร ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์หยุดทำงานในขณะที่ไม่มีโหลดและจะเริ่มทำงานใหม่ขณะมีโหลดต่อเข้ากับวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์และออกแบบวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์รีโซแนนท์แบบอนุกรมโหลดสามารถใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเอซี (ac Analysis Technique) (ROBERT L.STEIGERWALD ; A Comparison of Half-Bridge Resonant converter Topologies; IEEE Transaction On Power Electronics, Vol.3, No.2, April, 1988) ซึ่งจะง่ายต่อการวิเคราะห์และการออกแบบวงจร แต่ผลการวิเคราะห์และออกแบบวงจรนี้มีค่าโดยประมาณเพื่อใช้ในการประมาณค่าโดยใช้เทคนิควิเคราะห์แบบเอซีจะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรดังต่อไปนี้

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{1}{1 + j(\frac{X}{R_{ac}} - \frac{X_C}{R_{ac}})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_d = \frac{E_{IN}}{2}$$

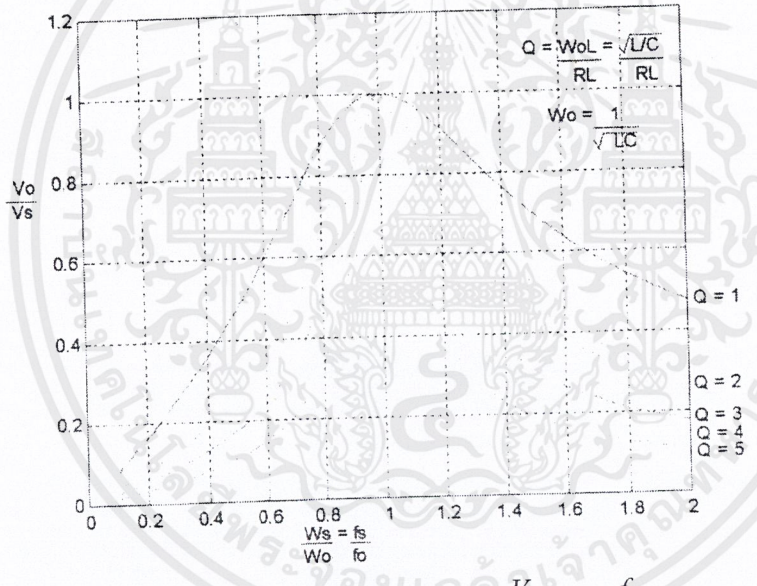
$$R_{ac} = (\frac{8}{\pi^2})R_L$$

$$Q = \frac{\omega_O L_S}{R_L}$$

$$\omega_O = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}$$

$$\frac{E_O}{E_d} = \frac{1}{1 + j(\frac{\pi^2}{8})Q(\frac{\omega}{\omega_O} - \frac{\omega_O}{\omega})}$$

เมื่อนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันออกต่อแรงดันด้านเข้าสำหรับความถี่เมื่อค่า Q = 1-5 ได้กราฟดังรูป



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{V_O}{V_S}$ กับ $\frac{f_S}{f_O}$

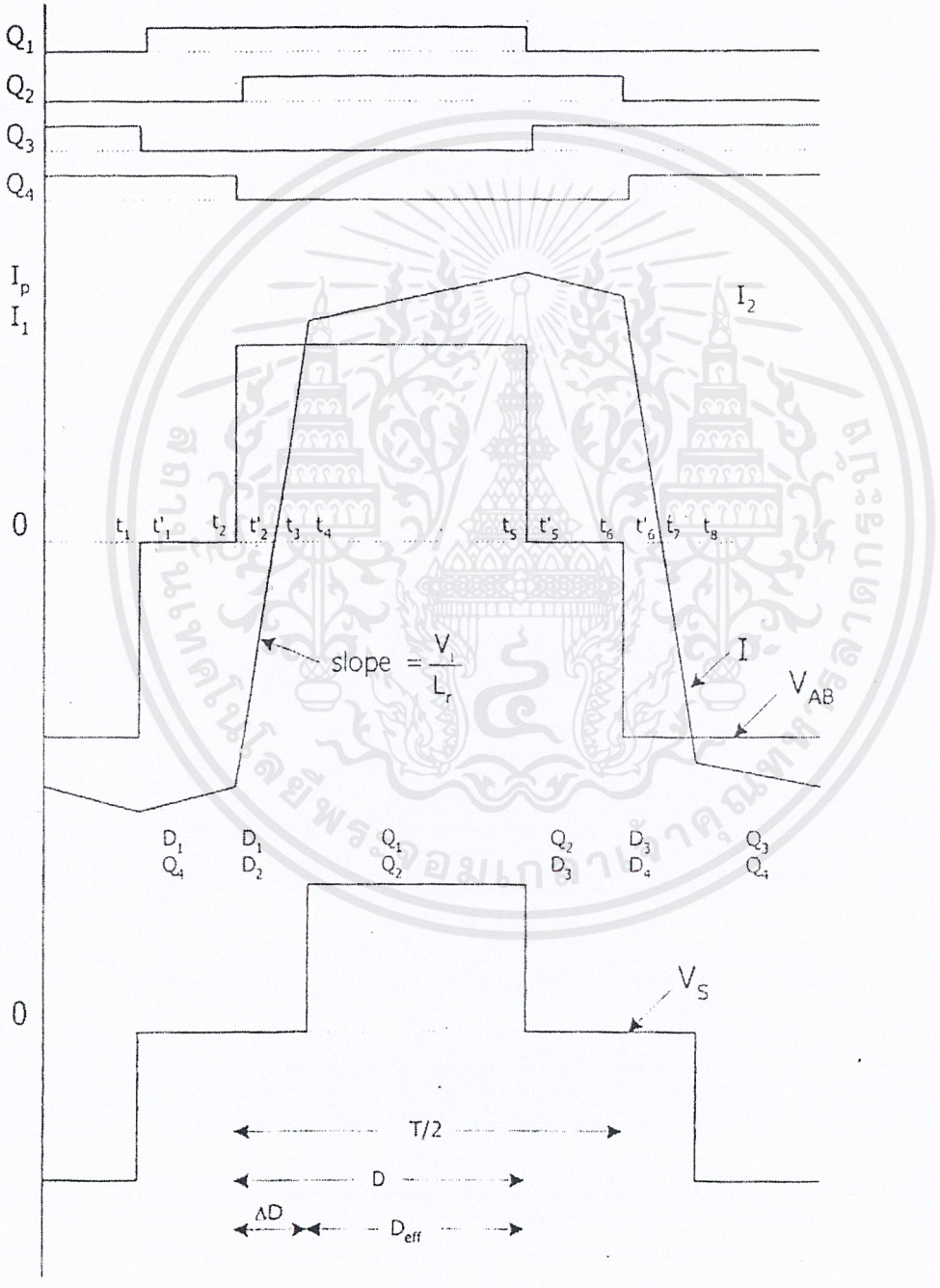
สภาวะการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

คอนเวอร์เตอร์พัลซ์วิดท์มอดูเลตสวิตช์ที่แรงดันศูนย์มีสัญญาณขับเกท แรงดันและกระแสปฐมภูมิ และแรงดันทุติยภูมิ ตามรูปที่ 2.9 ซึ่งการขับเกทจะเลื่อนเฟสให้ต่างกันระหว่างข้างซ้ายและข้างขวา ตามดิวตี้ไซเคิล(Duty Cycle, D) การปิดสวิตช์ที่แรงดันศูนย์จะต้องใช้พลังงานสะสมจากความเหนี่ยวนำรีโซแนนท์ซึ่งอยู่ในสภาวะกระแสต่อเนื่อง ในการวิเคราะห์จะนำค่าคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์มาคิดด้วยเช่น ความเก็บประจุด้านเอาท์พุตของมอสเฟต จะอธิบายเป็นสภาวะตามลำดับดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ 1 (t'_1- t_2) Q_4 และ D_1 นำกระแส ลูปกระแสเนื่องจากความเหนี่ยวนำรีโซแนนท์ไหลผ่านหม้อแปลงน้อยลง

สภาวะที่ 2 (t_2 - t'_2) เมื่อเวลา t = t_2 Q_4 เปิดวงจร กระแสที่ผ่านความเหนี่ยวนำรีโซแนนท์ยังคงไหลคายประจุและเก็บประจุความเก็บประจุด้านเอาท์พุทของ Q_2 และ Q_4 ทำให้ D_2 ปิดวงจร หลังจาก D_2 นำกระแส Q_2 จะถูกสั่งปิดวงจรในสภาวะไม่มีแรงดันตกคร่อม โดยพลังงานสะสมในความเหนี่ยวนำรีโซแนนท์ จะต้องมากกว่าพลังงานที่ความเก็บประจุต้องการถึงจะเกิดสภาวะสวิตช์ที่แรงดันศูนย์



รูปที่ 2.7 รูปสัญญาณการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ 3 (t'_2 - t_4) ไดโอด D_1 และ D_2 นำกระแสและพลังงานในความเหนี่ยวนำรีโซแนนท์ถูกผลักกลับไปยังแหล่งจ่าย แรงดันที่ V_{ds} ยังเป็นศูนย์ จนกระทั่ง $t = t_3$ กระแสความเหนี่ยวนำเป็นศูนย์ D_1 และ D_2 จึงเปิดวงจร

สภาวะที่ 4 (t_3 - t_4) ที่เวลานี้กระแสไหลผ่าน Q_1 Q_2 และ L_r จากศูนย์ ด้วยคุณสมบัติความเหนี่ยวนำ

สภาวะที่ 5 (t_4 - t_5) ที่เวลา t = 4 กระแสปฐมภูมิมีค่ามากกว่ากระแสทุติยภูมิ ไดโอดเรียงกระแสนำกระแสเป็นการส่งพลังงานจากปฐมภูมิไปยังทุติยภูมิ

สภาวะที่ 6 (t5 - t′5) ที่เวลา $t = t_5$ สัญญาณควบคุมจะสั่งให้ Q_1 เปิดวงจร แต่เนื่องจากความเหนี่ยวนำรีโซแนนท์ จะทำให้กระแสยังคงไหลอยู่ผ่าน D_3 และ Q_2 ทำให้ V_{ds} ของ Q_3 มีค่าเป็นศูนย์ สัญญาณควบคุมจะสั่งให้ Q_3 ปิดวงจร

สภาวะที่ 7 (t'_5 - t_6) กระแสไหลเนื่องจากความเหนี่ยวนำยังคงไหลผ่าน D_3 และ Q_2

สภาวะที่ 8 (t_6 - t'_6) ที่เวลา $t = t_6$ Q_2 จะถูกสั่งให้เปิดวงจร กระแสจากความเหนี่ยวนำจะเก็บประจุของ Q_2 จากศูนย์โวลต์ถึง V_{in} และคลายประจุความเก็บประจุของ Q_4 จาก V_{in} เป็นศูนย์ ที่ $t=t'_6$ D_4 จะนำกระแสและ Q_4 จะถูกสั่งให้ปิดวงจร

สภาวะที่ 9 (t'_6-t_7) D_3 และ D_4 นำกระแส และกระแสจากความเหนี่ยวนำรีโซแนนท์จะไหลไปยังแหล่งจ่าย เมื่อกระแสเป็นศูนย์ D_3 และ D_4 จะเปิดวงจร

สภาวะที่ 10 (t_7 - t_8) Q_3 และ Q_4 จะนำกระแสขณะแรงดันเป็นศูนย์

สภาวะที่ 11 (t_8 - t_1) ที่ $t = t_8$ กระแสปฐมภูมิมีค่าเท่ากับกระแสทุติยภูมิ

สภาวะที่ 12 (t_1-t'_1) เป็นการเริ่มด้วย Q_3 ถูกสั่งเปิด ความเก็บประจุของ Q_3 และ Q_1 ถูกเก็บประจุและคายประจุจนแรงดันของ Q_1 เป็นศูนย์เป็นเวลาที่สั่งให้ Q_1 ปิดวงจร

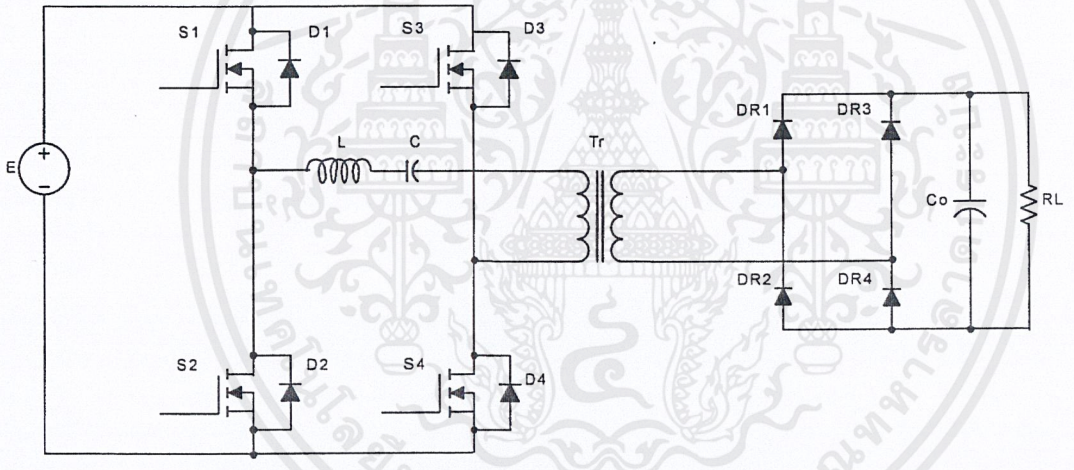
กลับไปยังสภาวะที่ 1 อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
หลักการ

การใช้งานฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนของวงจรซีรี่ส์รีโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ จะมีชุดรีโซแนนท์ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ อันเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการซีโร่โวลต์เตจสวิตช์ และนอกจากนั้นในวงจรจะมีหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งใช้ในการยกระดับกระแสจากอินเวอร์เตอร์ให้สูงขึ้น ซึ่งหลักการทำงานพื้นฐานของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนี้ จะเป็นการนำวงจรอินเวอร์เตอร์มาควบคุมการจ่ายพลังงานให้กับโหลด และวงจรรีโซแนนท์จะเป็นส่วนช่วยให้เกิดการส่งผ่านพลังงานให้แก่โหลดได้สูงสุด ซึ่งต้องให้ความถี่สวิตช์ชิ่งของอินเวอร์เตอร์นั้นทำงานที่ความถี่รีโซแนนท์หรือมีค่ามากกว่าความถี่รีโซแนนท์เล็กน้อย โดยความถี่สวิตช์ชิ่งจะถูกควบคุมด้วยวงจรควบคุมซึ่งสามารถปรับความถี่ได้ โดยความถี่ที่ใช้งานจะอยู่ในช่วง 80 กิโลเฮิรตซ์



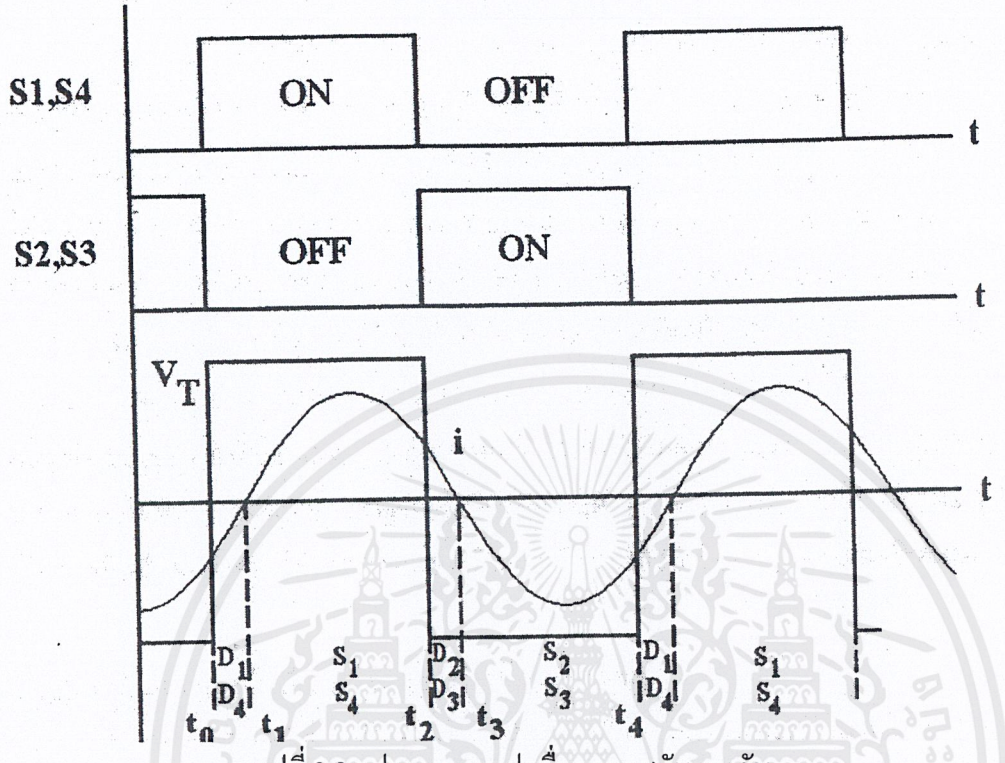
รูปที่ 3.1 รูปลักษณะวงจรที่ใช้ในการวิจัย

ซีโร่โวลต์เตจสวิตชิ่ง (ZVS) ในวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

สวิตช์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์เป็นอุปกรณ์เปิด-ปิดวงจร (มอสเฟต) โดยปกติจะมีกำลังการสูญเสียที่สวิตช์อยู่ค่าหนึ่ง เนื่องจากที่สวิตช์จะมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์อยู่ค่าหนึ่ง ในการทำงานแต่ละครั้งจะมีกำลังสูญเสียเท่ากับผลคูณของกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์และแรงดันที่คร่อมสวิตช์ หากมีการเพิ่มความถี่ในการสับสวิตช์มากขึ้น ค่าความสูญเสียของกำลังงานที่สวิตช์จะเพิ่มขึ้นด้วย การที่ความถี่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยลดขนาดและน้ำหนักของหม้อแปลง, ตัวกรองสัญญาณ และอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งจะมีผลทำให้ขนาดและน้ำหนักของอินเวอร์เตอร์ลดลงตามไปด้วย ซึ่งในวงจรรีโซแนนท์มุมต่างเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกระแสและแรงดันจะมีค่าเท่ากับศูนย์จึงเป็นผลทำให้กำลังการสูญเสียที่สวิตช์เป็นศูนย์ไปด้วย เรียกว่า “Soft Switching”



รูปที่ 3.2 รูปวงจรและรูปคลื่นกระแสกับแรงดัน

จากรูปที่ 3.2 กำหนดทิศทางในการไหลของกระแสตามรูปวงจรเป็นบวก

ที่ $t_0 < t < t_1$ เป็นลบ S_1 กับ S_4 ON S_2 กับ S_3 OFF

กระแสไหลกลับทิศจากรูปวงจร เนื่องจาก มอสเฟต เป็นอุปกรณ์ที่ให้กระแสไหลได้ทางเดียว ดังนั้นกระแสที่เป็นลบนี้จะไม่สามารถไหลผ่านมอสเฟตได้ แต่จะไหลผ่านไดโอด D_1 และ D_4 แทน (D_1 และ D_4 ฟอร์เวิร์ดไบแอส) ทำให้กระแสในช่วง $t_0 - t_1$ ไหลผ่านไดโอด D_1 กับ D_4

ที่ $t_1 < t < t_2$ เป็นบวก S_1 กับ S_4 ON, S_2 กับ S_3 OFF

กระแสไหลไปตามทิศทางกระแสดังรูป ก็จะผ่านมอสเฟต S_1 กับ S_4 ทำให้กระแสไหลตามรูป

ที่ $t_2 < t < t_3$ เป็นบวก S_1 กับ S_4 OFF, S_2 กับ S_3 ON

กระแสไหลไปตามทิศทางกระแสดังรูป แต่จะไม่ผ่าน S_1 และ S_4 มอสเฟตทั้งสองตัวนี้จะออฟ แต่ S_2 กับ S_3 จะ ON และกระแสไม่สามารถไหลผ่านมอสเฟตได้ทั้งสองทาง จึงไหลผ่าน D_2 กับ D_3 แทน

ที่ $t_3 < t < t_4$ I เป็น ลบ S_1 กับ S_4 OFF, S_2 กับ S_3 ON

กระแสไหลกลับทิศจากรูปวงจร จะผ่านมอสเฟต S_2 กับ S_3 เพราะมันจะ ON อยู่ จากการทำงานของทั้ง 4 ช่วงของ 1 รอบ (cycle) เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการ เปิดและปิดสวิตช์ S_1, S_2, S_3, S_4 นั้น จะทำให้เกิดค่าความสูญเสียขณะเปิดและปิดของสวิตช์ จากรูปสัญญาณในขณะที่ S_1 , S_4 ทำงาน แรงดันตกคร่อมสวิตช์เท่ากับ V_d (แรงดันตกคร่อมไดโอด) ทำให้ลดความสูญเสียในส่วนของการ ON สวิตช์ได้ แต่ในส่วนของการ OFF S_1, S_4 นั้น แรงดันจะเท่ากับแหล่งจ่ายไฟ และ กระแสจะเท่ากับกระแส I ที่ไหลผ่าน จากการ OFF ของ S_1 กับ S4 ทำให้เกิดการสูญเสีย ในการ OFF และการ ON ของ S_2, S_3 ครั้งต่อไปก็จะเป็นเหมือนกับ S_1 และ S_4 คือเมื่อ ON จะมีค่าการสูญเสียน้อยมาก แต่ถ้า OFF และมีค่าความสูญเสียของการOFF มาก จากที่กล่าวมานี้เป็นการรีโซแนนท์ที่ $f_S > f_O$ ทำให้กระแส ล้าหลังแรงดันออกไปทำให้เกิดการสูญเสียที่ การ OFF ของสวิตช์ ถ้าไม่ต้องการให้เกิดการสูญเสียที่สวิตช์ก็ควรให้ $f_S = f_O$ เพราะจะทำให้กระแสและแรงดันที่ออกมาจากอินเวอร์เตอร์นั้นอินเฟสกัน ทำให้ไม่เกิดการสูญเสียที่สวิตช์เลย

กำลังสูญเสียในรูปความร้อนของไดโอด

ไดโอดเป็นอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งของสวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายที่ไม่อาจมองข้ามการเกิดกำลังงานสูญเสียในรูปของความร้อนไปได้ เนื่องจากต้องทำงานที่ความถี่สูงกำลังสูญเสียในไดโอดจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสและกำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะ ขณะที่นำกระแสจะมีแรงดันตกคร่อมที่รอยต่อขึ้น ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะนำกระแส ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวมัน รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างค่าของแรงดันตกคร่อมไดโอดต่อค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวมันโดยไดโอดในช่วงนี้จะมีกำลังงานสูญเสียเท่ากับ

$$P_D = V_f I_f$$

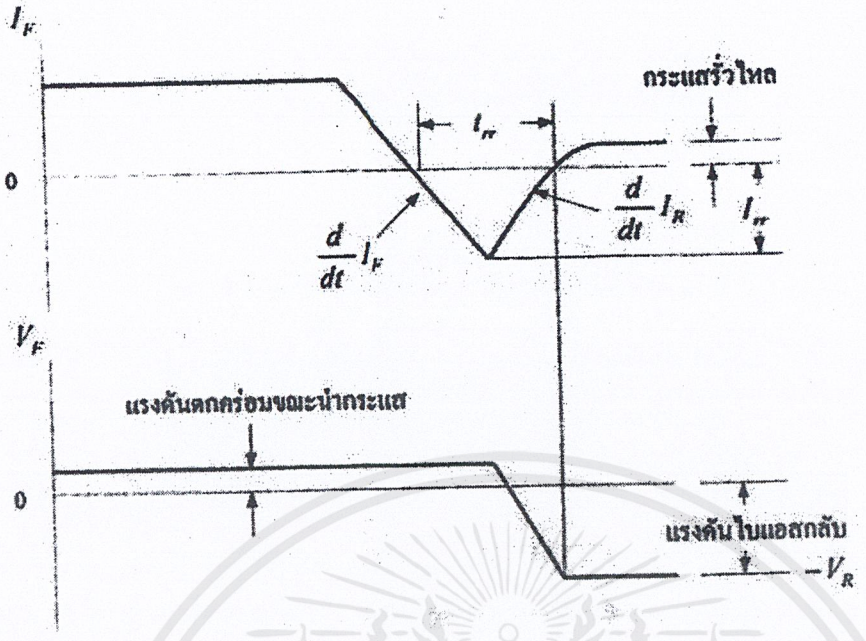
เมื่อ P_D = ค่ากำลังในการสูญเสียในรูปความร้อนของไดโอดขณะนำกระแส

V_F = ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะนำกระแส

I_f = ค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอด

ไดโอดจะเกิดกำลังงานสูญเสียได้มากที่สุดขณะเปลี่ยนสถานะ เมื่อเริ่มหยุดนำกระแส ซึ่งมีผลมาจากการเกิดประจุสะสมขึ้นในไดโอดนำกระแส โดยที่ไดโอดขณะตอบสนองต่อแรงดันไบแอสกลับและกันไม่ให้เกิดกระแสไหลย้อนทางได้ ไดโอดจะต้องลดประจุสะสมเหล่านี้ออกไปเสียก่อน ประจุสะสมจะมีผลทำให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับผ่านตัวไดโอด ในขณะที่มีแรงดันไบแอสกลับตกคร่อมตัวมันอยู่ และไดโอดต้องใช้เวลาส่วนหนึ่ง เพื่อลดประจุสะสมออกไป จึงจะสามารถหยุดกระแสไบแอสกลับได้ เวลาที่ใช้ในการลดประจุนี้จะเรียกว่า ช่วงเวลาคืนตัว (Reverse recovery time) หรือ t_{rr} ลักษณะตอบสนองต่อแรงดันและกระแสของไดโอดจะเป็นดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 รูปแสดงลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะเริ่มหยุดนำกระแส

ช่วงเวลาคืนตัว t_{rr} จะขึ้นอยู่กับค่าประจุสะสม ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการที่มีกระแสไหลผ่านไดโอดขณะถูกไบแอส รวมทั้งการใช้งานไดโอดในลักษณะต่างๆกัน จะทำให้ค่า t_{rr} ที่แตกต่างกันออกไปด้วย จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา t_{rr} นี้ไดโอดจะมีความถี่สูงขึ้น ลักษณะที่สำคัญประการหนึ่งของไดโอดก็คือ ความนุ่มนวลในการคืนตัว (Softness recovery) ที่ความถี่สูงๆ ลักษณะการคืนตัวของไดโอดจะมีผลต่อการเกิดสัญญาณรบกวน RFI ของสวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย ค่าความนุ่มนวลในการคืนตัวของไดโอดนั้น จะกำหนดโดยค่าความชันที่ขอบขาขึ้นของกระแสในช่วงเวลาคืนตัว ไดโอดที่มีค่าความชัน di_f / dt น้อยๆจะมีลักษณะการคืนตัวอย่างนุ่มนวล และให้ค่าสัญญาณรบกวน RFI เกิดขึ้นต่ำๆ แต่จะมีช่วงเวลาคืนตัว t_{rr} มากและเกิดกำลังงานสูญเสียได้มาก

วงจรสนับเบอร์

วงจรสนับเบอร์เป็นวงจรที่มีความสำคัญ ในการสวิตช์ชิ่งที่ความถี่สูง เนื่องจากการสวิตช์ชิ่งความถี่สูงในช่วงแรงดันสูงจะเกิด ค่ายอดของแรงดันหรือ ค่ายอดของกระแส (Spike) ทำให้อัตราการเพิ่มของแรงดันต่อเวลา (dv/dt) และอัตราเพิ่มกระแสต่อเวลา (di/dt) เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวมอสเฟตกำลังในวงจร การนำเอาวงจรสนับเบอร์มาใช้นี้ ก็เพื่อที่จะลดค่าของ dv/dt และ di/dt ให้น้อยลงพอที่วงจรและตัวมอสเฟตกำลัง ทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

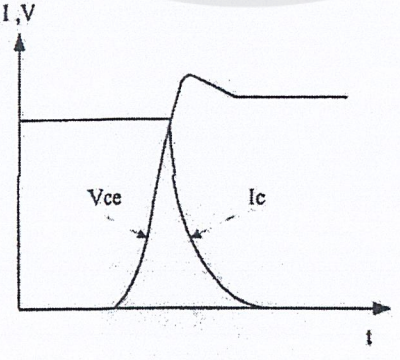
ประโยชน์อีกประการหนึ่งของวงจรสนับเบอร์คือ ใช้สำหรับป้องกันความเสียหายของมอสเฟตกำลังจากพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กในขดลวด โดยเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ชิ่งหยุดการทำงาน (OFF) สนามแม่เหล็กในขดลวดจะยุบตัวทำให้เกิดการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้ากลับทิศขึ้น และแรงดันส่วนนี้จะเข้าไปเสริมกับแหล่งจ่ายไฟ ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งนั้นจะมีค่าเพิ่มสูง ผลก็คืออุปกรณ์สวิตช์ชิ่งนั้นสามารถเสียหายได้

เพราะเหตุนี้เอง เราควรใช้วงจรสนับเบอร์ที่ช่วยป้องกันพลังงานที่สะสมอยู่ในขดลวดไม่ให้มีผลต่ออุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง และสำหรับวงจรสนับเบอร์นี้ ไดโอดที่ใช้จะต้องเป็นไดโอดชนิดฟาสต์รีคัฟเวอรี่ เพราะเมื่อเกิดกระแสหรือแรงดันค่ายอด ไดโอดจะเป็นทางผ่านในการเก็บประจุ และเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ทำงาน (ON) จะทำให้ตัวเก็บประจุทำการคายประจุผ่านความต้านทานออก ดังนั้นความต้านทานจะเป็นตัวกำหนดเวลาในการคายประจุ ซึ่งค่าผลคูณของความต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC – time Constant) ถ้าค่าของ SRC น้อยกว่าเวลาในช่วงเปิดของอุปกรณ์สวิตช์จะทำให้ตัวเก็บประจุไม่มีประจุหลงเหลืออยู่ภายใน ซึ่งจะต่อคร่อมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพื่อช่วยในการกำจัด dv/dt

วงจรสนับเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส

กำลังสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์ชิ่งจะเป็นไปได้ขณะเปลี่ยนการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะหยุดนำกระแส ก่อนที่อุปกรณ์สวิตช์ชิ่งจะหยุดนำกระแสนั้นกระแสจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ ขณะที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสู่ค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุทอย่างรวดเร็ว กำลังสูญเสียในรูปความร้อนช่วงนี้จะเกิดขึ้นสูง

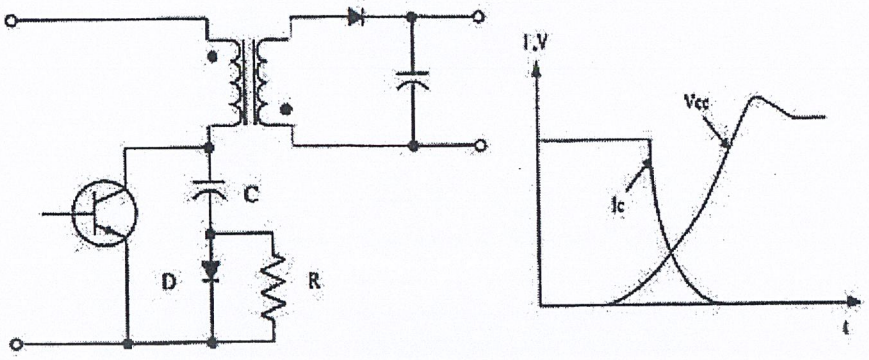
เพื่อลดกำลังสูญเสียในช่วงนี้ อาจจะทำได้โดยการต่อวงจรสนับเบอร์เข้ากับอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งเพื่อควบคุมแรงดันตกคร่อมที่คอลเลคเตอร์ และอิมิตเตอร์ ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าจนกระทั่งกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งลดลงได้ทันกัน ซึ่งจะทำให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ ลักษณะการต่อวงจรสนับเบอร์อาจทำได้ดังในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 รูปแสดงลักษณะการลดลงของกระแสและการกระเพื่อมขึ้นของแรงดันของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งขณะเริ่มหยุดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.5 รูปแสดงการต่อวงจรสนับเบอร์ช่วยหยุดนำกระแส เพื่อหน่วงแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

การทำงานของวงจร RCD สนับเบอร์ช่วงหยุดนำกระแสนั้นจะเป็นลักษณะดังนี้ เมื่ออุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง Q_1 หยุดนำกระแส แรงดันที่ขาคอลเล็คเตอร์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้กระแสบางส่วนไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 และไดโอด D_1 ของวงจรสนับเบอร์ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม C_1 ด้วยแรงดันที่ตกคร่อม C_1 จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ขาคอลเล็คเตอร์ของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ดังนั้นถ้าให้ C_1 มีค่ามากพอ การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขาคอลเล็คเตอร์จะถูกหน่วงออกไปอีกเพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งลดลงมีค่าน้อยลงได้ทันกัน

ขณะที่อุปกรณ์สวิตช์ชิ่งเริ่มนำกระแสอีกครั้ง C_1 จะคายประจุผ่าน R_1 แรงดันตกคร่อม C_1 จะน้อยลงอีกครั้ง และสามารถทำงานได้ในช่วงต่อไป

$$C_1 = \frac{I_{P(PK)} \times t_{OFF}}{2V_{in}}$$

$$R_1 = \frac{t_{ON(\min)}}{2 \times 3C_1}$$

เมื่อ $I_{P(PK)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง

V_{in} คือ ค่าแรงดันอินพุทของคอนเวอร์เตอร์

t_{ON} คือ ช่วงเวลานำกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง

t_{OFF} คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง

การคายประจุของ C_1 ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในตัว R_1 สูง ตัวต้านทาน R_1 จะต้องทานกำลังได้สูง โดยค่า R_1 อาจหาได้จาก

$$P_{D\cdot} = \frac{C_1(2V_i)^2}{2T}$$

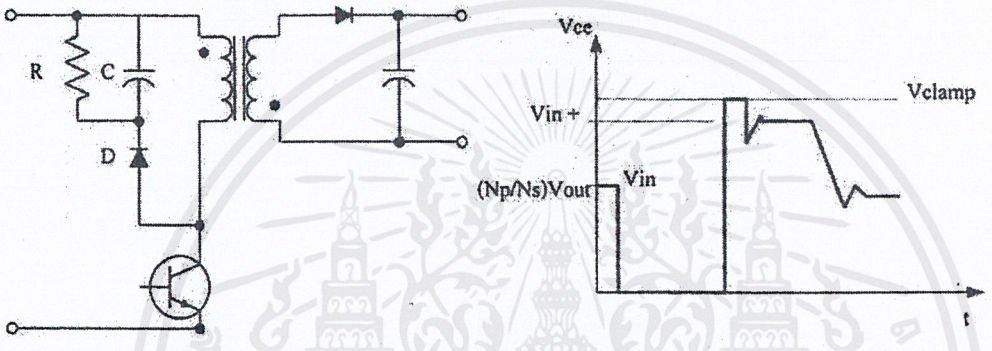
เมื่อ T คือคาบเวลาการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45976

วงจรสนับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน

ปกติการเสียหายของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งขณะทำงาน มักมีสาเหตุจากการทำงานเกินพิกัด แรงดันไฟฟ้าสไปค์ขณะหยุดนำกระแส โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฟลายแบค และฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ มักทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งขณะเริ่มหยุดนำกระแสเกิน มีค่าสูงเกินค่าแรงดันสูงสุดที่มันทนได้และเกิดการพังเสียหายขึ้น วงจรสนับเบอร์ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินจึงมีหน้าที่ป้องกันแรงดันไฟฟ้าสไปค์ที่เกิดขึ้น การต่อวงจร RCD สนับเบอร์เพื่อป้องกันแรงดันเกินทำได้ดังรูป 3.6



รูปที่ 3.6 รูปแสดงการต่อสนับเบอร์ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินเพื่อจำกัดค่ากระแสสูงสุดที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งขณะเริ่มหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

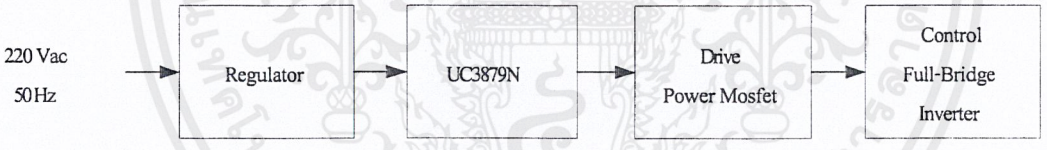
บทที่ 4
ส่วนประกอบของวงจร

หลักการของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆคือ

1. วงจรควบคุม
2. วงจรกำลัง

ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์

ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณและจะส่งสัญญาณที่สร้างนั้นไปควบคุมการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟตในวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ สัญญาณพัลซ์ที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะมีขนาดประมาณ 12 โวลต์ จะส่งไปที่ขาเกทของเพาเวอร์มอสเฟต และจุดกราวด์จะต่อกับขาซอร์ทของเพาเวอร์มอสเฟต สัญญาณควบคุมจะมีอยู่ 4 สัญญาณ เพื่อควบคุมการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟตแต่ละตัว การควบคุมแบบนี้จะทำให้สามารถควบคุมความถี่ของสัญญาณที่ส่งไปยังฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้อีกด้วย



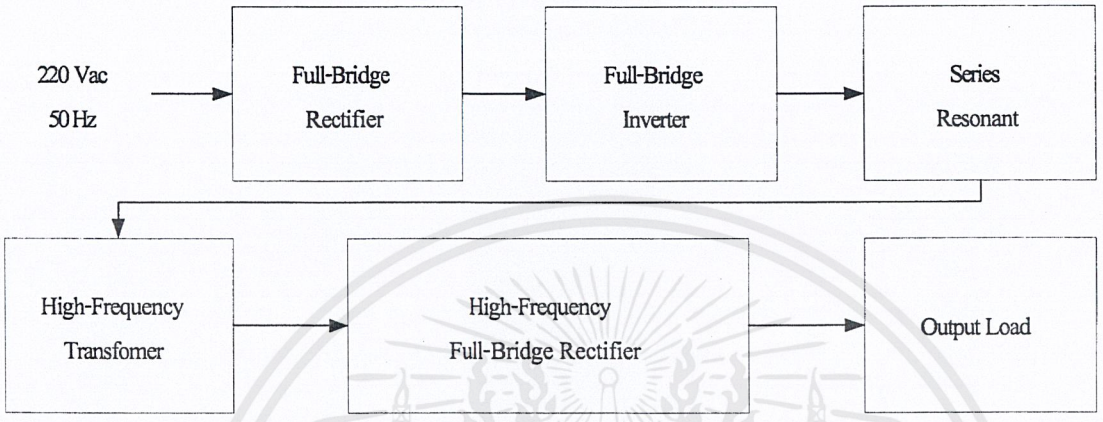
รูปที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุมการจุดชนวนของมอสเฟต

วงจรกำลัง

วงจรกำลังเป็นวงจรที่มีกระแสและแรงดันสูงทำหน้าที่ถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าจากด้าน อินพุท $220V_{AC}$ 50Hz ไปยังโหลด โดยจะใช้วงจร ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ แบบซีรี่รีโซแนนท์ หลักการทำงานพื้นฐานคือ รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V_{AC} 50 Hz แปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วย วงจรฟูลบริดจ์เร็คติไฟร์ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้ จ่ายให้กับอินพุทฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เนื่องจาก ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่ความถี่สูง จะใช้เพาเวอร์มอสเฟตเพราะสามารถทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่ความถี่สูงได้ดี เมื่อผ่านวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แล้วสัญญาณที่ได้ด้านเอาท์พุทนั้นจะเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม ส่วนสัญญาณกระแสจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่เพาเวอร์มอสเฟตทำงานกับความถี่รีโซแนนท์ ถ้าความถี่ทั้งสองเท่ากันสัญญาณของกระแสจะออกมาเป็นรูปซายน์เวฟ หลังจากนั้นนำแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า มาผ่านวงจรรีโซแนนท์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วยตัวคาปาซิเตอร์และตัวอินดักเตอร์ไปยังหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อแปลงระดับแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้ได้ตามที่ต้องการ จากนั้นส่งต่อไปยังชุดเร็คติไฟร์แบบฟูลเวฟเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อไปยังตัวโหลด



รูปที่ 4.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรกำลัง

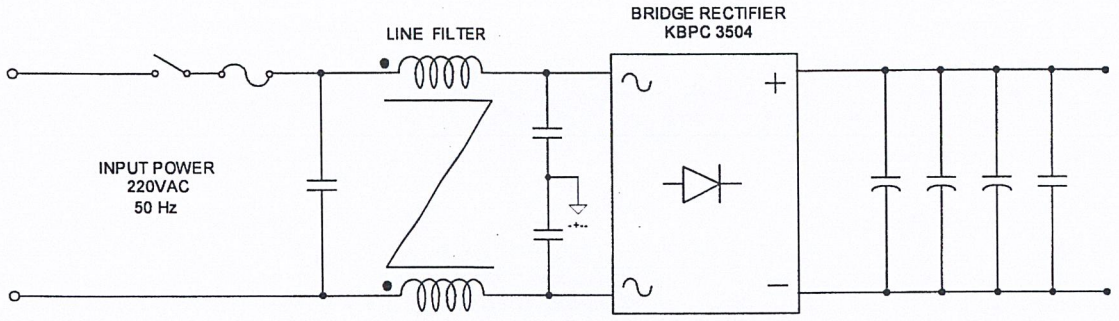
จากรูปของวงจรประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 6 ส่วนคือ

1. วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier)
2. วงจรอินเวอร์เตอร์ แบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge Inverter)
3. ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ (Control Inverter)
4. ชุดรีโซแนนท์ (Resonant Tank)
5. หม้อแปลงความถี่สูง (High Frequency Transformer)
6. วงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์ (High Frequency Full-Bridge Rectifier)

1. วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier)

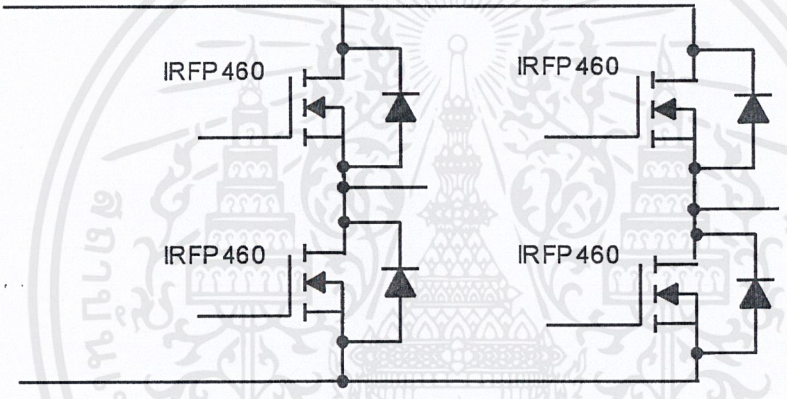
วงจรเรียงกระแส (Rectifier) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220โวลต์ 50เฮิรตซ์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 310โวลต์ โดยใช้ไดโอดเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier) ส่วนวงจรกรองแรงดันทางด้านอินพุทจะใช้ตัวเก็บประจุกรองกระแสไฟตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดัน

2. วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)



รูปที่ 4.4 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

วงจร DC Power Supply ในโครงงานนี้ ใช้เพาเวอร์มอสเฟตเบอร์ IRFP460 เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ที่ความถี่สูง เพราะสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดี ทนทานกระแสไฟฟ้าได้สูงในราคาที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทนแรงดันไฟฟ้าระหว่างขา drain และขา source ได้ 20 แอมป์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หรือ 13 แอมป์ที่ 100 องศาเซลเซียส ในโครงงานนี้เราใช้การขนานมอสเฟตเพื่อช่วยในการจ่ายกำลังงานได้สูงขึ้นตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ (Inverter Control)

ส่วนประกอบของชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์มีอยู่ 3 ส่วนคือ

3.1 วงจรเรกกูเรเตอร์ (Regulator Circuit)

วงจรเรกกูเรเตอร์จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรควบคุมทั้งหมดเป็นวงจรอย่างง่ายๆ คือใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ลงมาเหลือ 15 V จากนั้นนำแรงดัน 15 V ไปเร็กติฟายแบบ ฟูลเวฟเพื่อแปลงเป็นแรงดันกระแสตรง เพื่อควบคุมแรงดันกระแสตรงให้คงที่ จะใช้ ไอซีเรกกูเลต เบอร์ 7812 เป็นตัวรักษาระดับแรงดัน ก่อนที่จะจ่ายให้กับ UC3879N ทางด้าน อินพุท และ เอาท์พุท ของไอซี เรกกูเลต จะต่อกับคาปาซิเตอร์ไว้เพื่อกรองสัญญาณให้เรียบ

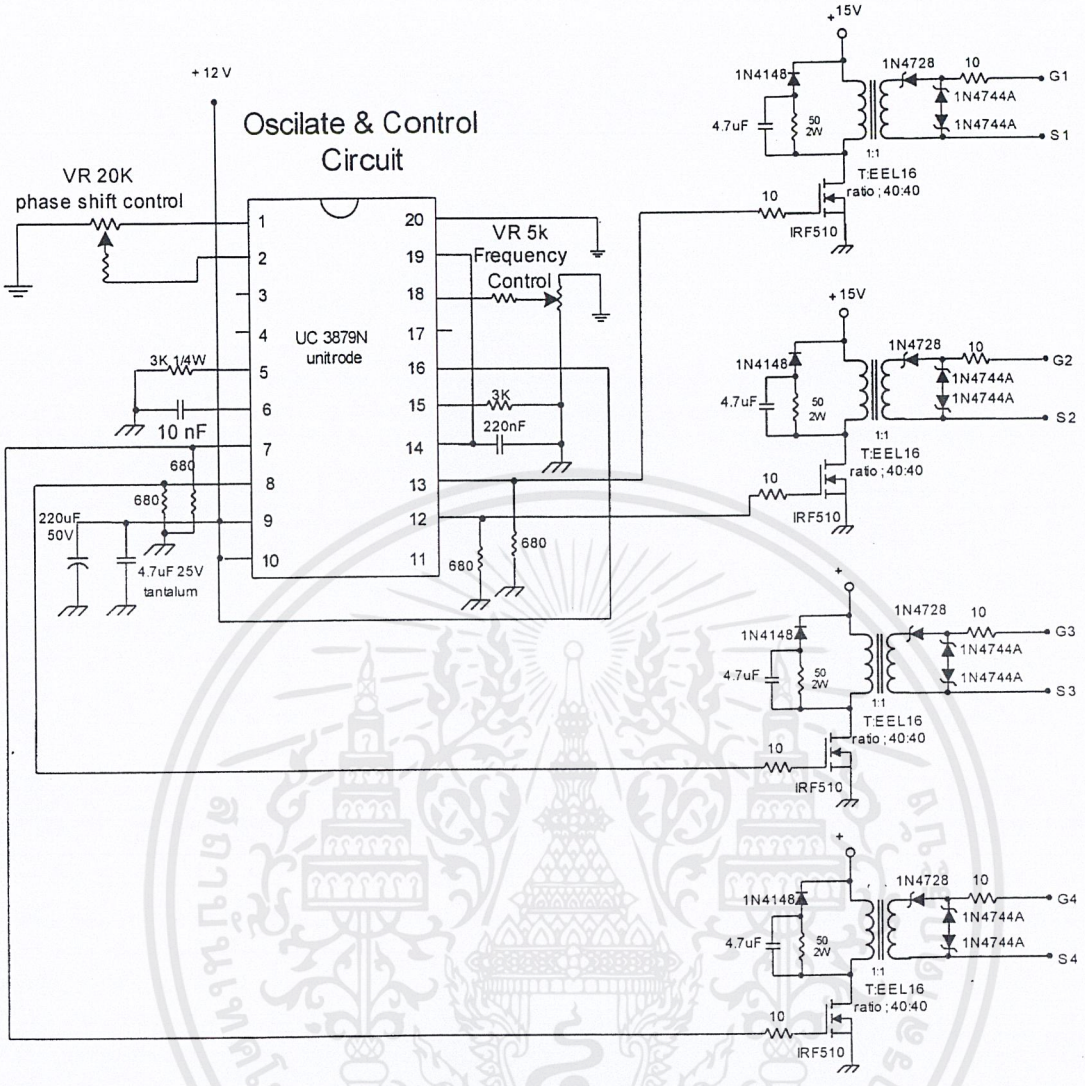
3.2 วงจรควบคุม (Control Circuit)

วงจรควบคุมจะทำหน้าที่ในการกำเนิดสัญญาณพัลซ์รูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) ซึ่งสัญญาณนี้ จะนำใช้ในการขับขาเกตของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ไอซีเบอร์ UC3879N เป็นไอซี 20 ขา ในการสร้างสัญญาณ ซึ่งไอซีเบอร์นี้สามารถควบคุมได้ทั้งความถี่และเฟสชิฟท์ การควบคุมความถี่สามารถปรับได้โดยปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้ที่ขา 18 และการปรับเฟสชิฟท์ สามารถทำได้โดยการปรับค่า ความต้านทานปรับค่าได้ที่ ขา12 โดยปรับได้ตั้งแต่มุม 0-180 องศา และมีขาที่ 6 เป็นขาสำหรับ soft start ของวงจร

3.3 วงจรขับ (Drive Circuit)

วงจรชุดควบคุมและวงจรชุดขับสามารถแสดงได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์

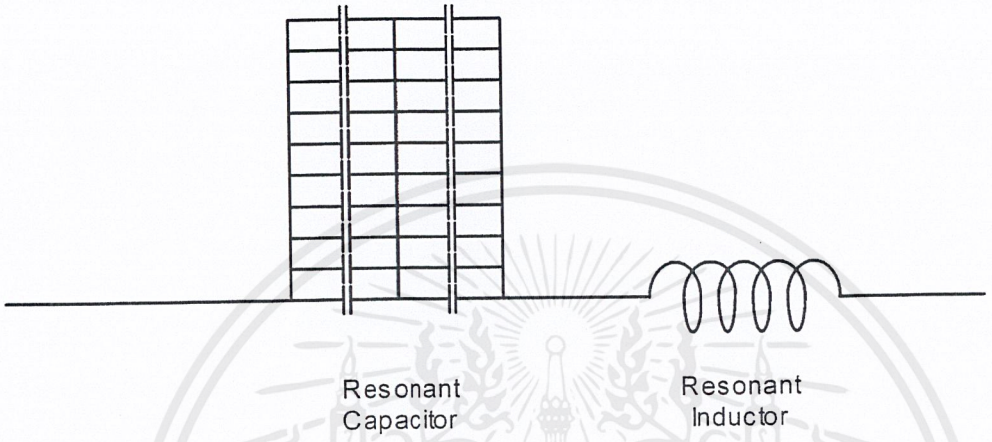
สัญญาณพัลซ์ที่ได้จากชุดควบคุมจะนำมาต่อเข้ากับวงจรชุดขับ โดยวงจรชุดขับนี้เราจะใช้หม้อแปลงแยกกราวน์ของสัญญาณทั้งที่สัญญาณจากชุดควบคุมให้เป็นอิสระต่อกัน และมีชุดสนับเบอร์เพื่อป้องกันแรงดันสไปค์ของแรงดัน

4. ชุดรีโซแนนท์ (Resonant Tank)

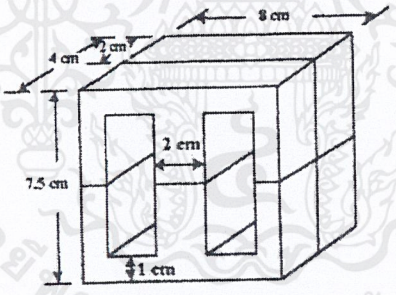
ชุดรีโซแนนท์มีหน้าที่ทำให้เกิดสัญญาณกระแสไฟฟ้าเป็นรูปไซน์เวฟที่ความถี่ใช้งาน ถ้าต้องการให้สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุด จะต้องทำให้ความถี่สวิตช์มีค่ามากกว่าความถี่รีโซแนนท์เล็กน้อย จะทำให้มีค่าความสูญเสียที่สวิตช์ (เพาเวอร์มอสเฟต) มีค่าน้อยที่สุด ชุดรีโซแนนท์ที่ใช้จะใช้คาปาซิเตอร์และอินดักเตอร์อนุกรมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนที่นำมาใช้ทำอินดักเตอร์จะใช้แกนเฟอร์ไรต์ เพราะมีจุดอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็กสูง และเกิดการสูญเสียต่ำที่ความถี่สูง สามารถเก็บพลังงานได้มากกว่าแกนเหล็กธรรมดา ถ้านำมาใช้ที่ความถี่สูงขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้ทำอินดักเตอร์ความถี่สูงนี้ จะใช้แกนเฟอร์ไรต์ขนาด E-80 สองคู่ประกบกัน



รูปที่ 4.6 ชุดวงจรรีโซแนนท์

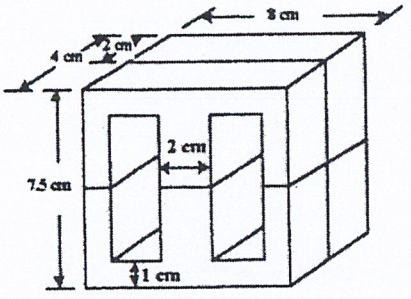


รูปที่ 4.7 ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้ทำอินดักเตอร์

5. หม้อแปลงความถี่สูง (High Frequency Transformer)

หม้อแปลงความถี่สูงจะใช้ "แกนเฟอร์ไรต์" เพราะมีจุดอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็กสูงและเกิดการสูญเสียต่ำที่ความถี่สูง ทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานจากชุดอินเวอร์เตอร์ไปยังโหลด ซึ่งในการเลือกต้องมีการกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงขณะทำงาน ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้ทำหม้อแปลงความถี่สูงนี้ จะใช้แกนเฟอร์ไรต์ขนาด E-80 สองคู่ประกบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

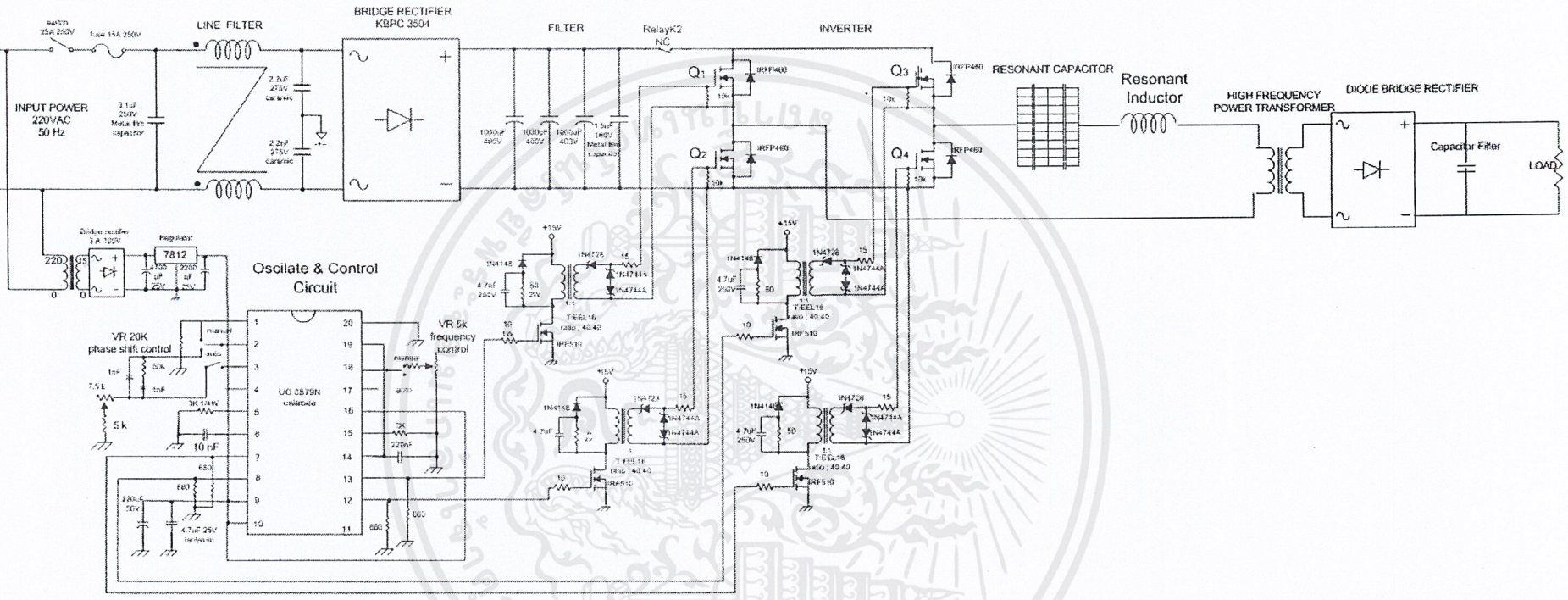


รูปที่ 4.8 ขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้ทำหม้อแปลงความถี่สูง

6. วงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์ที่ความถี่สูง (High Frequency Full-Bridge Rectifier)

วงจรเร็คติไฟร์ด้านเอาท์พุทจะใช้ไดโอดแบบฟาสต์รีคัฟเวอรี่ เพราะสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดี วงจรจะเป็นแบบฟูลบริดจ์เร็คติฟายเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 วงจรรวมทั้งหมดของ DC Power Supply

บทที่ 5

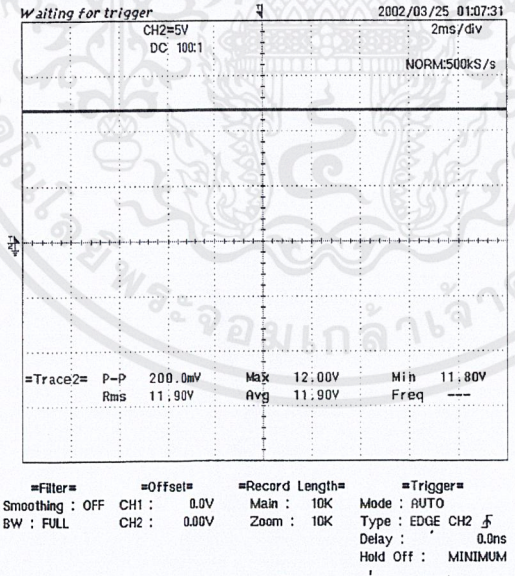
การทดลองและผลการทดลอง

จากทฤษฎีและการนำเสนอในข้างต้น ได้มีการทดลองวัดค่าสัญญาณที่จุดต่าง ๆในแต่ละวงจรส่วนประกอบของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและมีการทดสอบเครื่องจ่ายนี้โดยการรับภาระโหลดที่ค่าต่างๆ โดยจะเป็นดังต่อไปนี้

1) Storage Scope YOGOKAWA 2 เครื่อง
2) Digital Multi meter 2 ตัว
3) Probe 1:10 2 เส้น
4) Probe 1:100 1 เส้น
5) Current Probe 1 ตัว

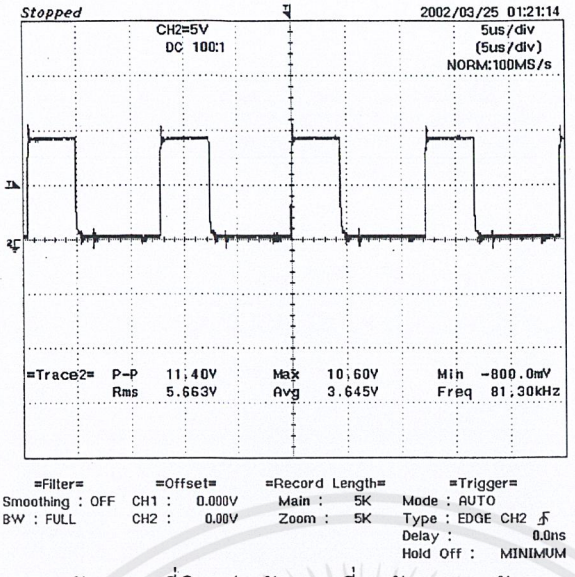
การวัดค่าที่จุดต่างๆของของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เป็นการวัดสัญญาณทุกจุดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ที่ได้ทำการทดลองสร้าง โดยมีขนาดพิกัดของเครื่อง 1.5 กิโลวัตต์ 42 โวลต์ กระแส ประมาณ 30 แอมแปร์ โดยมีรูปสัญญาณต่างๆ ดังนี้

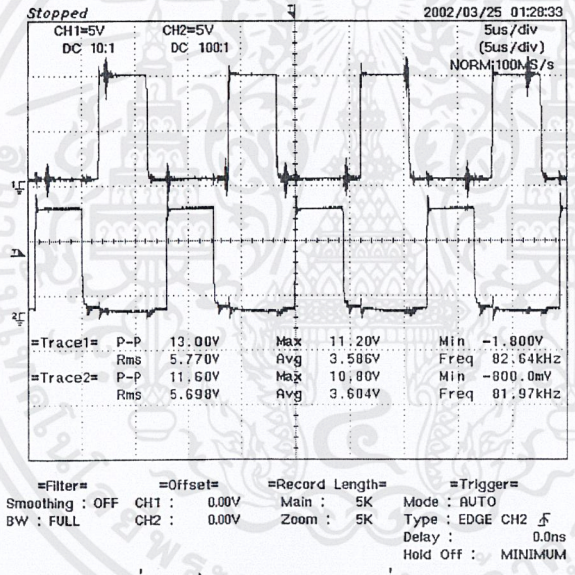


รูปที่ 5.1 รูปแสดงสัญญาณแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



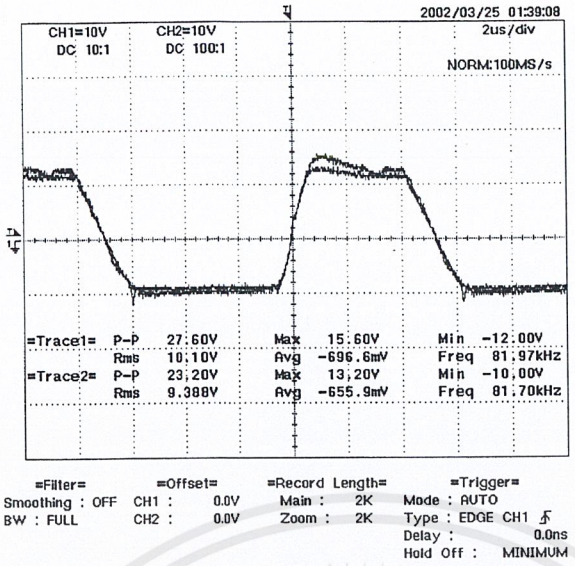
ก.) สัญญาณที่อินเฟสกัน (ขาที่ 7 กับ 12, 8 กับ 13)



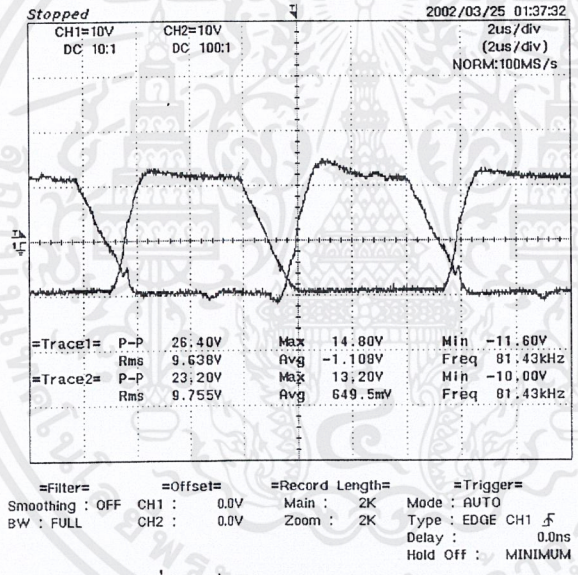
ข.) สัญญาณที่เอาท์ออฟเฟสกัน (ขาที่ 7 กับ 13, 8 กับ 12)

รูปที่ 5.2 รูปสัญญาณที่ออกจากขาเอาท์พุทของไอซีเบอร์ UC3879

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



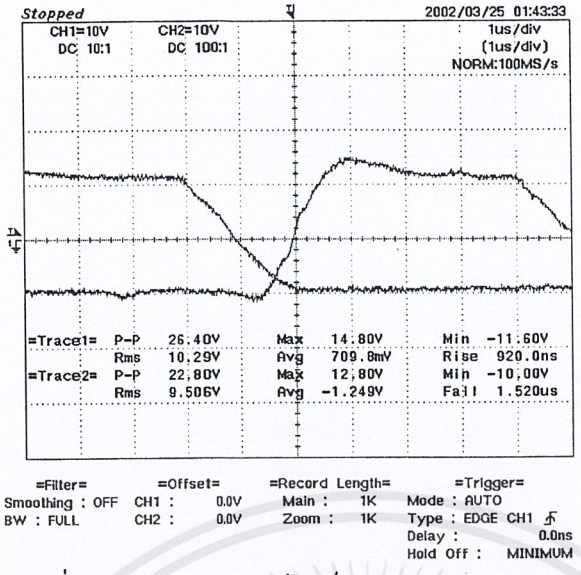
ก.) สัญญาณที่อินเฟสกัน (Q_1 กับ Q_4, Q_2 กับ Q_3)



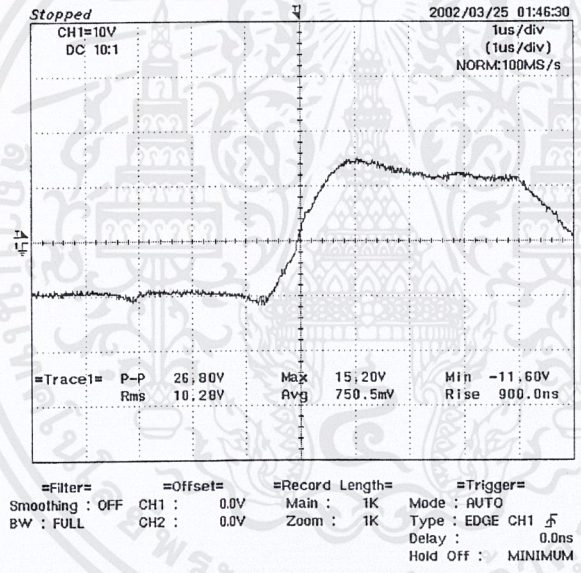
ข.) สัญญาณที่เอาท์ออฟเฟสกัน(Q_1 กับ Q_3, Q_2 กับ Q_4)

รูปที่ 5.3 รูปสัญญาณที่วัดที่ขาเกทและซอร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

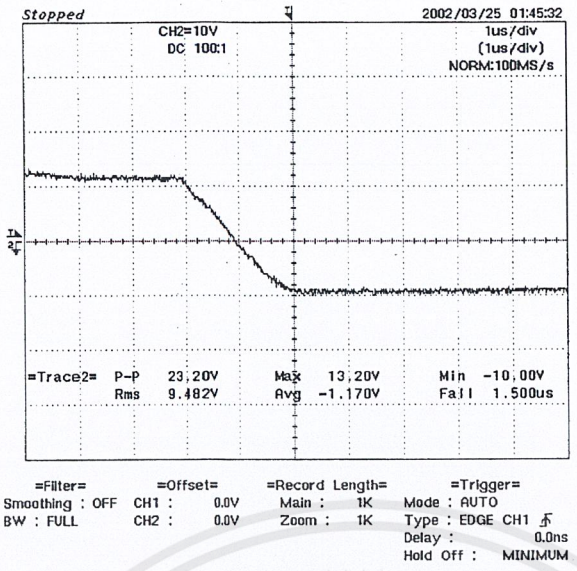


รูปที่ 5.4 รูปสัญญาณเดดไทม์ของสัญญาณขับขาเกท



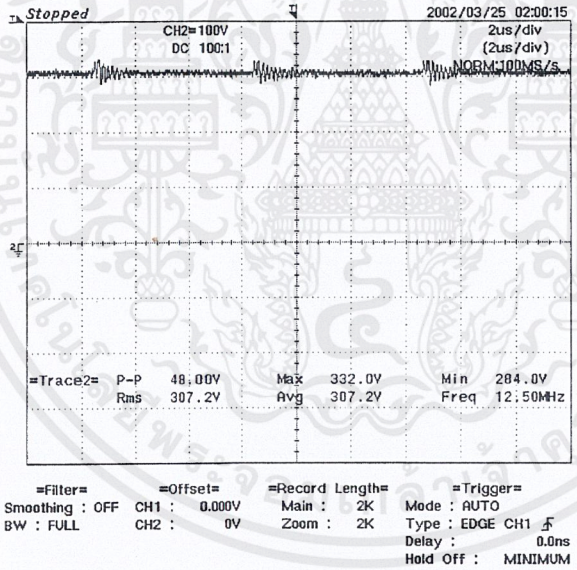
ก.) สัญญาณช่วงออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



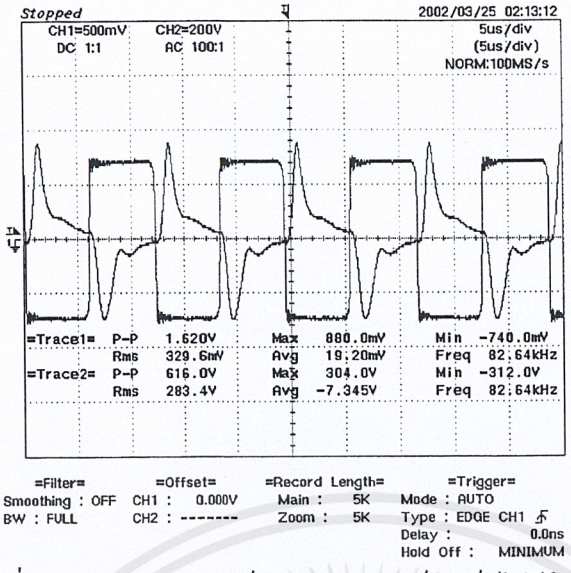
ข.) สัญญาณช่วงออฟ

รูปที่ 5.5 รูปสัญญาณที่วัดที่ขาเกทและขาซอร์ทที่มอสเฟทขนานกัน

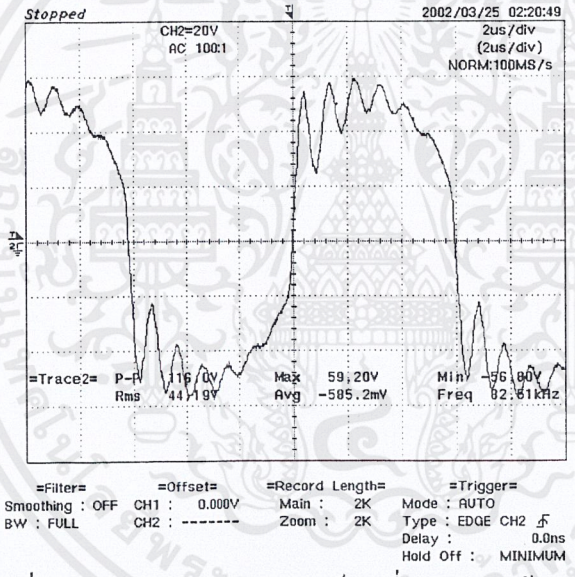


รูปที่ 5.6 รูปสัญญาณอินพุทของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

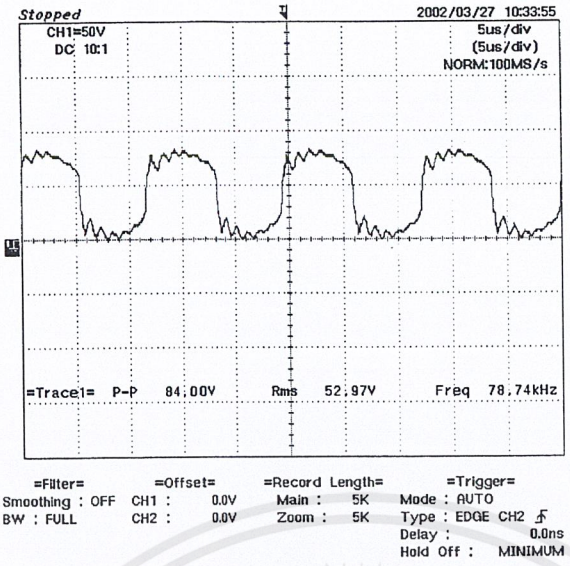


รูปที่ 5.7 รูปสัญญาณเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ (ไม่มีโหลด)

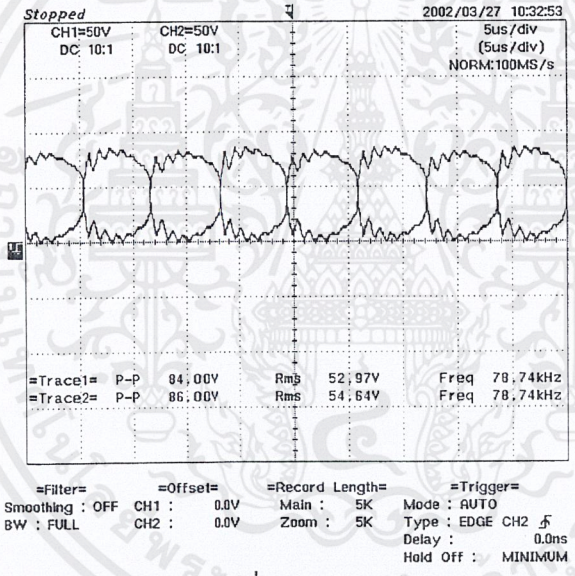


รูปที่ 5.8 รูปสัญญาณแรงดันเอาท์พุทที่ออกจากหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



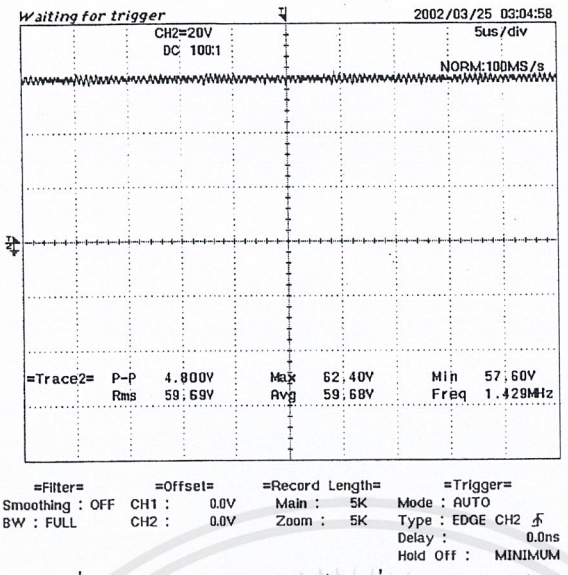
ก.) ไดโอดแต่ละตัว



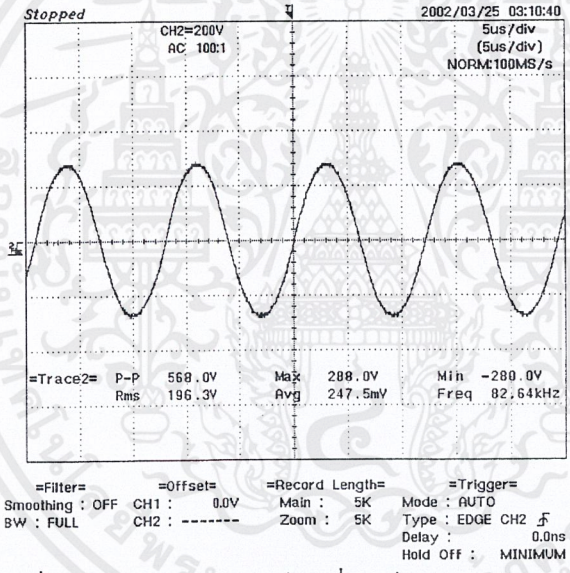
ข.) ไดโอดที่ทำงานไม่พร้อมกัน

รูปที่ 5.9 รูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 รูปสัญญาณเอาท์พุทที่ออกจากไดโอด



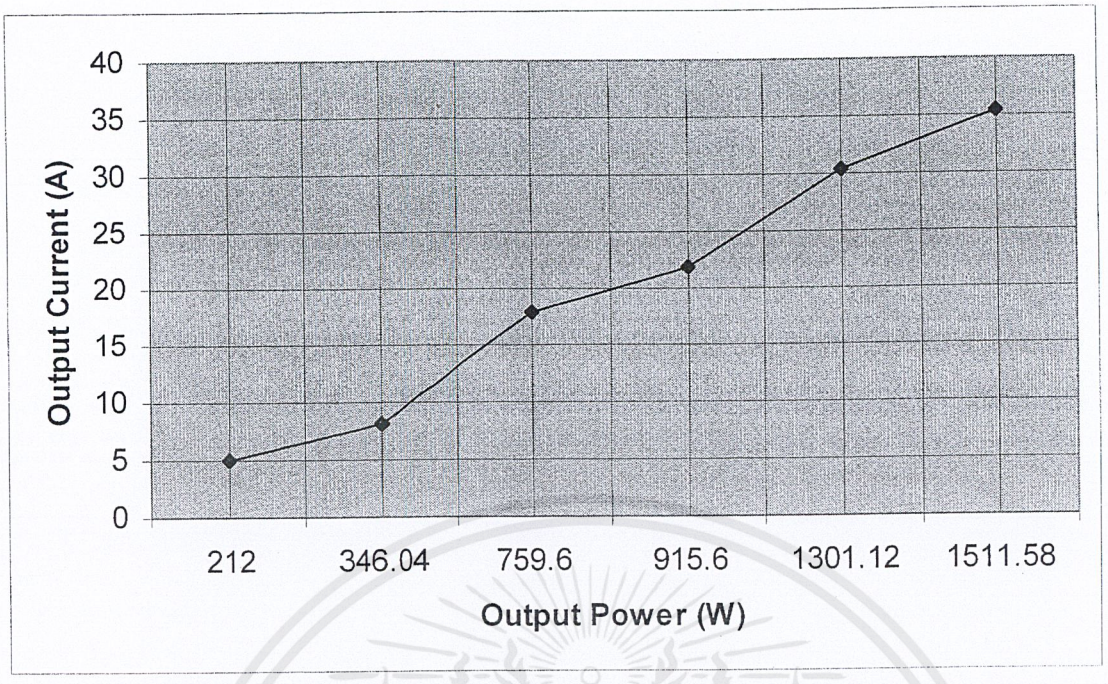
รูปที่ 5.11 รูปสัญญาณเอาท์พุทที่ตัวเก็บประจุรีโซแนนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

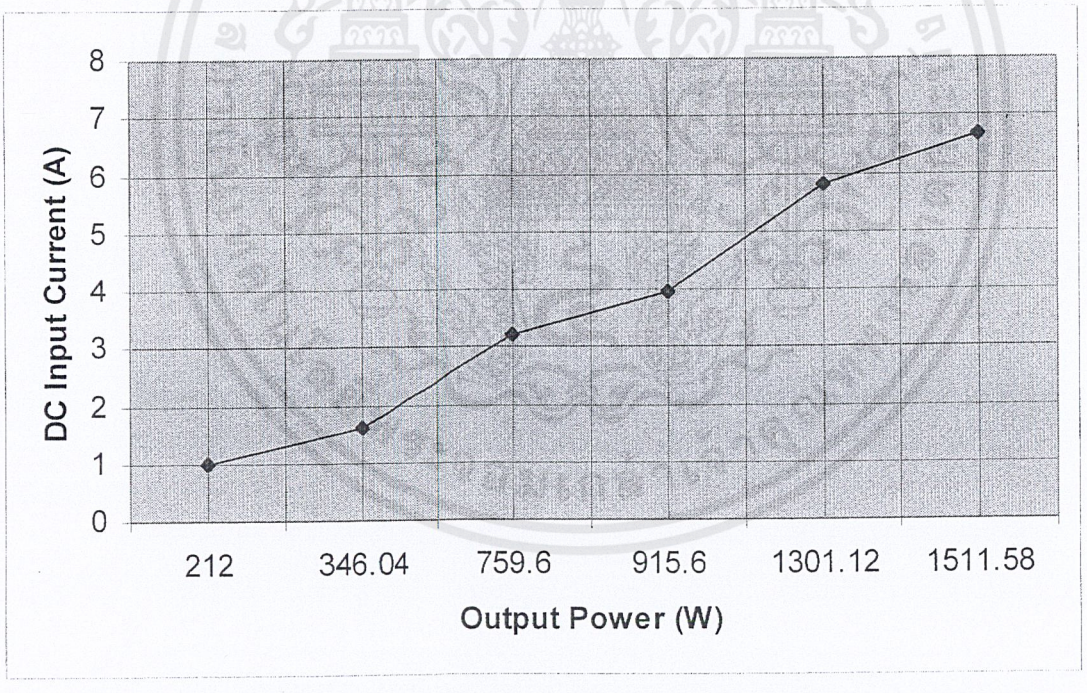
การทดสอบเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ภาระโหลดต่างๆ

ตารางที่ 1 ผลการทดลองเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ภาระโหลดต่างๆ

ครั้งที่	เปอร์เซ็นต์ภาระ	Input (วัดที่ชุด Rectifier)		P_{IN} (W)	Output		P_{OUT} (W)	Efficiency (%)
		V_{DC} (V)	I_{DC} (A)		V_{DC} (V)	I_{DC} (A)		
1	14.34	307.3	1	307.3	42.4	5	212	68.99
2	26.67	304.5	1.6	487.2	42.2	8.2	346.04	71.03
3	39.2	290	3.2	928	42.2	18	759.6	81.85
4	47	285.2	3.95	126.54	42	21.8	915.6	81.28
5	65.33	274.6	5.8	1592.68	42.8	30.4	1301.12	81.69
6	100	275	6.82	1875.5	41.77	37	1545.49	82.404

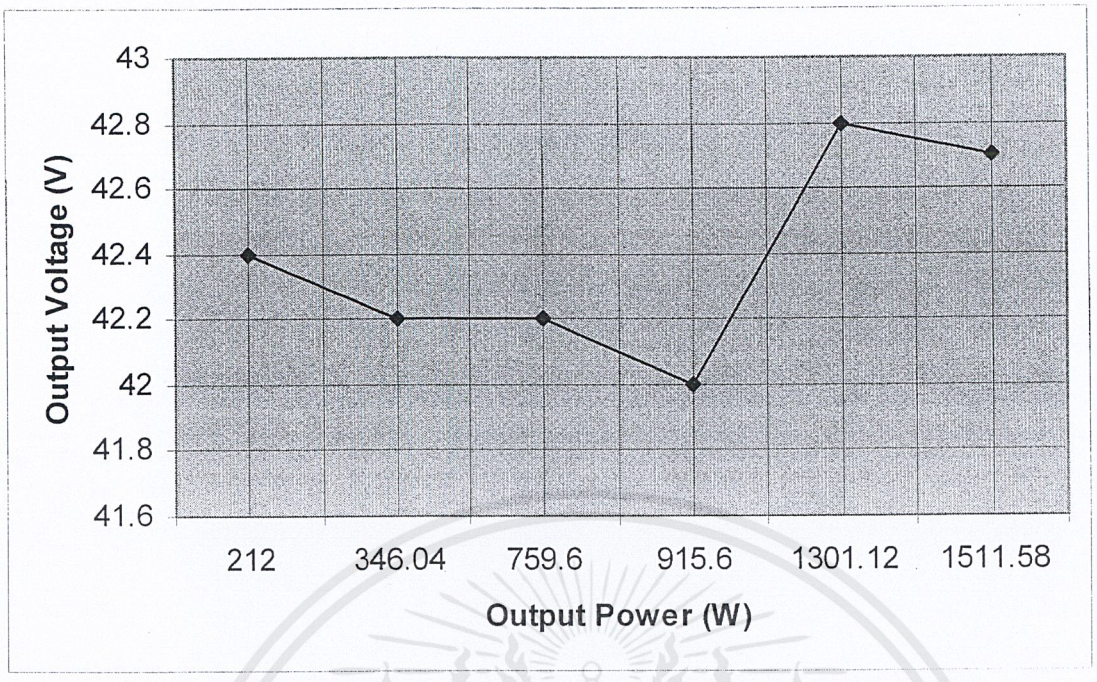


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Output Current และ Output Power

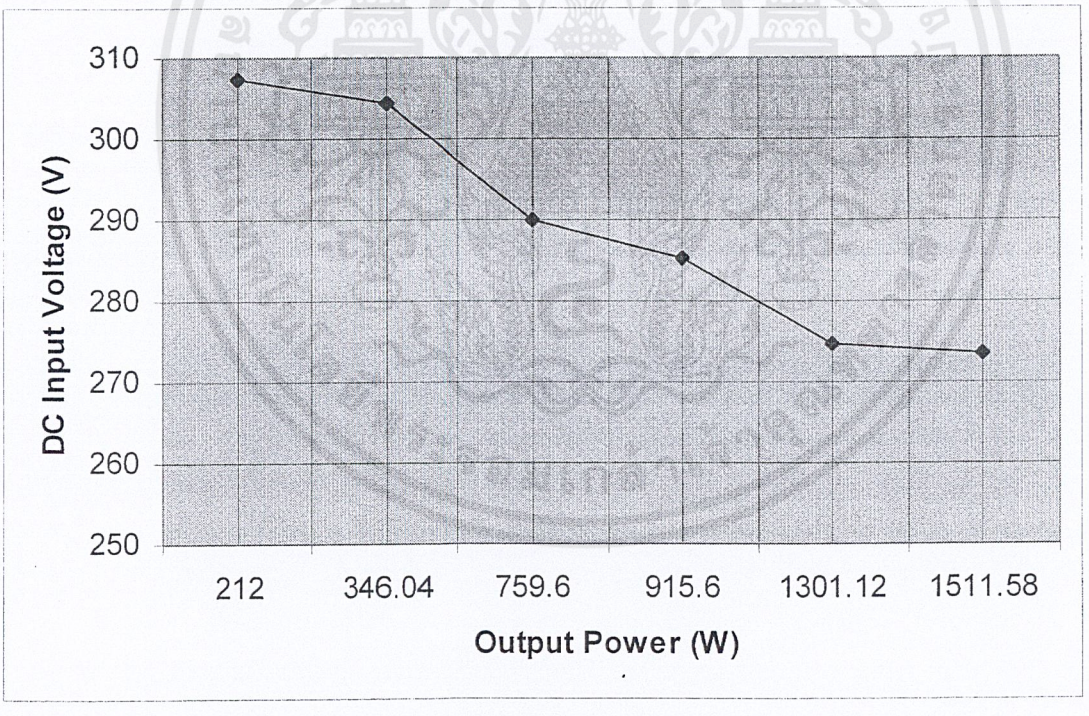


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DC Input Current และ Output Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

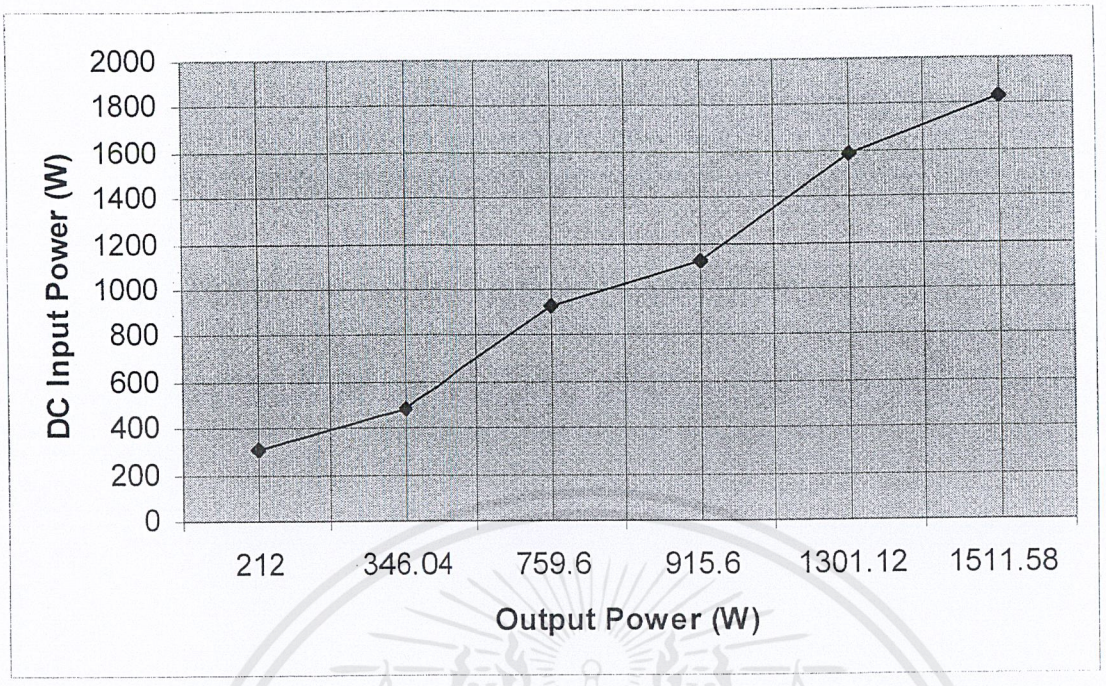


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage และ Output Power

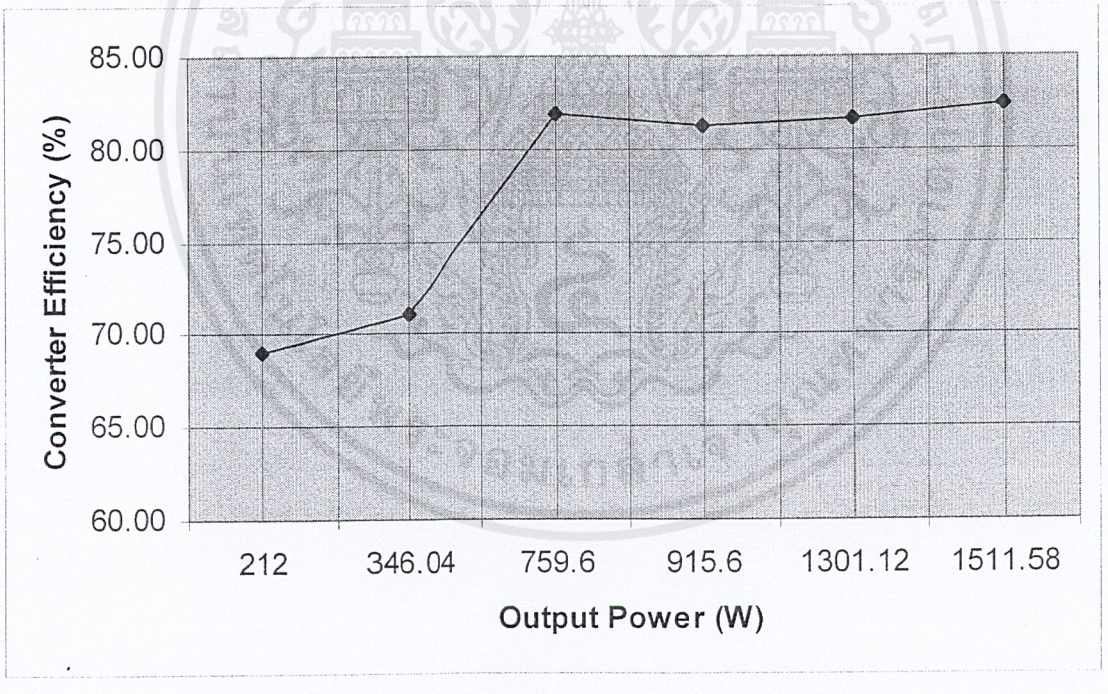


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DC Input Voltage และ Output Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



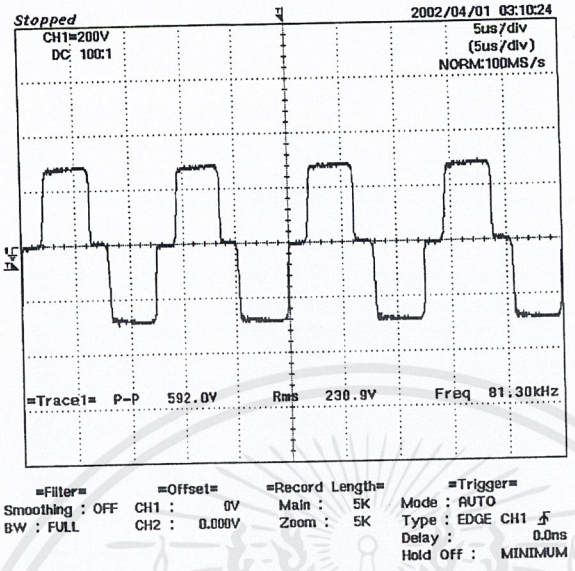
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DC Input Power และ Output Power



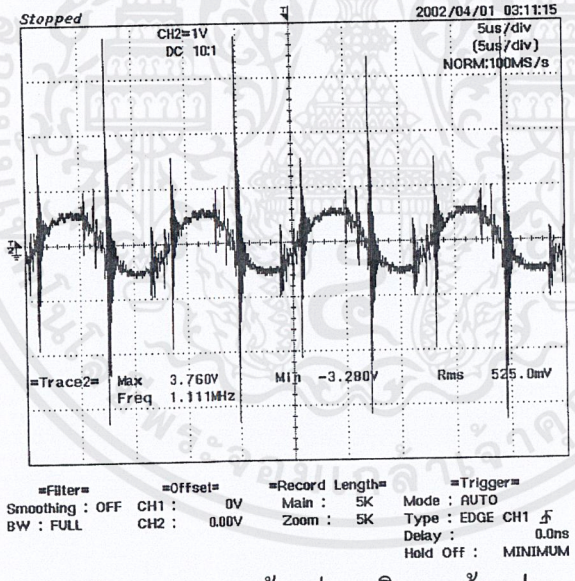
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Converter Efficiency และ Power Output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปสัญญาณเมื่อมีการปรับเฟสชิฟท์



ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.18 สัญญาณที่ภาระโหลด 26.26% (400 W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าต่างๆของแรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์

ตารางที่ 2 ผลการทดลองเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าต่างๆของแรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์

แรงดันป้อนเข้า (V)	Input (วัดที่ชุด Rectifier)		P_{IN} (W)	Output		P_{OUT} (W)	Efficiency (%)
	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)		V_{DC} (V)	I_{DC} (A)		
20	26.59	0.55	14.624	3.17	3	9.51	65.028
40	51.4	1.21	62.194	7.3	7.1	51.83	83.336
60	77.7	1.92	149.184	11.13	10.8	120.204	80.574
80	100.7	2.53	254.771	14.2	13.82	196.244	77.028
100	125.4	3.17	397.518	18.23	17.81	324.6763	81.676
120	151.1	3.79	572.669	22.26	21.57	480.1482	83.844
140	178.2	4.54	809.028	26.27	24.95	655.4365	81.015
160	205.4	5.19	1066.026	30.41	29.24	889.1884	83.412
180	234.8	5.91	1387.668	34.29	32.83	1125.741	81.125
200	265.5	6.61	1754.955	39.3	36.35	1428.555	81.401
220	275	6.82	1875.5	41.77	37	1545.49	82.404

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์แรงดันกระเพื่อมทางเอาท์พุทที่ค่าต่างๆของแรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์

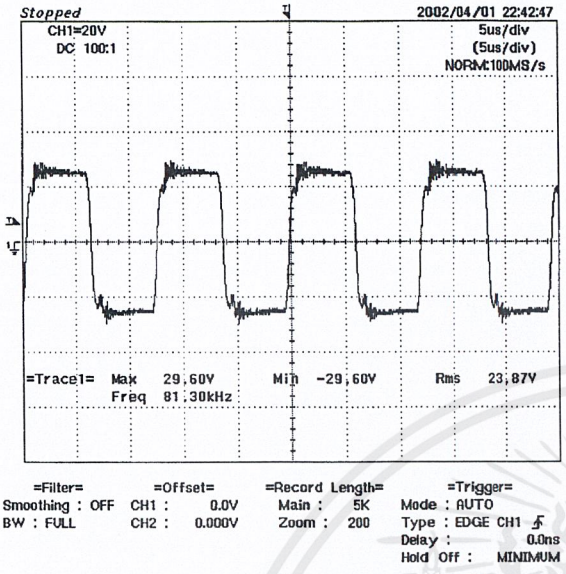
แรงดันป้อนเข้า (V)	V max (V)	V min (V)	V average (V)	Ripple (%)
20	3.36	2.96	3.172	12.61
40	7.6	7	7.312	8.21
60	11.6	10.6	11.13	8.98
80	14.8	13.6	14.2	8.45
100	19.2	16.8	18.23	13.17
120	23.2	20.8	22.26	10.78
140	28	24.8	26.27	12.18
160	32	28.8	30.41	10.52
180	36	32.8	34.29	9.33
200	40.8	37.6	39.38	8.13
220	44	40	41.77	9.58

**สูตรคำนวณแรงดันกระเพื่อม

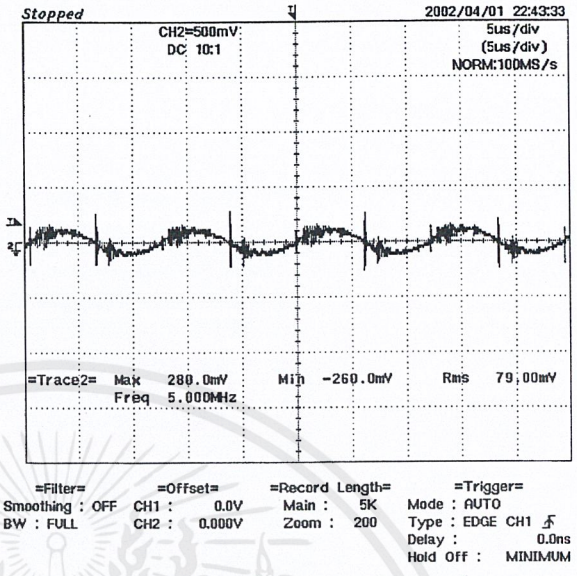
$$\%Ripple = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{average}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

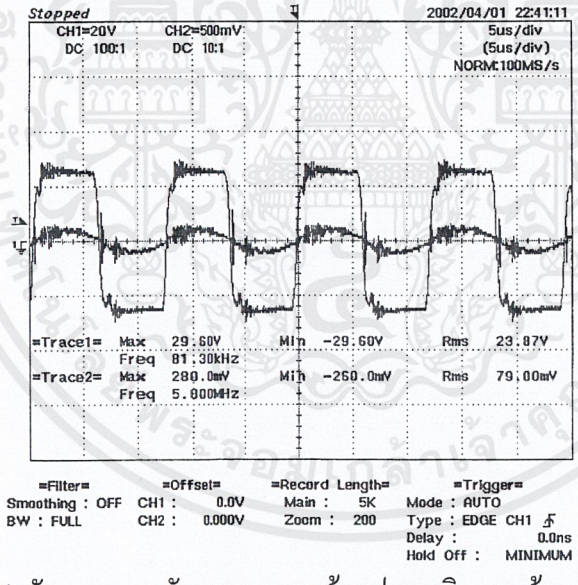
รูปสัญญาณที่ค่าต่างๆของแรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์



ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



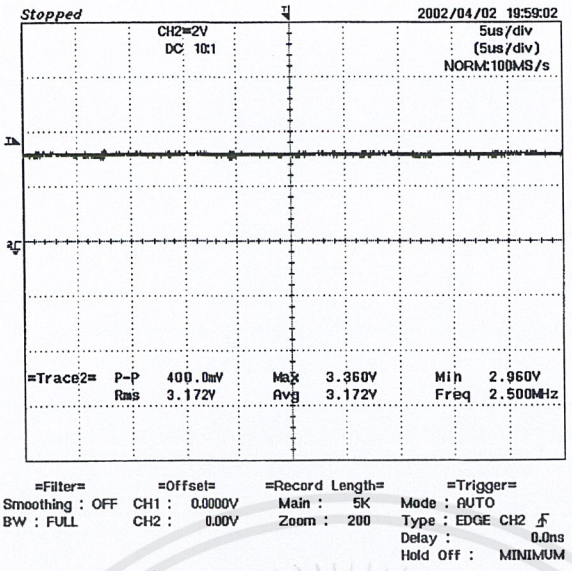
ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



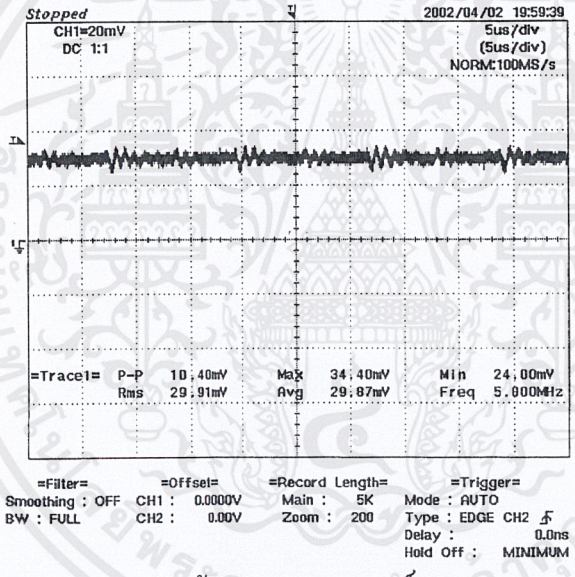
ค.) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.19 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 20 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



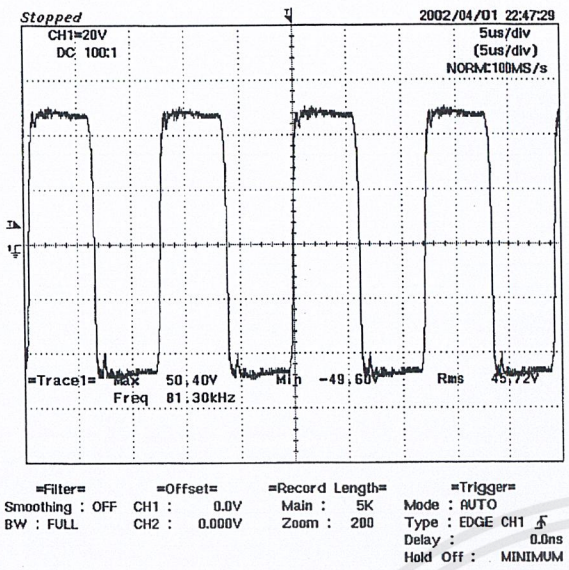
ก.) สัญญาณแรงดันเอาท์พุท



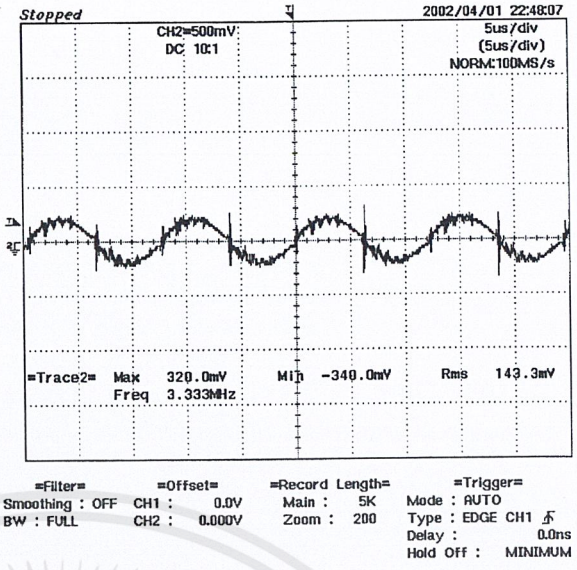
ข.) สัญญาณกระแสเอาท์พุท

รูปที่ 5.20 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 20 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

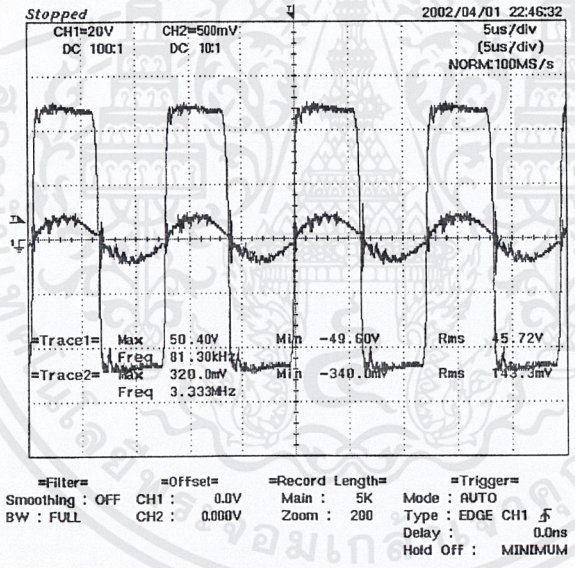
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



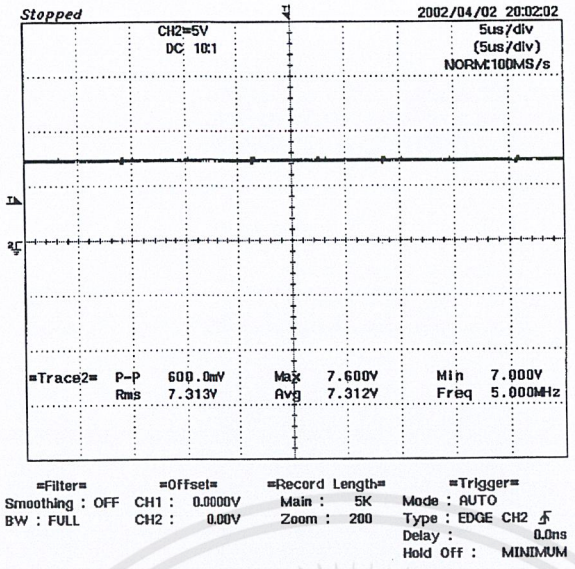
ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



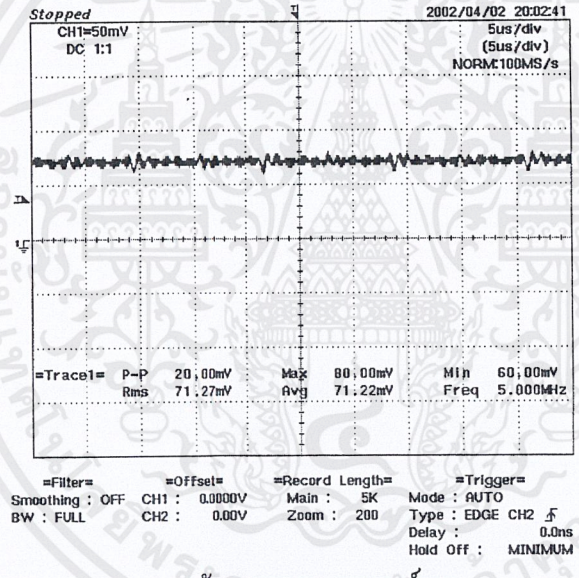
ค.) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.21 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 40 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



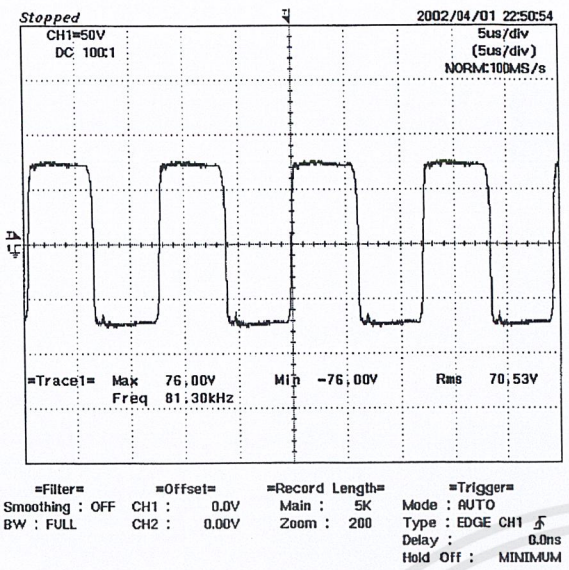
ก.) สัญญาณแรงดันเอาท์พุท



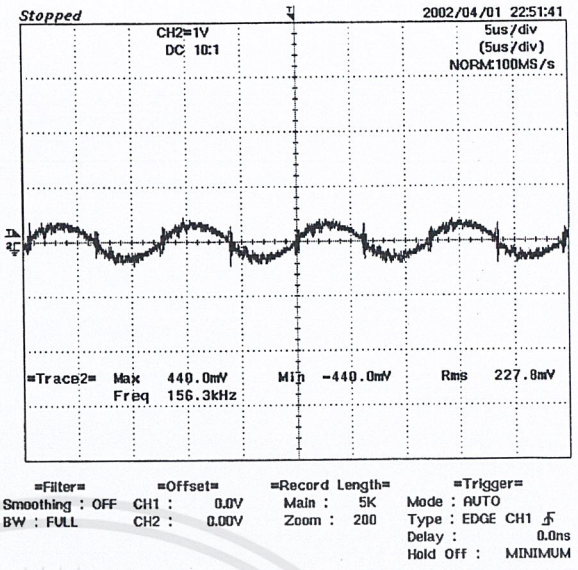
ข.) สัญญาณกระแสเอาท์พุท

รูปที่ 5.22 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 40 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

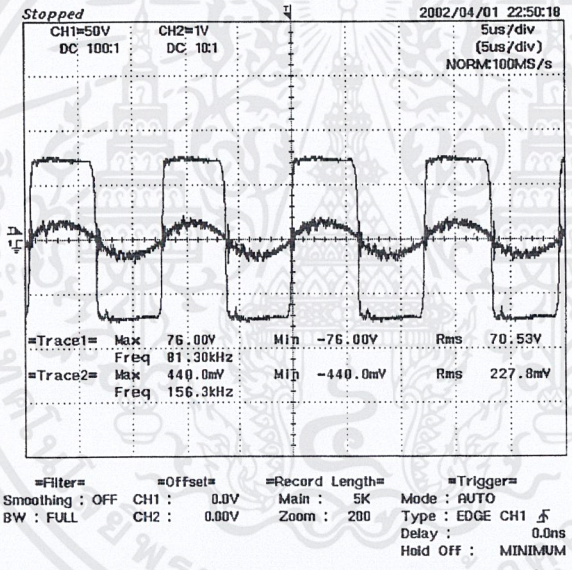
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



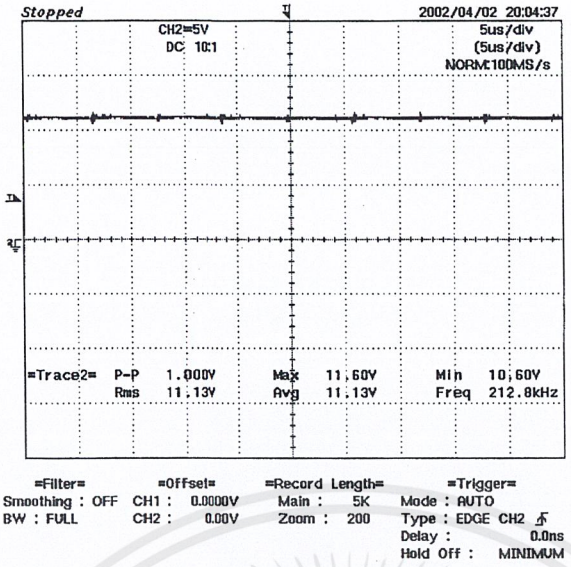
ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



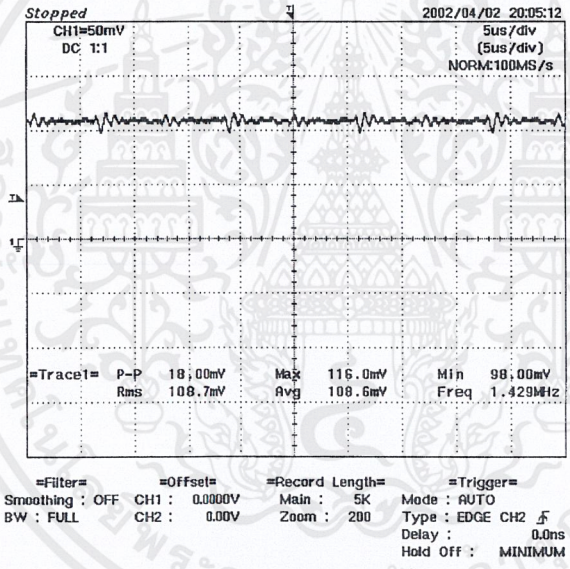
ค.) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.23 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 60 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



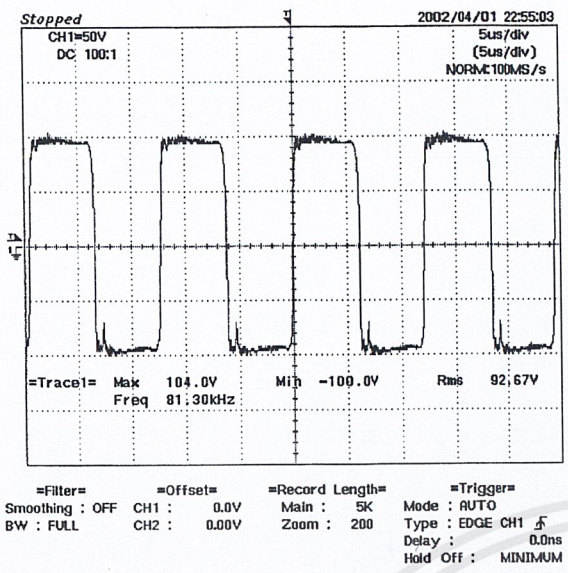
ก.) สัญญาณแรงดันเอาท์พุท



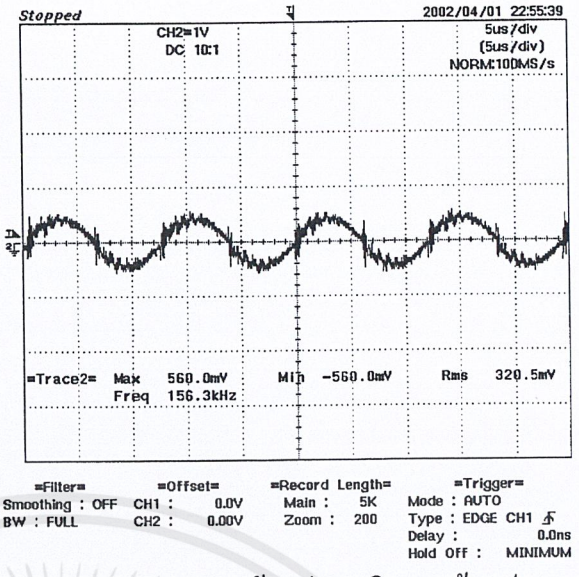
ข.) สัญญาณกระแสเอาท์พุท

รูปที่ 5.24 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 60 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

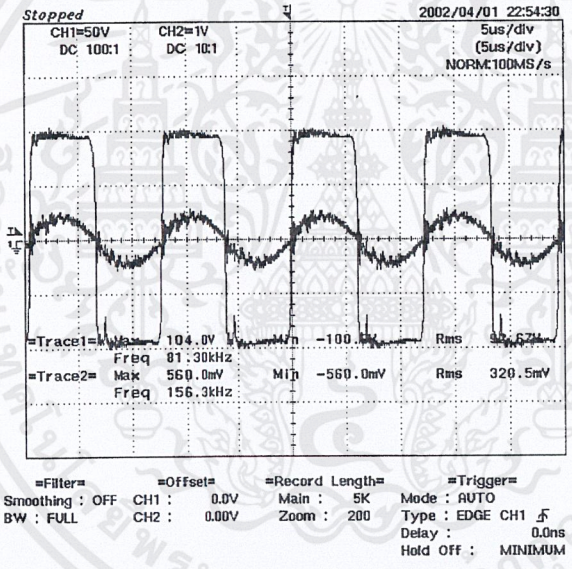
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



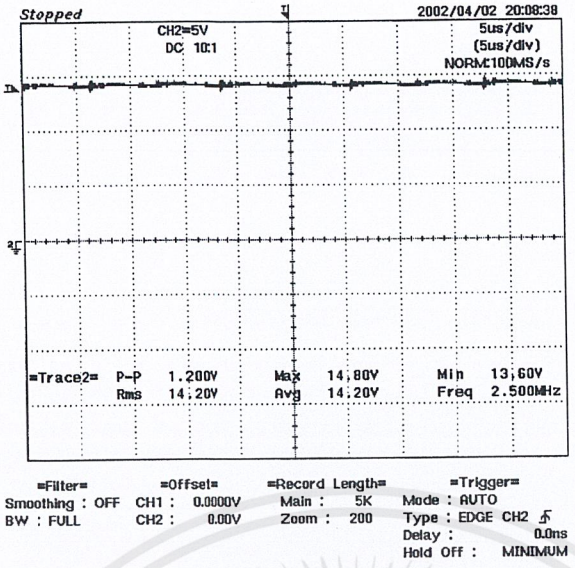
ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



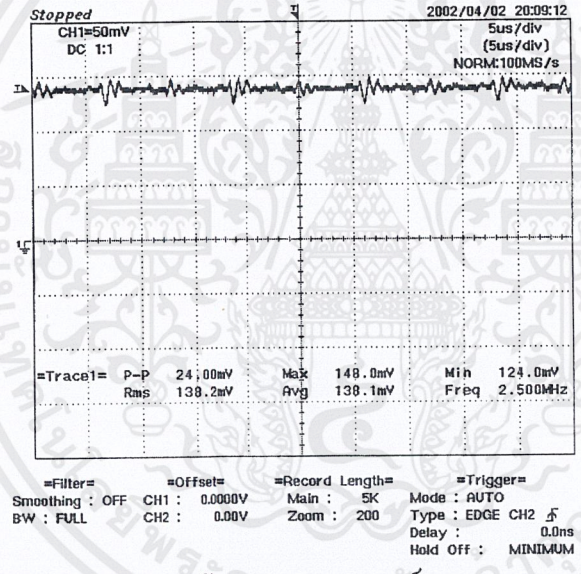
ค.) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.25 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 80 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



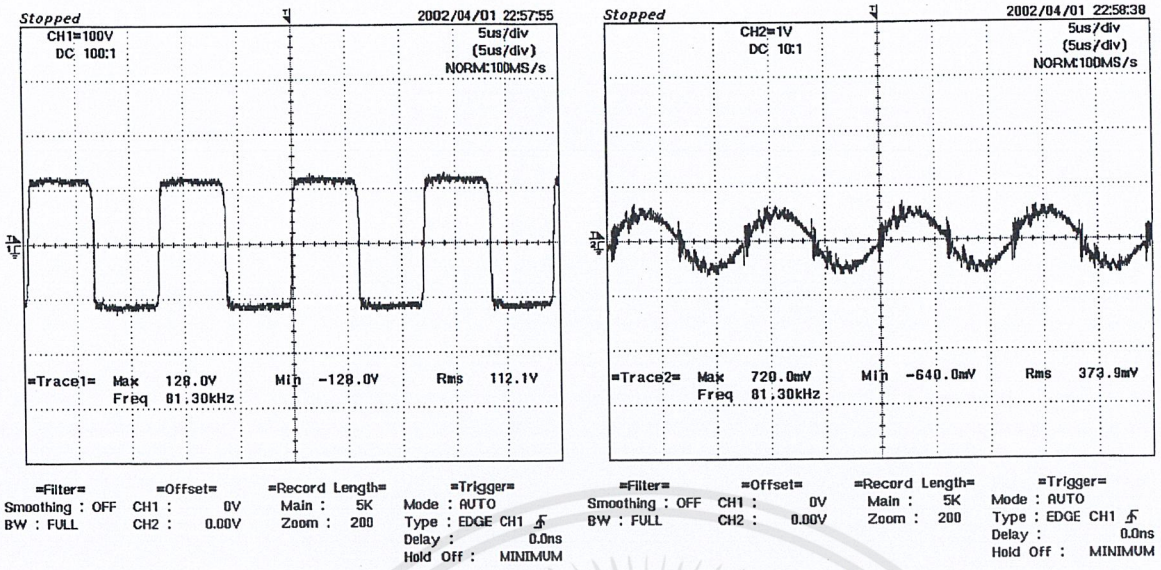
ก.) สัญญาณแรงดันเอาท์พุท



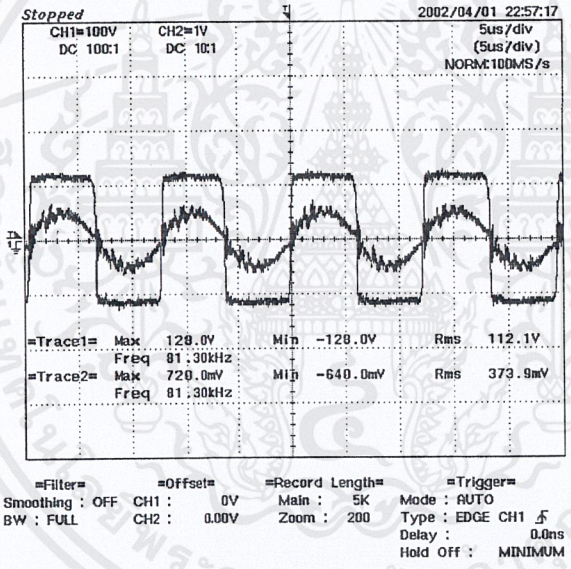
ข.) สัญญาณกระแสเอาท์พุท

รูปที่ 5.26 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 80 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



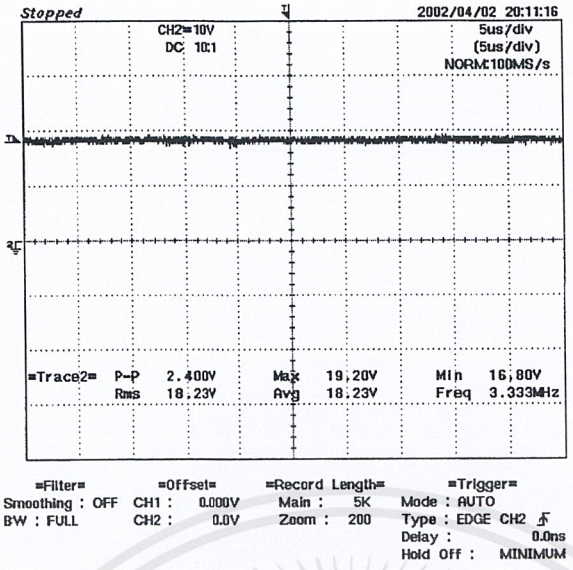
ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



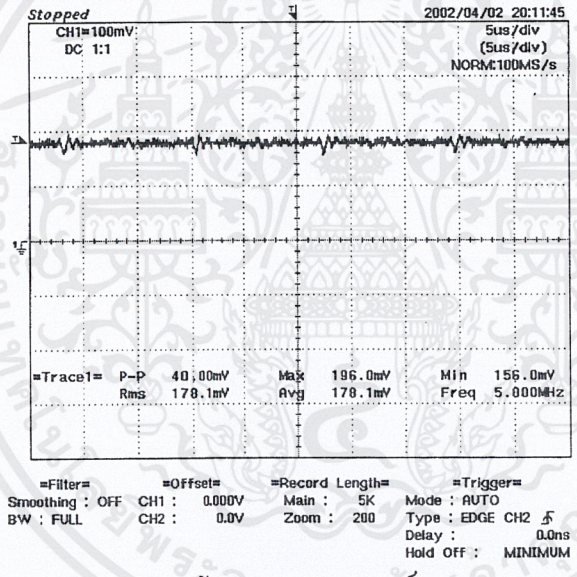
ค.) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.27 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 100 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



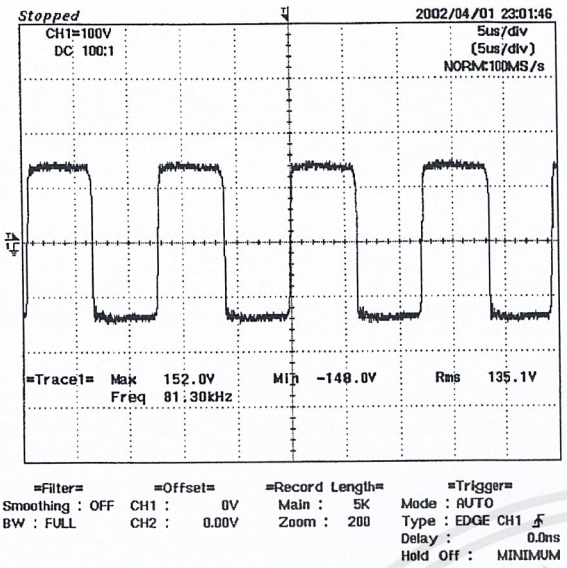
ก.) สัญญาณแรงดันเอาท์พุท



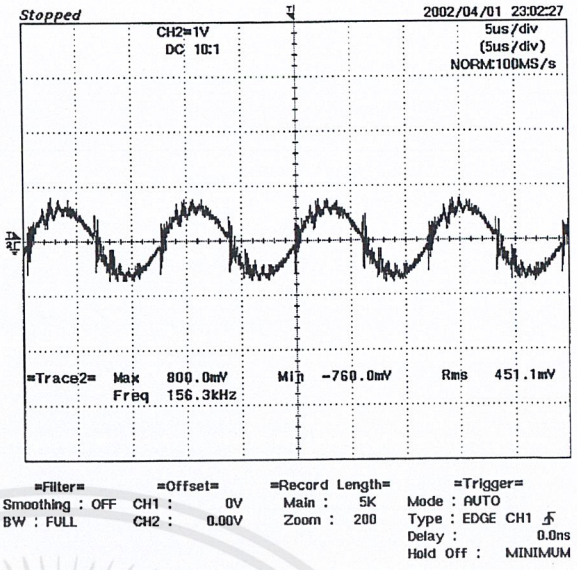
ข.) สัญญาณกระแสเอาท์พุท

รูปที่ 5.28 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 100 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

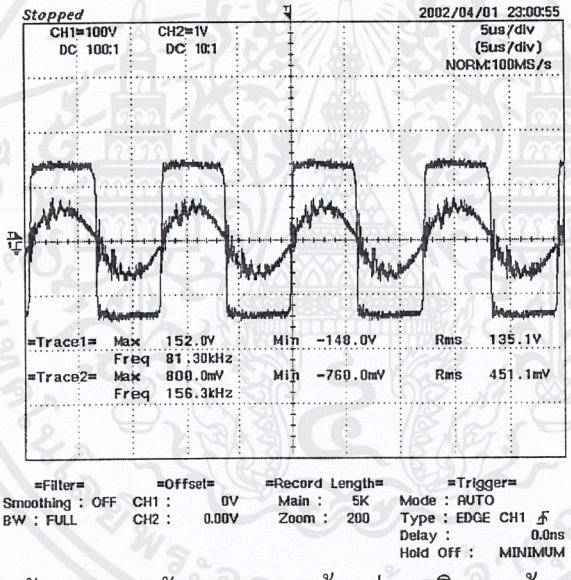
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



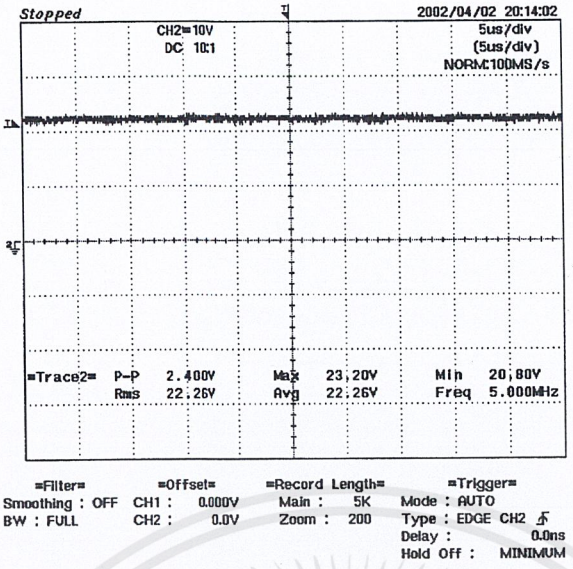
ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



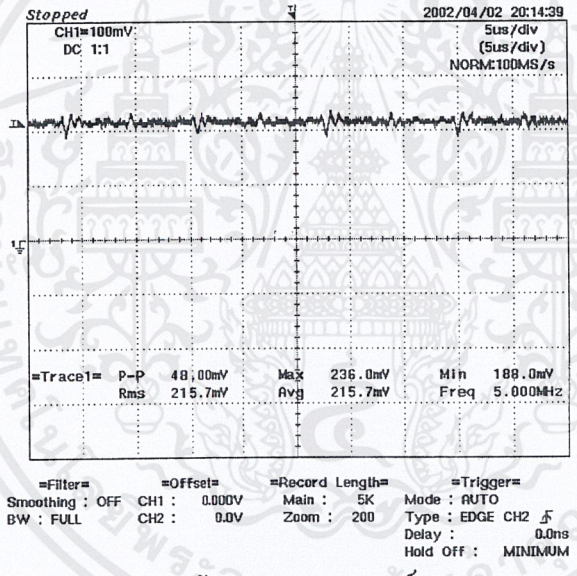
ค.) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.29 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 120 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



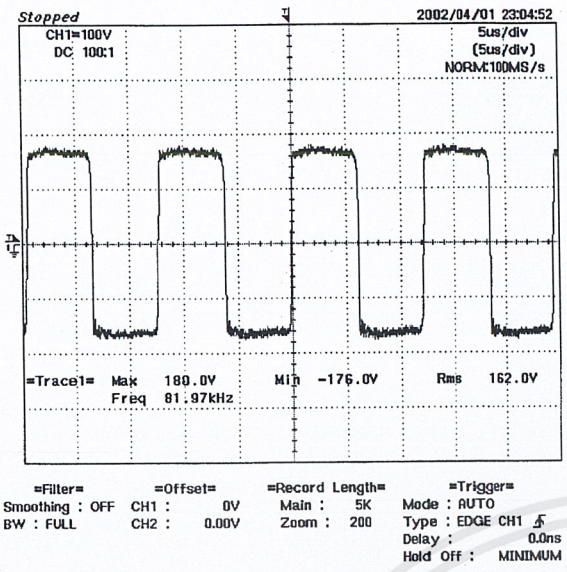
ก.) สัญญาณแรงดันเอาท์พุท



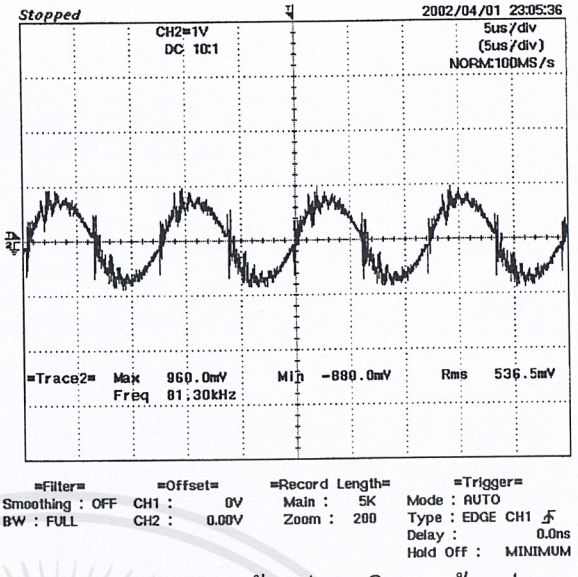
ข.) สัญญาณกระแสเอาท์พุท

รูปที่ 5.30 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 120 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

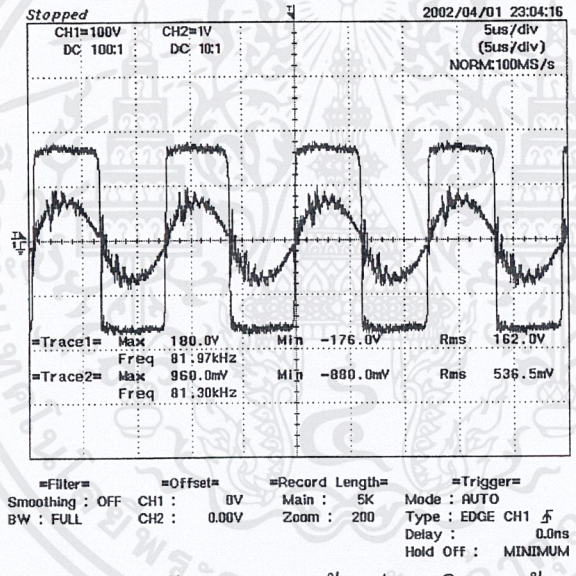
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



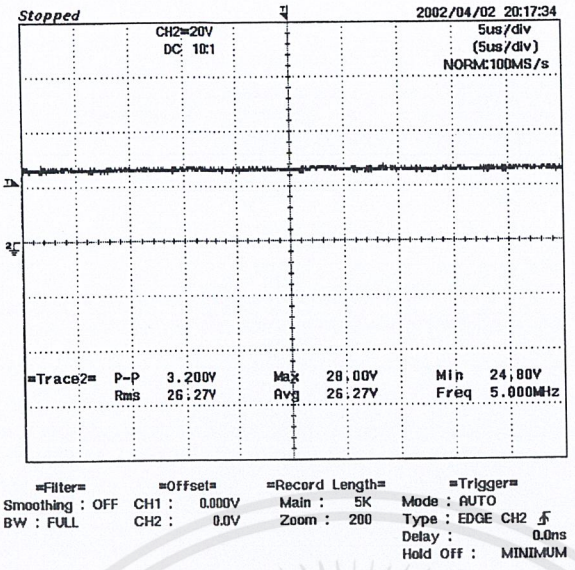
ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



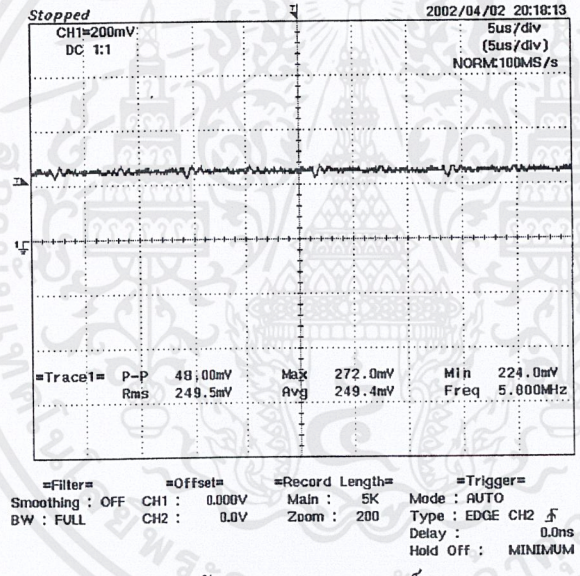
ค.) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.31 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 140 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



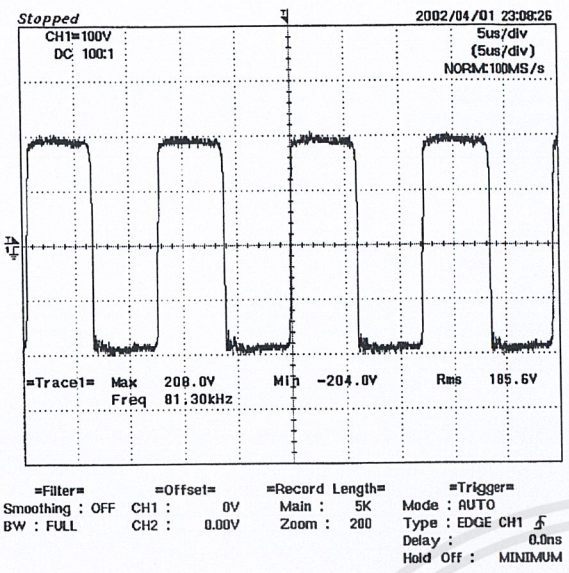
ก.) สัญญาณแรงดันเอาท์พุท



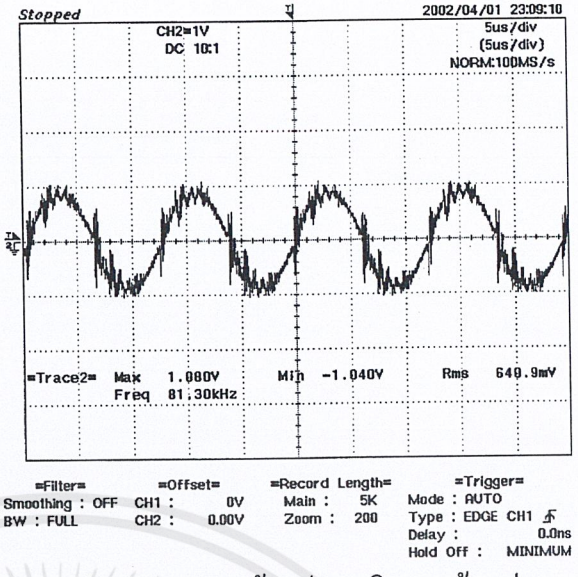
ข.) สัญญาณกระแสเอาท์พุท

รูปที่ 5.32 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 140 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

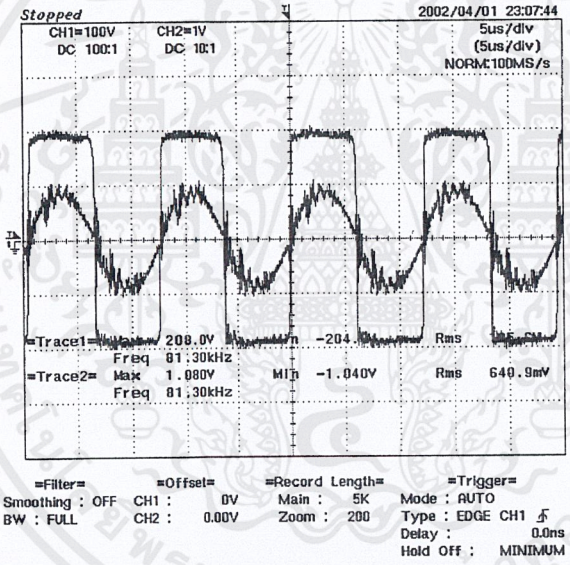
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



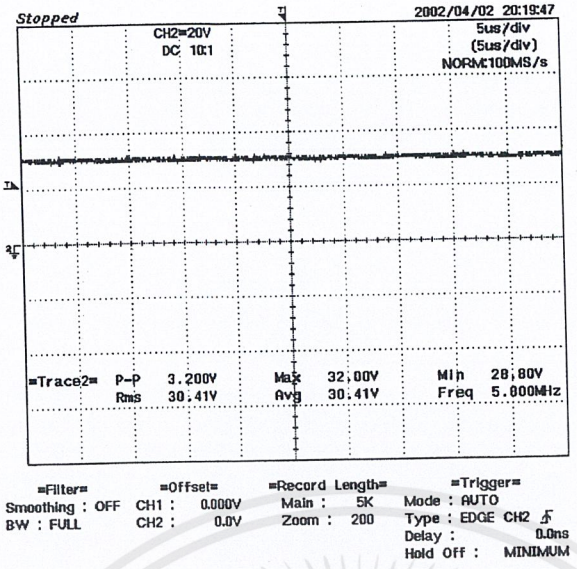
ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



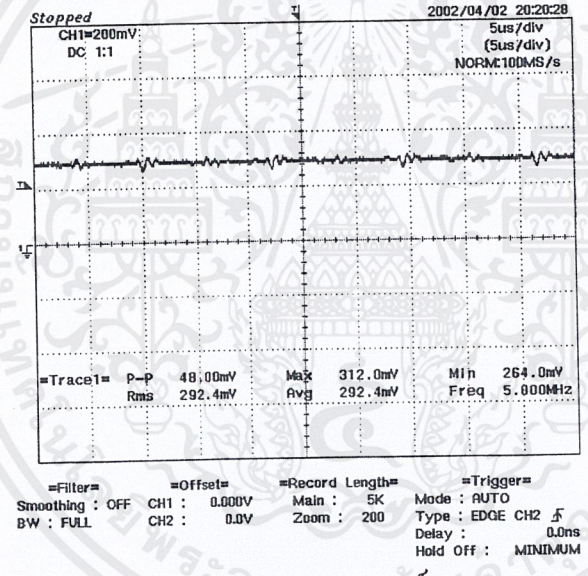
ค.) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.33 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 160 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



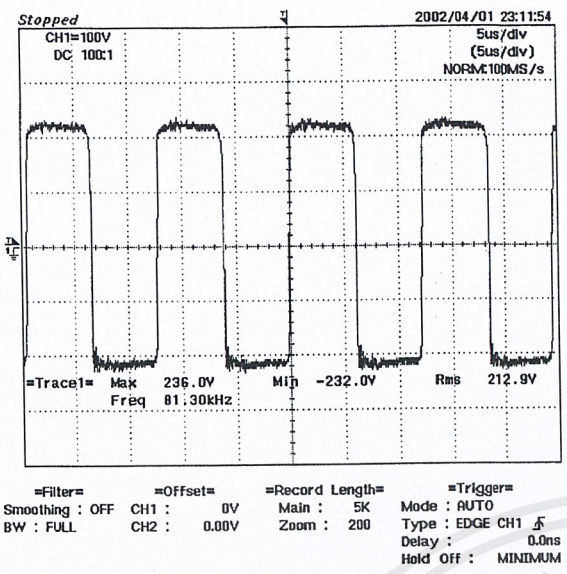
ก.) สัญญาณแรงดันเอาท์พุท



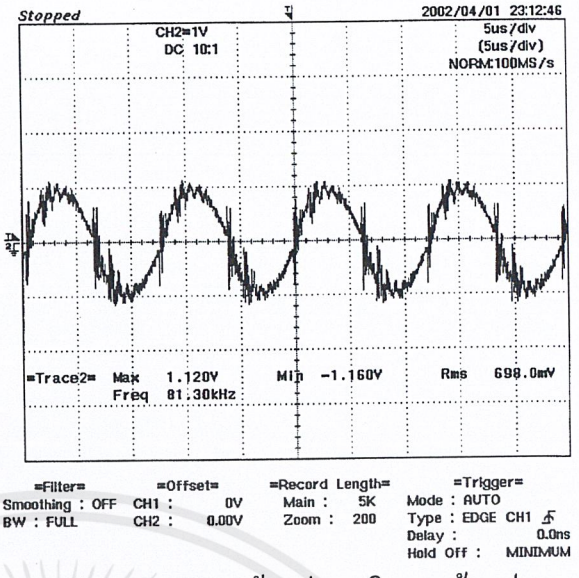
ข.) สัญญาณกระแสเอาท์พุท

รูปที่ 5.34 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 160 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

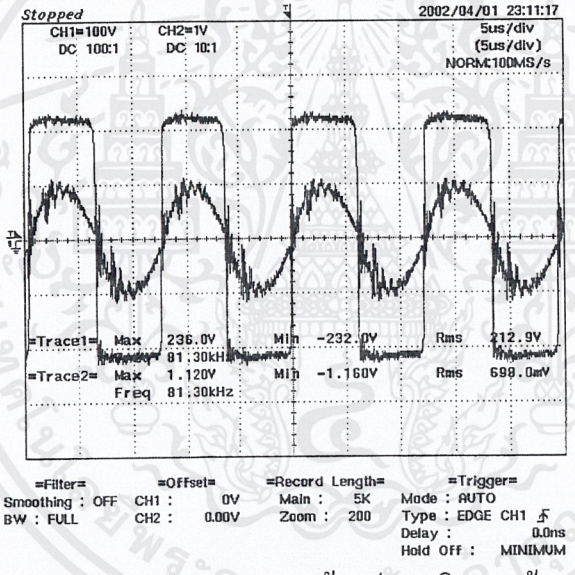
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



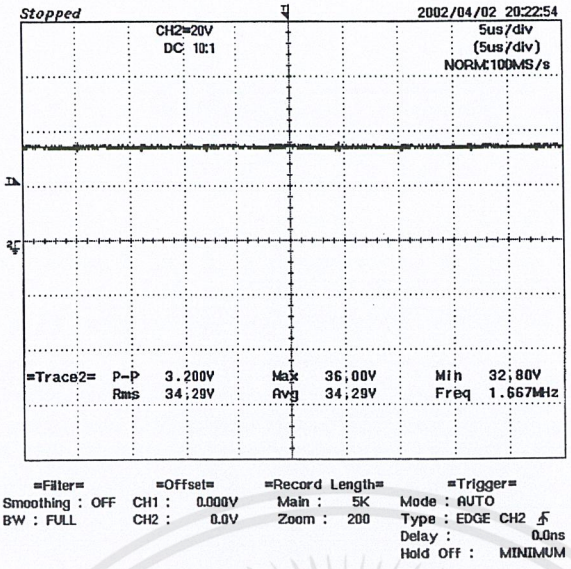
ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



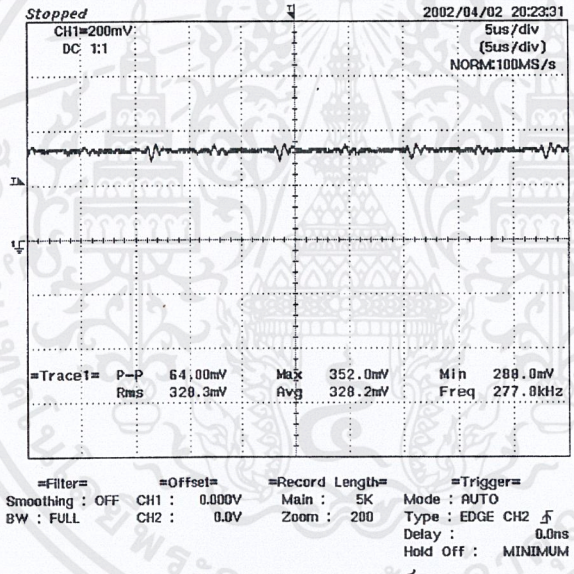
ค.) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.35 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 180 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



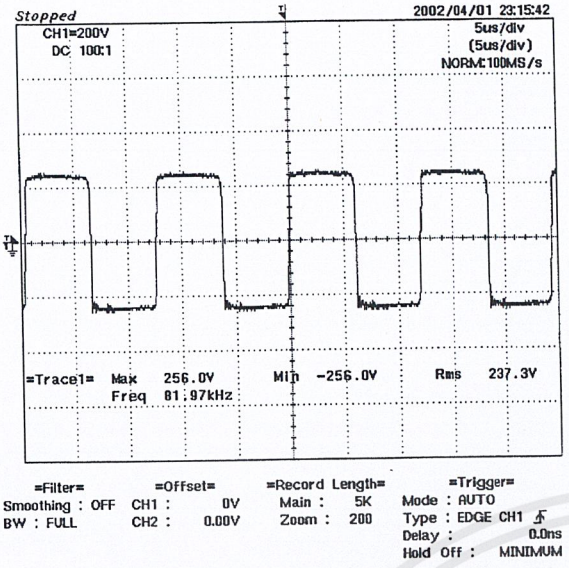
ก.) สัญญาณแรงดันเอาท์พุท



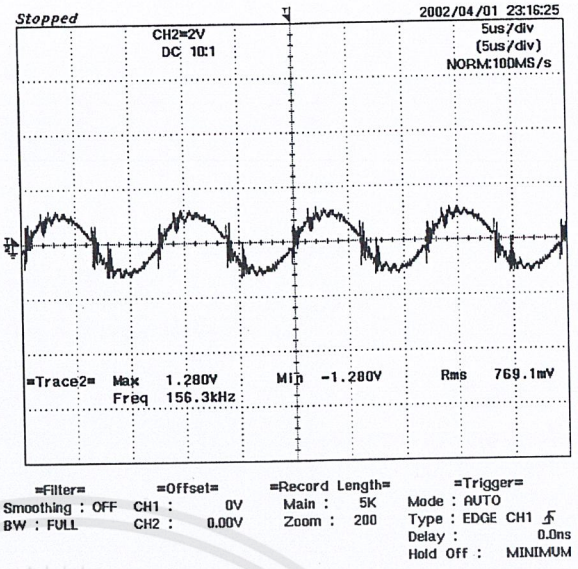
ข.) สัญญาณกระแสเอาท์พุท

รูปที่ 5.36 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 180 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

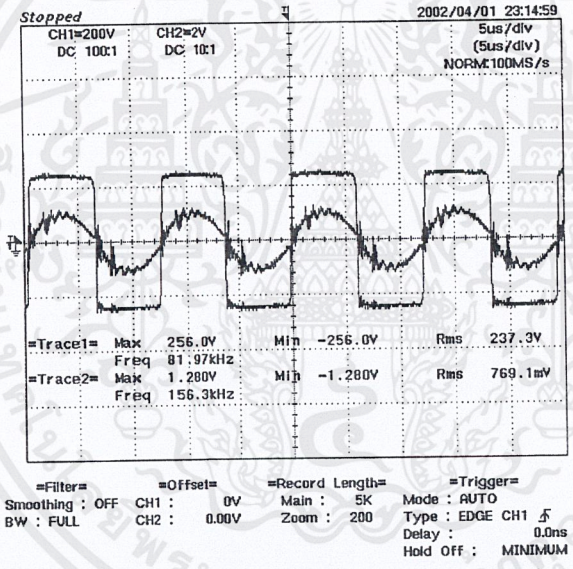
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



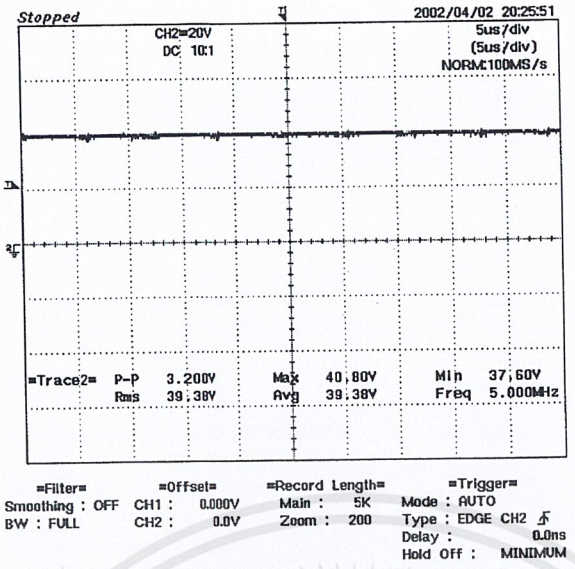
ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



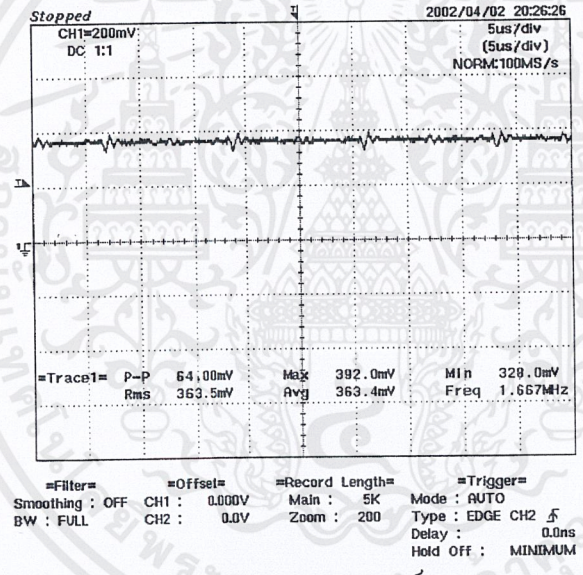
ค.) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.37 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 200 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



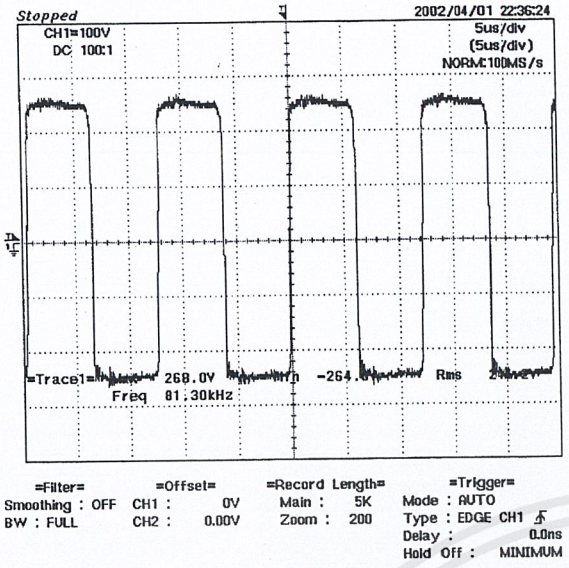
ก.) สัญญาณแรงดันเอาท์พุท



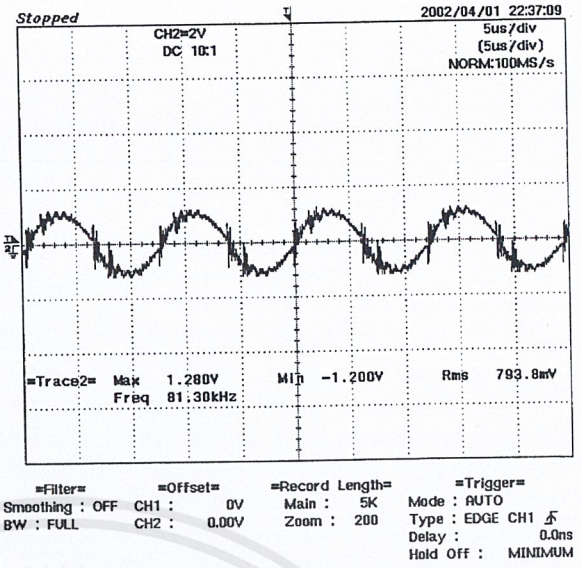
ข.) สัญญาณกระแสเอาท์พุท

รูปที่ 5.38 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 200 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

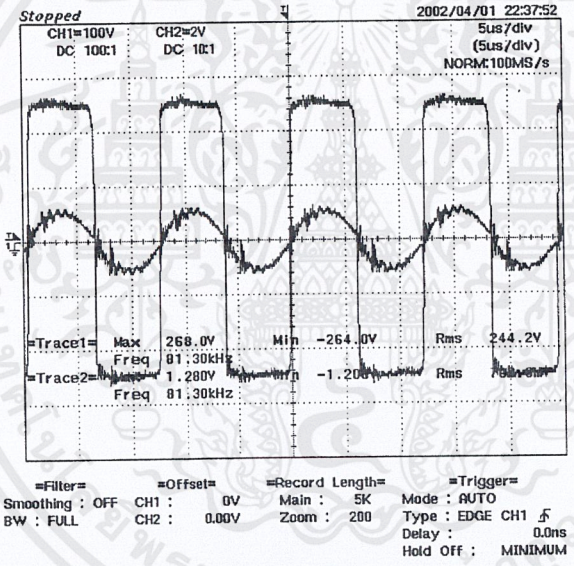
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



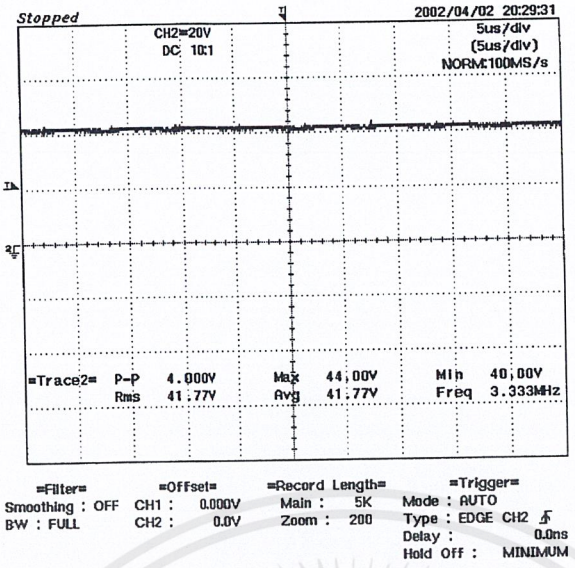
ข.) สัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



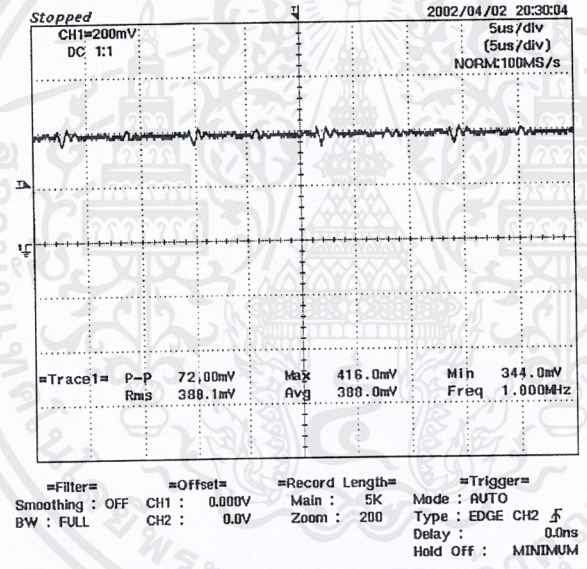
ค.) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.39 สัญญาณด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 220 โวลต์ ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) สัญญาณแรงดันเอาท์พุท



ข.) สัญญาณกระแสเอาท์พุท

รูปที่ 5.40 สัญญาณเอาท์พุทที่แรงดันป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์ 220 โวลต์
ภาระโหลด 1.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและวิจารณ์งานที่ได้

จากการทดลองเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็มเฟสชิฟท์โดยมีการสวิตช์แรงดันศูนย์ในโครงงานนี้นั้น สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้ 1.5 กิโลวัตต์ จ่ายกระแสได้ 30-40 แอมแปร์ ที่ความถี่ประมาณ 80 กิโลเฮิรตซ์ เมื่อทำการทดลองโดยเพิ่มภาระโหลดที่ค่าต่างๆกันให้แรงดันเอาท์พุทคงที่ 42 โวลต์ โดยใช้วิธีปรับเฟสชิฟท์ จะได้ผลการทดลองเป็นไปดังตารางที่ 1 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทและเอาท์พุท ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีค่าประมาณ 70 % ที่ภาระโหลดน้อยๆ แต่เมื่อจ่ายค่าภาระโหลดเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์นั้น จะอยู่ที่ประมาณ 80 % ส่วนค่าต่างๆจะอธิบายได้ดังรูปกราฟคือ ค่ากระแสเอาท์พุท, กระแสอินพุท, กำลังอินพุท จะแปรผันตรงกับค่ากำลังเอาท์พุท ส่วนค่าแรงดันอินพุทจะแปรผกผัน กับค่ากำลังเอาท์พุท

ผลการทดลองที่ได้จากการเพิ่มแรงดันอินพุทที่คอนเวอร์เตอร์เป็นช่วงๆละ 20 โวลต์ ตั้งแต่ 20 ถึง 220 โวลต์ ซึ่งได้ผลดังตารางคือ ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์นั้นจะอยู่ที่ประมาณ 80 % โดยค่าที่วัดได้ต่างๆจะเพิ่มตามค่าแรงดันที่ป้อนเข้าคอนเวอร์เตอร์

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าและคำนวณแรงดันกระเพื่อม จะพบว่าเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ทำการศึกษาและทดลองสร้างขึ้นมานี้ ยังมีค่าแรงดันกระเพื่อมสูงอยู่ ซึ่งเป็นผลมาจาก วงจร LC ฟิลเตอร์ ที่ทางด้านเอาท์พุทนั้น ยังออกแบบมาไม่เหมาะสม แต่จะสามารถทำการพัฒนาเพื่อให้ค่าที่ออกมาสามารถยอมรับได้

ข้อดีของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็มเฟสชิฟท์โดยมีการสวิตช์แรงดันศูนย์นี้คือ

1.) มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.5 กิโลวัตต์
2.) มีประสิทธิภาพสูง ประมาณ 80 %

ข้อเสียของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็มเฟสชิฟท์โดยมีการสวิตช์แรงดันศูนย์นี้คือ

1.) ยังคงมีขนาดใหญ่ แต่สามารถพัฒนาให้เล็กลงไปกว่าเดิมได้
2.) อุปกรณ์ที่ใช้บางชนิดไม่มีวางจำหน่ายในประเทศ เช่น IC เบอร์ UC3879

ปัญหาที่พบในโครงงานนี้

1.) การปรับเฟสชิฟท์เพื่อควบคุมแรงดันที่เอาท์พุทนั้นไม่ควรจะกระทำที่ภาระโหลดน้อยๆเพราะจะเกิดความเสียหายที่ตัวมอสเฟทที่อยู่ในส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ เนื่องมาจากความไม่เสถียรของหม้อแปลงแยกกราวด์ในวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะและสิ่งที่ควรวิจัยต่อไปในอนาคต

จากการศึกษาและทดลองรวมทั้งข้อดีข้อเสียและปัญหาที่พบในการสร้างเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยมีการควบคุมแบบเฟสชิฟท์และมีการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ ทำให้มีข้อควรปรับปรุงในอนาคตคือ

1.) ควรจะมีวงจรควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อปรับค่าแรงดันที่เอาท์พุทให้คงที่แทนการปรับด้วยมือ

2.) ควรมีชุดวงจร Soft-Start เพื่อป้องกันกระแสกระชากในขณะเริ่มเปิดวงจร ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อมอสเฟท

3.) ออกแบบวงจร LC ฟิลเตอร์ให้มีค่าเหมาะสม เพื่อปรับปรุงค่าแรงดันกระเพื่อม และพัฒนาให้จ่ายกำลังได้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNITRODE

Phase Shift Resonant Controller

UC1879
UC2879
UC3879

FEATURES

- Programmable Output Turn On Delay; Zero Delay Available
- Compatible with Voltage Mode or Current Mode Topologies
- Practical Operation at Switching Frequencies to 300kHz
- Four 100mA Totem Pole Outputs
- 10MHz Error Amplifier
- Pin Programmable Undervoltage Lockout
- Low Startup Current - 150µA
- Soft Start Control
- Outputs Active Low During UVLO

DESCRIPTION

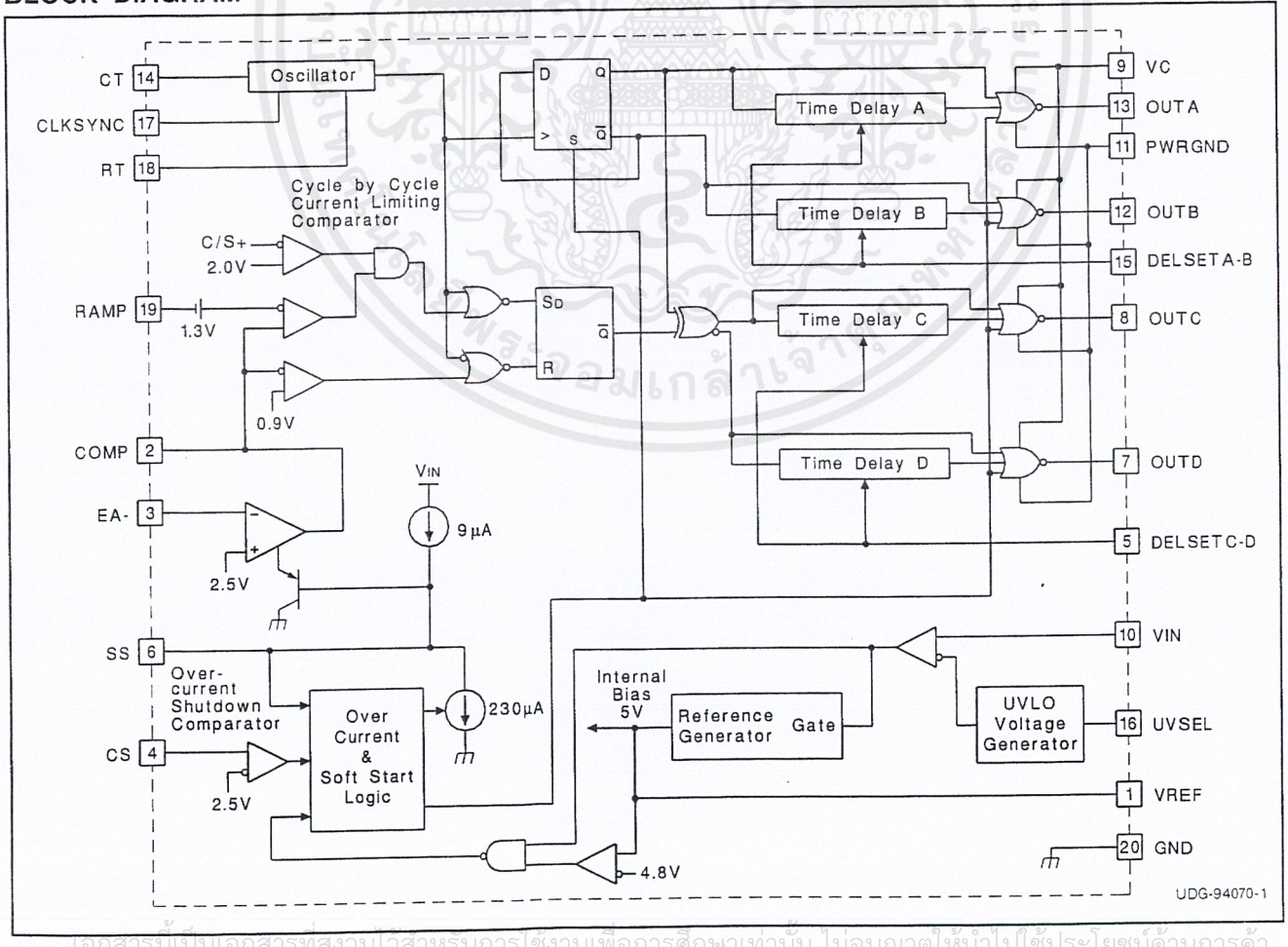
The UC3879 controls a bridge power stage by phase shifting the switching of one half-bridge with respect to the other. This allows constant frequency pulse width modulation in combination with resonant, zero-voltage switching for high efficiency performance. The UC3879 can be configured to provide control in either voltage mode or current mode operation, with overcurrent shutdown for fast fault protection.

Independently programmable time delays provide dead-time at the turn-on of each output stage, allowing time for each resonant switching interval.

With the oscillator capable of operating in excess of 600kHz, overall output switching frequencies to 300kHz are practical. In addition to the standard free running mode, with the CLKSYNC pin, the user may configure the UC3879 to accept an external clock synchronization signal. Alternatively, up to three units can be locked together with the operational frequency determined by the fastest device.

Protective features include an undervoltage lockout and overcurrent protection. Additional features include a 10MHz error amplifier, a 5V precision reference, and soft start. The UC3879 is available in 20 pin N, J, DW, and Q and 28 pin L packages.

BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage (VC, VIN) 20V
Output Current, Source or Sink, DC 20mA
Analog I/0s
(Pins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 14, 15, 17, 18, 19) . . . . . –0.3 to 5.3V
(Pin 16) . . . . . –.03V to VIN
Storage Temperature Range . . . . . –65°C to +150°C
Junction Temperature . . . . . –55°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.) . . . . . +300°C

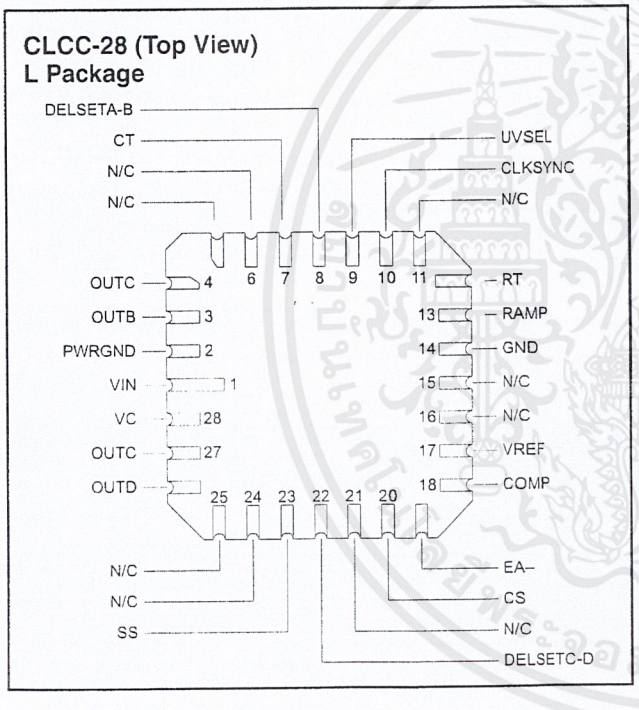
Notes: *Pin references are to 20 pin DIL and SOIC packages. All voltages are with respect to ground unless otherwise stated. Currents are positive into, negative out of the specified terminal. Consult Packaging Section of Databook for thermal limitations and considerations of packages.*

Table I. Product Selection Guide

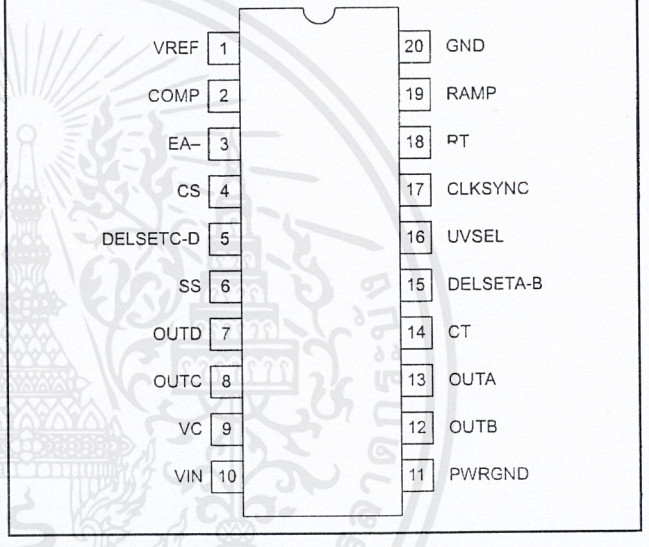
	TEMPERATURE RANGE	AVAILABLE PACKAGES
UCC1879	– 55°C to +125°C	J, L
UCC2879	– 40°C to +85°C	N, DW, Q, J, L
UCC3879	0°C to +70°C	N, DW, Q

CONNECTION DIAGRAMS

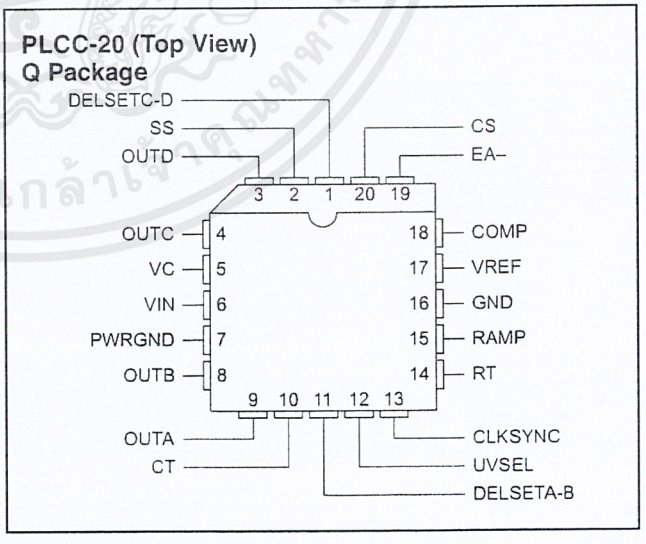
CLCC-28 (Top View)
L Package



DIL-20, SOIC-20 (Top View)
J or N Package, DW Package



PLCC-20 (Top View)
Q Package



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS Unless specified; VC = VIN = V_{UVSEL} =12V, CT = 470pF, RT = 9.53k, $R_{DELSETA-B}$ = $R_{DELSEC-D}$ = 4.8k, $C_{DELSETA-B}$ = $C_{DELSETC-D}$ = 0.01µF, T_A = T_J.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Undervoltage Lockout					
Start Threshold	V_{UVSEL} = VIN	9	10.75	12.5	V
	V_{UVSEL} = Open	12.5	15.25	16.5	V
UVLO Hysteresis	V_{UVSEL} = VIN	1.15	1.75	2.15	V
	V_{UVSEL} = Open	5.2	6	7.4	V
Input Bias, UVSEL Pin	V_{UVSEL} = VIN = 8V		30		µA
Supply Current					
I_{VIN} Startup	VIN = V_{UVSEL} = 8V, VC = 18V, $I_{DELSETA-B}$ = $I_{DELSETC-D}$ = 0		150	600	µA
I_{VC} Startup	VIN = V_{UVSEL} = 8V, VC = 18V, $I_{DELSETA-B}$ = $I_{DELSETC-D}$ = 0		10	100	µA
I_{VIN} Operating	UC3879, UC2879		23	33	mA
	UC1879		23	36	mA
I_{VC} Operating			4	8	mA
Voltage Reference					
Output Voltage	T_J = +25°C	4.92	5	5.08	V
Line Regulation	11V < VIN < 18V		1	10	mV
Load Regulation	I_{VREF} = –10mA		5	20	mV
Total Variation	Line, Load, Temperature	4.875		5.125	V
Short Circuit Current	VREF = 0V, T_J = 25°C		–60	–15	mA
Error Amplifier					
Error Amplifier Input Voltage		2.4	2.5	2.6	V
Input Bias Current			0.6	3	µA
AVOL	1V < V_{COMP} < 4V	60	90		dB
PSRR	11V < VIN < 18V	85	100		dB
Output Sink Current	V_{COMP} = 1V	1	2.5		mA
Output Source Current	V_{COMP} = 4V		–1.3	–0.5	mA
Output Voltage High	I_{COMP} = –0.5mA	4	4.7	5	V
Output Voltage Low	I_{COMP} = 1mA	0	0.5	1	V
Slew Rate	T_A = +25°C	6	11		V/µs
PWM Comparator					
RAMP Offset Voltage	T_J = 25°C, Note 3	1.1	1.25	1.4	V
PWM Phase Shift,	V_{COMP} > $V_{RAMPpeak}$ + $V_{RAMPoffset}$	98	99.7	102	%
$T_{DELSETA-B}$, $T_{DELSETC-D}$ = 0, Note 1	V_{COMP} < Zero Phase Shift Voltage	0	0.3	2	%
Output Skew,	V_{COMP} > $V_{RAMPpeak}$ + $V_{RAMPoffset}$		10		ns
$T_{DELSETA-B}$, $T_{DELSETC-D}$ = 0, Note 1	V_{COMP} < Zero Phase Shift Voltage		10		ns
Ramp to Output Delay, $T_{DELSETA-B}$ = 0,	UC3879, UC2879		115	250	ns
$T_{DELSETC-D}$ = 0	UC1879		115	300	ns
Oscillator					
Initial Accuracy	T_A = 25°C	180	200	220	kHz
Voltage Stability	11V < VIN < 18V		1	2	%
Total Variation	Line, Temperature	160	200	240	kHz
CLKSYNC Threshold		2.3	2.5	2.7	V
Clock Out High		2.8	4		V
Clock Out Low		0.5	1	1.5	V
Clock Out Pulse Width			400	600	ns
Ramp Valley Voltage			0.2	0.4	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS Unless specified; VC = VIN = V_{UVSEL} =12V, CT = 470pF, RT = 9.53k, $R_{DELSETA-B}$ = $R_{DELSEC-D}$ = 4.8k, $C_{DELSETA-B}$ = $C_{DELSETC-D}$ = 0.01µF, T_A = T_J.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Ramp Peak Voltage		2.8	2.9	3.2	V
Current Limit					
Input Bias	V_{CS} = 3.0V		2	10	µA
Threshold Voltage		2.35	2.5	2.65	V
Delay to OUTA, B, C, D			160	300	ns
Cycle-by-Cycle Current Limit					
Input Bias	V_{CS} = 2.2V		2	10	µA
Threshold Voltage		1.85	2	2.15	V
Delay to Output Zero Phase			110	300	ns
Soft Start/Reset Delay					
Charge Current	V_{SS} = 0.5V	–20	–9	–3	µA
Discharge Current	V_{SS} = 1V	120	230		µA
Restart Threshold		4.3	4.7		V
Discharge Level			300		mV
Output Drivers					
Output Low Level	I_{OUT} = 10mA		0.3	0.4	V
Output High Level	I_{OUT} = –10mA, Referenced to VC		2.2	3	V
Delay Set (Note 5)					
Delay Time	$R_{DELSETA-B}$ = $R_{DELSETC-D}$ = 4.8k	300	430	600	ns
Delay Time	$R_{DELSETA-B}$ = $R_{DELSETC-D}$= 1.9k	130	170	250	ns
Zero Delay	$V_{DELSETA-B}$ = $V_{DELSETC-D}$ = 5V		5		ns

Note 1. *Phase shift percentage (0% = 0°, 100% = 180°) is defined as* $\theta = \frac{200}{T}\Phi$ %

where θ *is the phase shift, and* Φ *and T are defined in Figure 1. At 0% phase shift,* Φ *is the output skew.*

Note 2. *Delay time is defined as:*

$$delay = T \bullet \left(\frac{1}{2} - duty\ cycle\right)$$

where T is defined in Figure 1.

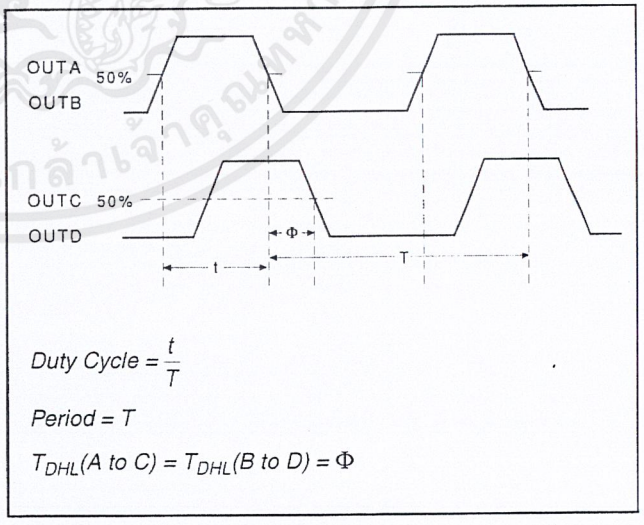
Note 3. *Ramp offset voltage has a temperature coeffecient of about –4mV/°C.*

Note 4. *The zero phase shift voltage is the voltage measured at COMP which forces zero phase shift. This condition corresponds to zero effective output power. Zero phase shift voltage has a temperature coeffecient of about –2mV/°C.*

Note 5. *Delay time can be programmed via resistors from the delay set pins to ground.*

$$Delay\ Time = \left(0.89 \bullet 10^{-10} \bullet R_{DELAY}\right) \text{sec}$$

The recommended range for R_{DELAY} *is 1.9k to 10k.*



$$Duty\ Cycle = \frac{t}{T}$$

$$Period = T$$

$$T_{DHL}(A \text{ to } C) = T_{DHL}(B \text{ to } D) = \Phi$$

Figure 1. Phase Shift, Output Skew & Delay Time Definitions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN DESCRIPTIONS

CLKSYNC (Bi-directional Clock and Synchronization): Used as an output, CLKSYNC provides a clock signal. As an input, this pin provides a synchronization point. Multiple UC3879s, each with their own local oscillator frequency, may be connected together by the CLKSYNC pin, and they will synchronize to the fastest oscillator. This pin may also be used to synchronize the UC3879 to an external clock, provided the frequency of the external signal is higher than the frequency of the local oscillator. CLKSYNC is internally connected to an emitter follower pull-up and a current source pull-down (300µA typical). Therefore an external resistor to GND can be used to improve the CLKSYNC pin's ability to drive capacitive loads.

COMP (Error Amplifier Output): This pin is the output of the gain stage for overall feedback control. Error amplifier output voltage levels below 0.9 volt forces zero phase shift. Since the error amplifier has a relatively low current drive capability, the output may be overridden by driving it with a sufficiently low impedance source.

CT (Oscillator Frequency Set): After choosing RT to set the required upper end of the linear duty cycle range, the timing capacitor (CT) value is calculated to set the oscillator frequency as follows:

$$CT = \frac{Dlin}{1.08 \bullet RT \bullet f}$$

Connect the timing capacitor directly between CT and GND. Use a high quality ceramic capacitor with low ESL and ESR for best results. A minimum CT value of 200pF insures good accuracy and less susceptibility to circuit layout parasitics. The oscillator and PWM are designed to provide practical operation to 600kHz.

CS (Current Sense): This pin is the non-inverting input to the two current fault comparators whose references are set internally to fixed values of 2.0V and 2.5V. When the voltage at this pin exceeds 2.0V, and the error amplifier output voltage exceeds the voltage on the ramp input, the phase shift limiting overcurrent comparator will limit the phase shifting on a cycle-by-cycle basis. When the voltage at this pin exceeds 2.5V, the current fault latch is set, the outputs are forced OFF, and a soft start cycle is initiated. If a constant voltage above 2.5V is applied to this pin the outputs are disabled and held low. When CS is brought below 2.5V, the outputs will begin switching at 0 degrees phase shift before the SS pin begins to rise. This condition will not prematurely deliver power to the load.

DELSETA-B, DELSETC-D (Output Delay Control): The user programmed currents from these pins to GND set the turn on delay for the corresponding output pair. This delay is introduced between the turn off of one switch and the turn on of another in the same leg of the bridge to allow resonant switching to take place. Separate delays are provided for the two half-bridges to accommodate differences in the resonant capacitor charging currents.

EA– (Error Amplifier Inverting Input): This is normally connected to the voltage divider resistors which sense the power supply output voltage level. The loop compensation components are connected between this pin and COMP.

GND (Signal Ground): All voltages are measured with respect to GND. The timing capacitor on CT, and bypass capacitors on VREF and VIN should be connected directly to the ground plane near GND.

OUTA – OUTD (Outputs A-D): The outputs are 100mA totem pole output drivers optimized to drive FET driver ICs. The outputs operate as pairs with a nominal 50% duty cycle. The A-B pair is intended to drive one half-bridge in the external power stage and is synchronized to the clock waveform. The C-D pair drives the other half-bridge with switching phase shifted with respect to the A-B outputs.

PWRGND (Power Ground): VC should be bypassed with a ceramic capacitor from VC to the section of the ground plane that is connected to PWRGND. Any required bulk reservoir capacitor should be connected in parallel. PWRGND and GND should be connected at a single point near the chip to optimize noise rejection and minimize DC voltage drops.

RAMP (Voltage Ramp): This pin is the input to the PWM comparator. Connect it to CT for voltage mode control. For current mode control, connect RAMP to CS and also to the output of the current sense transformer circuit. Slope compensation can be achieved by injecting a portion of the ramp voltage from CT to RAMP.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN DESCRIPTIONS (cont.)

RT (Clock/Sync Duty Cycle Set Pin): The UC3879 oscillator produces a sawtooth waveform. The rising edge is generated by connecting a resistor from RT to GND and a capacitor from CT to GND (see CT pin description). During the rising edge, the modulator has linear control of the duty cycle. The duty cycle jumps to 100% when the voltage on COMP exceeds the oscillator peak voltage. Selection of RT should be done first, based on the required upper end of the linear duty cycle range (Dlin) as follows:

$$RT = \frac{2.5}{10mA \bullet (1 - Dlin)}$$

Recommended values for RT range from 2.5k to 100k.

SS: Connect a capacitor between this pin and GND to set the soft start time. The voltage at SS will remain near zero volts as long as VIN is below the UVLO threshold. Soft start will be pulled up to about 4.8V by an internal 9µA current source when VIN and VREF become valid (assuming a non-fault condition). In the event of a current fault (CS voltage exceeding 2.5V), soft start will be pulled to GND and then ramp to 4.8V. If a fault occurs during the soft start cycle, the outputs will be immediately disabled and soft start must fully charge prior to resetting the fault latch. For paralleled controllers, the soft start pins may be paralleled to a single capacitor, but the charge currents will be additive.

UVSEL: Connecting this pin to VIN sets a turn on voltage of 10.75V with 1.5V of UVLO hysteresis. Leaving the pin open-circuited programs a turn on voltage of 15.25V with 6.0V of hysteresis.

VC (Output Switch Supply Voltage): This pin supplies power to the output drivers and their associated bias circuitry. The difference between the output high drive and VC is typically 2.1V. This supply should be bypassed directly to PWRGND with a low ESR/ESL capacitor.

VIN (Primary Chip Supply Voltage): This pin supplies power to the logic and analog circuitry on the integrated circuit that is not directly associated with driving the output stages. Connect VIN to a stable source above 12V for normal operation. To ensure proper functionality, the UC3879 is inactive until VIN exceeds the upper undervoltage lockout threshold. This pin should be bypassed directly to GND with a low ESR/ESL capacitor.

NOTE: *When VIN exceeds the UVLO threshold the supply current (I_{IN}) jumps from about 100µA to greater than 20mA. If the UC3879 is not connected to a well bypassed supply, it may immediately enter the UVLO state again. Therefore, sufficient bypass capacity must be added to ensure reliable startup.*

VREF: This pin provides an accurate 5V voltage reference. It is internally short circuit current limited. VREF is disabled while VIN is below the UVLO threshold. The circuit is also disabled until VREF reaches approximately 4.75V. For best results bypass VREF with a 0.1µF, low ESR/ESL capacitor.

ADDITIONAL INFORMATION

Please refer to the following Unitrode publications for additional information. The following three topics are available in the Applications Handbook.

[1] Application Note U-154, *The New UC3879 Phase-Shifted PWM Controller Simplifies the Design of Zero Voltage Transition Full-Bridge Converters* by Laszlo Balogh.

[2] Application Note U-136, *Phase Shifted, Zero Voltage Transition Design Considerations and the UC3875 PWM Controller* by Bill Andreycak.

Design Note DN-63, *The Current-Doubler Rectifier: An Alternative Rectification Technique for Push-Pull and Bridge Converters* by Laszlo Balogh.

UNITRODE CORPORATION
7 CONTINENTAL BLVD. • MERRIMACK, NH 03054
TEL. (603) 424-2410 FAX (603) 424-3460

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments and its subsidiaries (TI) reserve the right to make changes to their products or to discontinue any product or service without notice, and advise customers to obtain the latest version of relevant information to verify, before placing orders, that information being relied on is current and complete. All products are sold subject to the terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgement, including those pertaining to warranty, patent infringement, and limitation of liability.

TI warrants performance of its semiconductor products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are utilized to the extent TI deems necessary to support this warranty. Specific testing of all parameters of each device is not necessarily performed, except those mandated by government requirements.

CERTAIN APPLICATIONS USING SEMICONDUCTOR PRODUCTS MAY INVOLVE POTENTIAL RISKS OF DEATH, PERSONAL INJURY, OR SEVERE PROPERTY OR ENVIRONMENTAL DAMAGE ("CRITICAL APPLICATIONS"). TI SEMICONDUCTOR PRODUCTS ARE NOT DESIGNED, AUTHORIZED, OR WARRANTED TO BE SUITABLE FOR USE IN LIFE-SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS OR OTHER CRITICAL APPLICATIONS. INCLUSION OF TI PRODUCTS IN SUCH APPLICATIONS IS UNDERSTOOD TO BE FULLY AT THE CUSTOMER'S RISK.

In order to minimize risks associated with the customer's applications, adequate design and operating safeguards must be provided by the customer to minimize inherent or procedural hazards.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right of TI covering or relating to any combination, machine, or process in which such semiconductor products or services might be or are used. TI's publication of information regarding any third party's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

Copyright © 1999, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

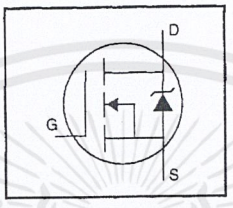
PD-9.512B

International IOR Rectifier

IRFP460

HEXFET® Power MOSFET

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



V_{DSS} = 500V

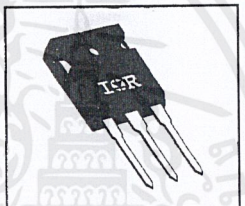
$R_{DS(on)}$ = 0.27Ω

I_D = 20A

Description

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

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



TO-247AC

DATA SHEETS

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ T_C = 25°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10 V	20	A
I_D @ T_C = 100°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10 V	13	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	80	
P_D @ T_C = 25°C	Power Dissipation	280	W
	Linear Derating Factor	2.2	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	±20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	960	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	20	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	28	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	3.5	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1 N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	V_{GS}=0V, I_D= 250μA
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	V/°C	Reference to 25°C, I_D= 1mA
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	V_{GS}=10V, I_D=12A ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V_{DS}=V_{GS}, I_D= 250μA
g_{fs}	Forward Transconductance	13	—	—	S	V_{DS}=50V, I_D=12A ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V_{DS}=500V, V_{GS}=0V
		—	—	250		V_{DS}=400V, V_{GS}=0V, T_J=125°C
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V_{GS}=20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V_{GS}=-20V
Q_g	Total Gate Charge	—	—	210	nC	I_D=20A
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29		V_{DS}=400V
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110		V_{GS}=10V See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	V_{DD}=250V
t_r	Rise Time	—	59	—		I_D=20A
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	110	—		R_G=4.3Ω
t_f	Fall Time	—	58	—		R_D=13Ω See Figure 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	4200	—	pF	V_{GS}=0V
C_{oss}	Output Capacitance	—	870	—		V_{DS}= 25V
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—		f=1.0MHz See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	T_J=25°C, I_S=20A, V_{GS}=0V ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	T_J=25°C, I_F=20A
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	μC	di/dt=100A/μs ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is neglegible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)

② V_{DD}=50V, starting T_J=25°C, L=4.3mH R_G=25Ω, I_{AS}=20A (See Figure 12)

③ I_{SD}≤20A, di/dt≤160A/μs, V_{DD}≤$V_{(BR)DSS}$, T_J≤150°C

④ Pulse width ≤ 300 μs; duty cycle ≤2%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

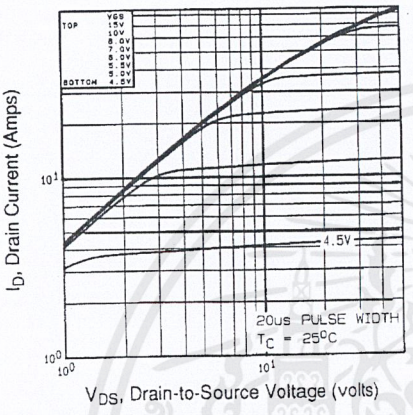


Fig 1. Typical Output Characteristics, T_C=25°C

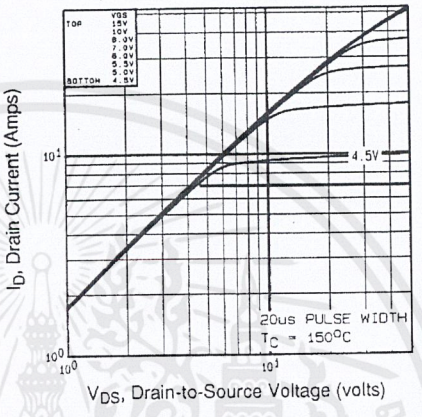


Fig 2. Typical Output Characteristics, T_C=150°C

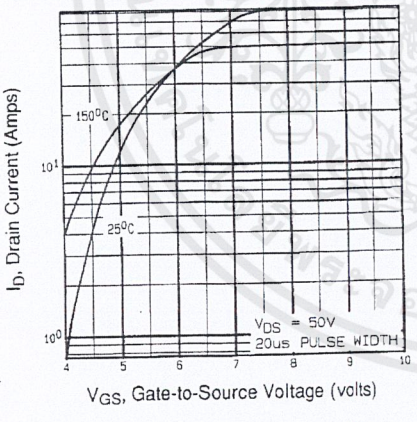


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

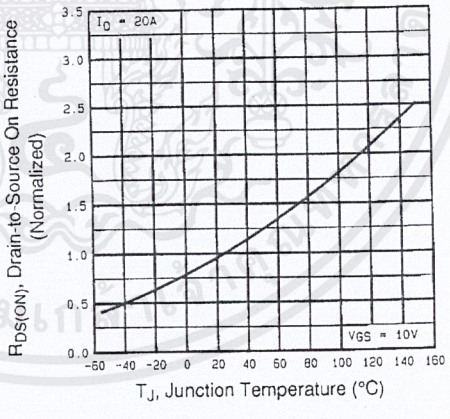


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

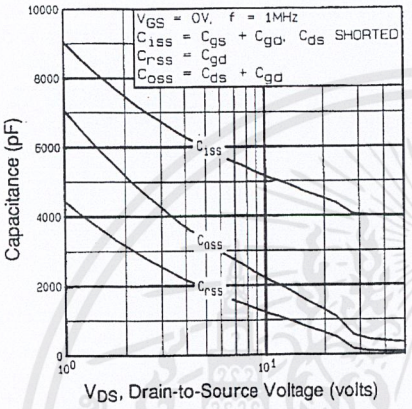


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

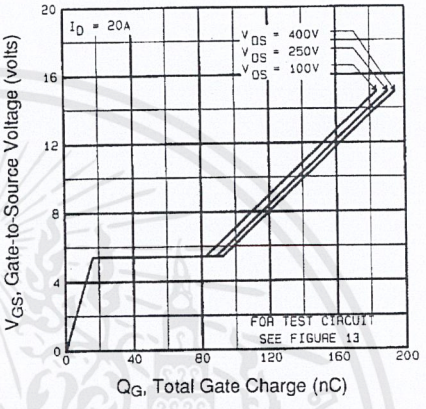


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

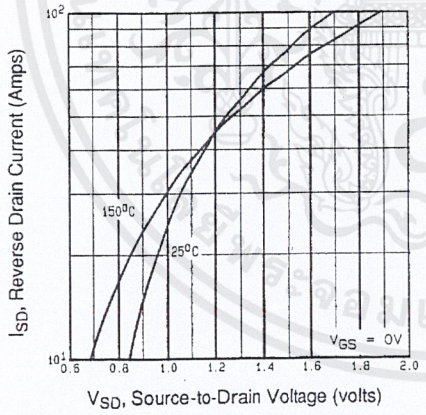


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

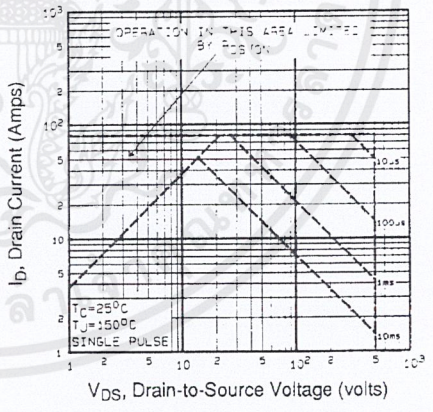


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

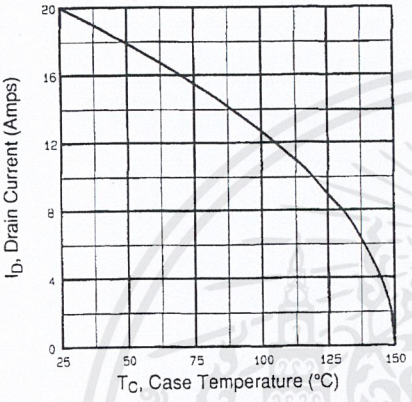


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

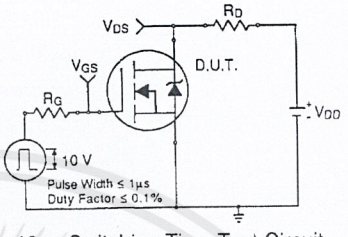


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

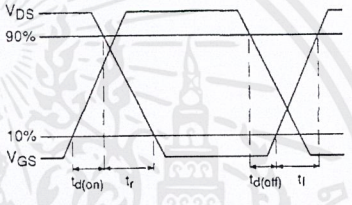


Fig 10b. Switching Time Waveforms

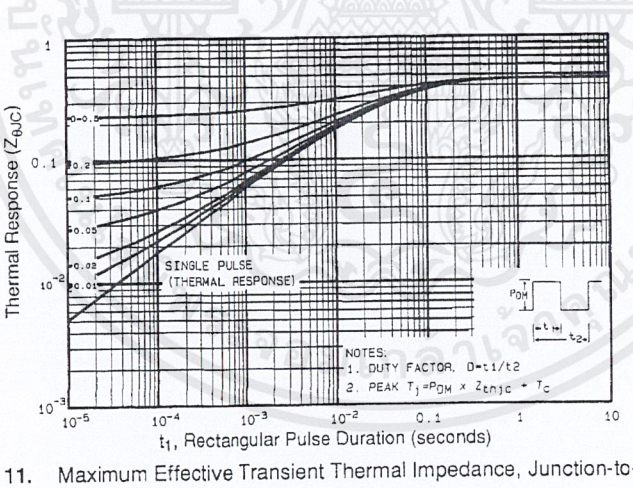


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

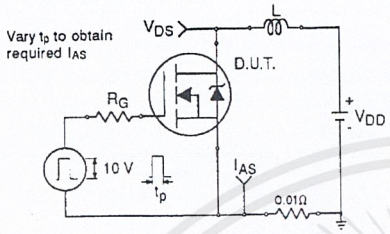


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

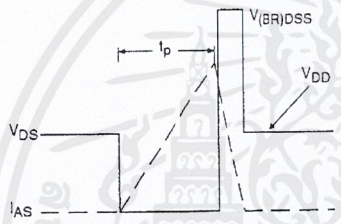


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

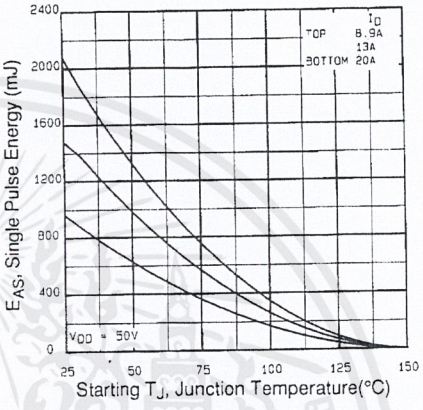


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

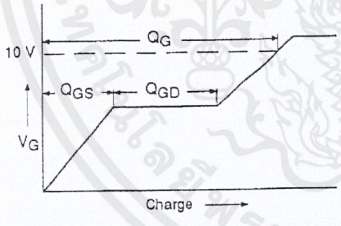


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

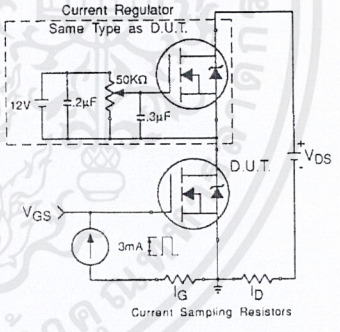


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

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

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

Appendix C: Part Marking Information – See page 1517

International
IOR Rectifier

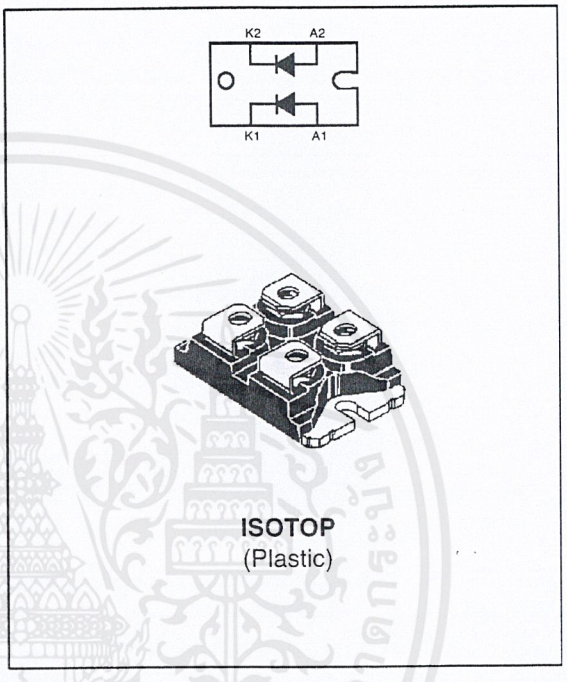
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BYV255V

HIGH EFFICIENCY FAST RECOVERY RECTIFIER DIODES

FEATURES

- SUITED FOR SMPS
- VERY LOW FORWARD LOSSES
- NEGLIGIBLE SWITCHING LOSSES
- HIGH SURGE CURRENT CAPABILITY
- HIGH AVALANCHE ENERGY CAPABILITY
- INSULATED :
  Insulating voltage = 2500 V_{RMS}
  Capacitance = 55 pF



ISOTOP
(Plastic)

DESCRIPTION

Dual rectifier suited for switchmode power supply and high frequency DC to DC converters.
Packaged in ISOTOP™ this device is intended for use in low voltage, high frequency inverters, free wheeling and polarity protection applications.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter			Value	Unit
$I_{F(RMS)}$	RMS forward current		Per diode	150	A
$I_{F(AV)}$	Average forward current $\delta = 0.5$	Tc=110°C	Per diode	100	A
I_{FSM}	Surge non repetitive forward current	tp=10ms sinusoidal	Per diode	1600	A
Tstg Tj	Storage and junction temperature range			- 40 to + 150 - 40 to + 150	°C °C

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{RRM}	Repetitive peak reverse voltage	200	V

ISOTOP is a trademark of STMicroelectronics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMAL RESISTANCE

Symbol	Parameter		Value	Unit
Rth (j-c)	Junction to case	Per diode	0.4	°C/W
		Total	0.25	
Rth (c)	Coupling		0.1	°C/W

When the diodes 1 and 2 are used simultaneously :
Tj-Tc (diode 1) = P(diode 1) x Rth(j-c)(Per diode) + P(diode 2) x Rth(c)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Per diode)
STATIC CHARACTERISTICS

Symbol	Test Conditions		Min.	Typ.	Max.	Unit
I_R *	T_j = 25°C	$V_R = V_{RRM}$			100	µA
	T_j = 100°C				10	mA
V_F **	T_j = 125°C	I_F = 100 A			0.85	V
	T_j = 125°C	I_F = 200 A			1.00	
	T_j = 25°C	I_F = 200 A			1.15	

Pulse test : * tp = 5 ms, duty cycle < 2 %
** tp = 380 µs, duty cycle < 2 %

RECOVERY CHARACTERISTICS

Symbol	Test Conditions			Min.	Typ.	Max.	Unit
trr	T_j = 25°C	I_F = 0.5A I_R = 1A	Irr = 0.25A			55	ns
		I_F = 1A V_R = 30V	dI_F/dt = -50A/µs			80	
tfr	T_j = 25°C	I_F = 1A V_{FR} = 1.1 x V_F	tr = 5 ns		10		ns
V_{FP}	T_j = 25°C	I_F = 1A	tr = 5 ns		1.5		V

TURN-OFF SWITCHING CHARACTERISTICS

Symbol	Test Conditions			Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{RM}	T_j = 100°C	I_F = 100A Lp ® 0.05µH Vcc ® 0.6 V_{RRM}	dIF/dt = -200A/µs			16	A
			dI_F/dt = -400A/µs		24		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig.1 : Average forward power dissipation versus average forward current.

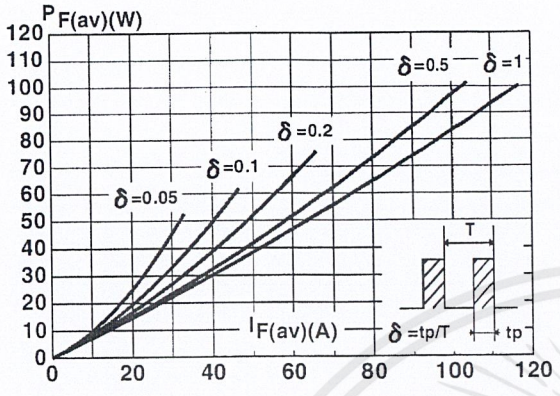


Fig.2 : Peak current versus form factor.

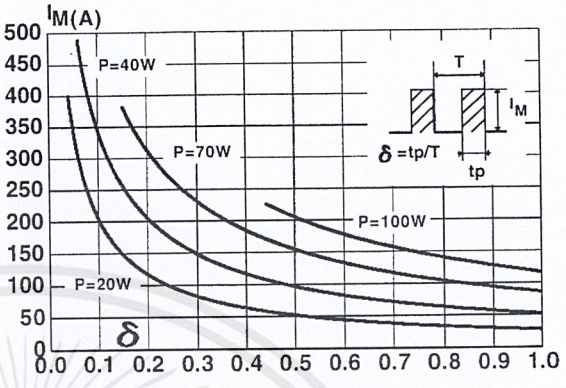


Fig.3 : Forward voltage drop versus forward current (maximum values).

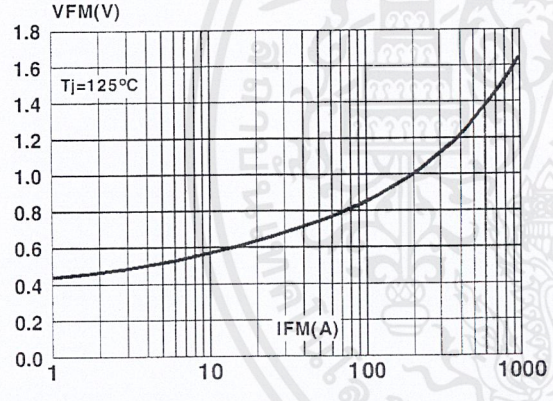


Fig.4 : Relative variation of thermal impedance junction to case versus pulse duration.

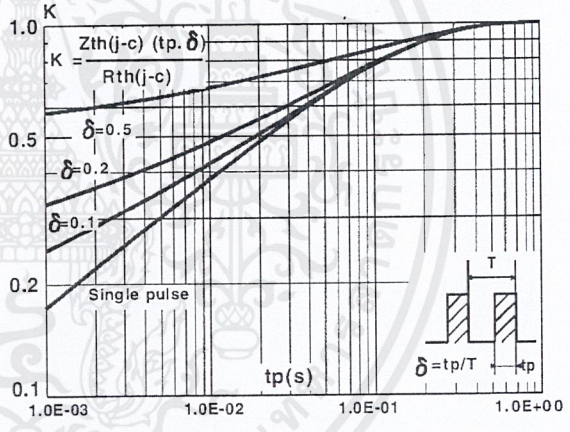


Fig.5 : Non repetitive surge peak forward current versus overload duration.

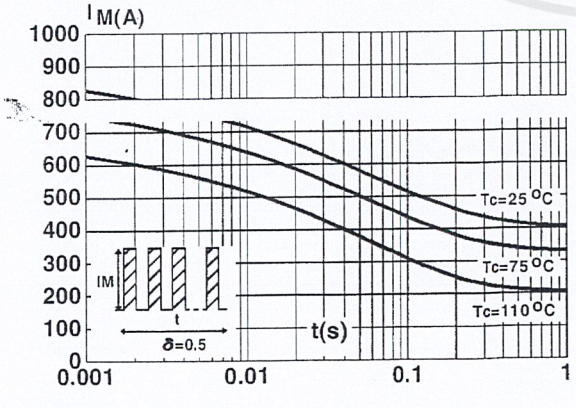
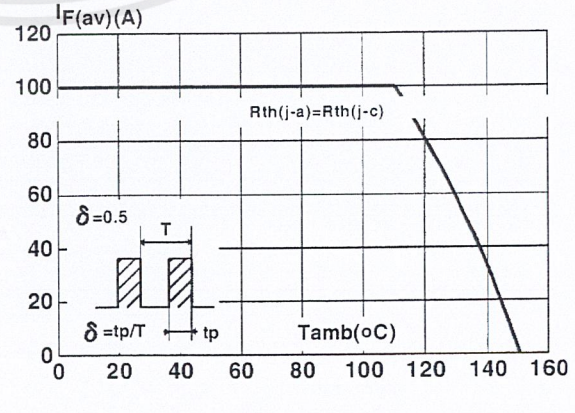


Fig.6 : Average current versus ambient temperature. (duty cycle : 0.5)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig.7 : Junction capacitance versus reverse voltage applied (Typical values).

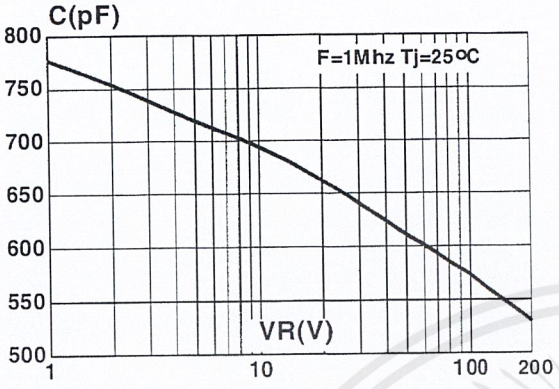


Fig.8 : Recovery charges versus dI_F/dt.

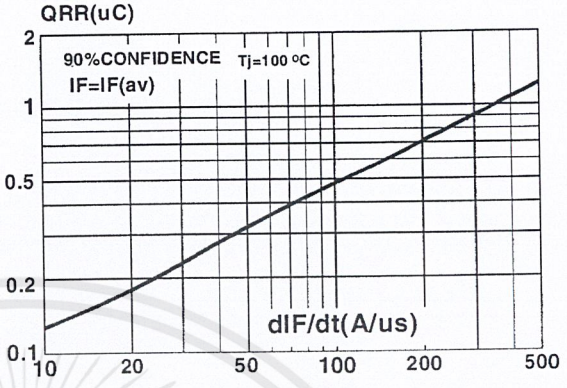


Fig.9 : Peak reverse current versus dIF/dt.

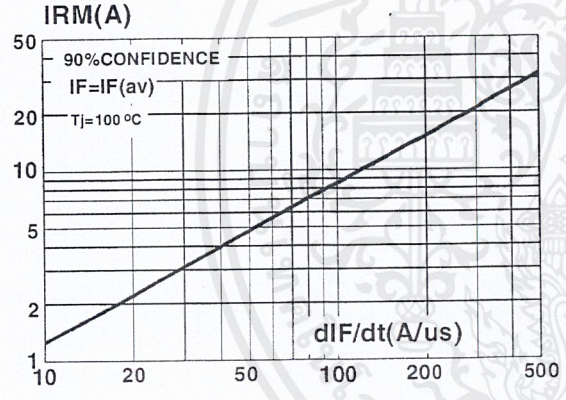
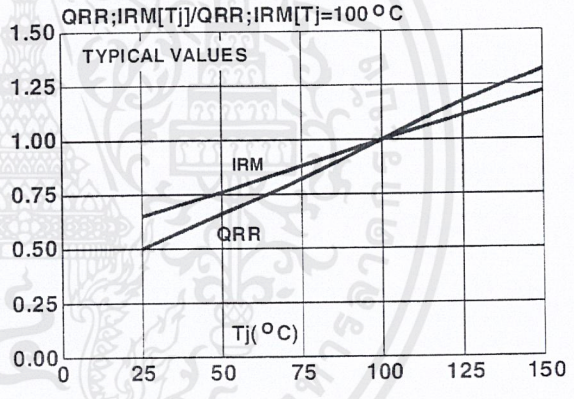


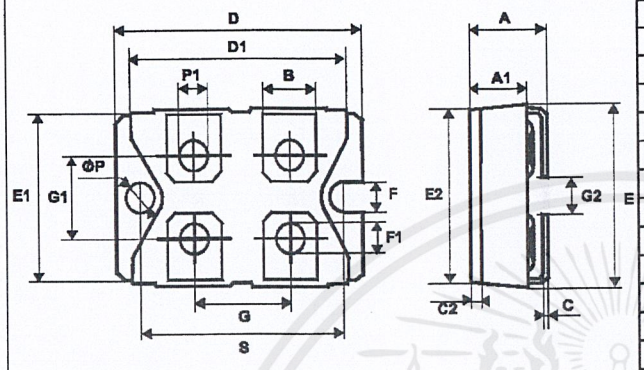
Fig.10 : Dynamic parameters versus junction temperature.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE MECHANICAL DATA

ISOTOP



REF.	DIMENSIONS			
	Millimeters		Inches	
	Min.	Max.	Min.	Max.
A	11.80	12.20	0.465	0.480
A1	8.90	9.10	0.350	0.358
B	7.8	8.20	0.307	0.323
C	0.75	0.85	0.030	0.033
C2	1.95	2.05	0.077	0.081
D	37.80	38.20	1.488	1.504
D1	31.50	31.70	1.240	1.248
E	25.15	25.50	0.990	1.004
E1	23.85	24.15	0.939	0.951
E2	24.80 typ.		0.976 typ.	
G	14.90	15.10	0.587	0.594
G1	12.60	12.80	0.496	0.504
G2	3.50	4.30	0.138	0.169
F	4.10	4.30	0.161	0.169
F1	4.60	5.00	0.181	0.197
P	4.00	4.30	0.157	0.69
P1	4.00	4.40	0.157	0.173
S	30.10	30.30	1.185	1.193

- **Marking** : Type number
- Cooling method : C
- Weight : 27 g
- Epoxy meets UL94, V0

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

The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics

© 2000 STMicroelectronics - Printed in Italy - All rights reserved.

STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

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

http://www.st.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ตามวัตถุประสงค์ ทั้งนี้เนื่องจาก ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จากบุคคลต่อไปนี้

1.) ผศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ
2.) ผศ.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่พวกเราใช้บริการบ่อยที่สุด และรีบตอบ e-mail ทันที เมื่อเรามีปัญหา
3.) อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย
4.) พี่ศักดิ์ พี่ปริญญาโทที่ให้คำแนะนำและปรึกษาปัญหา รวมทั้งให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดเวลาที่ทำโครงงานโดยไม่เคยปฏิเสธ
5.) รุ่นพี่ปริญญาโททุกคน ที่ผ่านเข้ามาให้คำแนะนำและปรึกษา เมื่อพวกเราได้พบปัญหา
6.) เพื่อนๆห้อง B และ ห้อง W ทุกคน ที่ให้คำแนะนำและปรึกษา รวมทั้งให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์เป็นอย่างดี
7.) ร้านก๋วยเตี๋ยวเรือ และ 7-Eleven หน้าภาควิชา ที่ทำให้พวกเรามีเรี่ยวแรงในการทำงานให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี (โฆษณาให้แต่ไม่ได้กินฟรีนะ)

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สถานที่ที่ให้ความรู้และความสามารถ เพื่อพัฒนาพวกเราไปเป็นวิศวกรที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติ ในภายภาคหน้าต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] W.Hart Daniel, "Introduction to Power Electronics," PRENYICE-HALL INTERNATIONAL, INC, 1993.

[2] Marian K. Kazimierczuk and Dariusz Czarkowski, "Resonant Power Converters," John Wiley & Sons,INC, 1995.

[3] Mohan, Undeland and Robbin, "Power Electronics Converter: Appication and design," John & Sons, INC, 1995

[4] Robert Boylestad & Louis Nashelsky, "Electronic Devices and Circuit Theory," Prentice-Hall, Inc,1996.

[5] กิจจา ลักษณ์อำนวยพร, เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์ชิ่ง, วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

[6] มนตรี วิริยะประจักรกุล และ สุภชัย ยุทธนาสิริกุล และ ถาวร ชินวงษ์, เครื่องเชื่อมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง, ปริญญานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543

[7] สุวัฒน์ ดั่น, เทคนิคการออกแบบสวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย, บริษัท เอนเทลไทย จำกัด, 2537

[8] อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, เอกสารประกอบการสอนวิชาการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและหม้อแปลง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.

[9] ปรากฤต เหลี่ยงประดิษฐ์, แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ชิ่งความถี่สูงที่แรงดันสวิตช์ศูนย์, วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้