แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า
High Frequency Half-Bridge Generator in Electrical Surgery

โดย
นายไพบูลย์ วีระโพธิ์ประสิทธิ์
นายภัทรพล วัฒนสุขสกุล
นายภาสพงศ์ พรพัชรพันธ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

High Frequency Half-Bridge Generator in Electrical Surgery

T144353

โดย

นายไพบูลย์ วีระโพธิ์ประสิทธิ์
นายภัทรพล วัฒนสุขสกุล
นายภาสพงศ์ พรพัชรพันธ์

เลขหมู่......
เลขทะเบียน 144353
รับ.เดือน.ปี 24 พ.ย. 2559

b. 13820167
i. ......

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

High Frequency Half-Bridge Generator in Electrical Surgery

Paiboon Weeraproprasit
Phattharaphol Wattanasuksakul
Passapong Pornpacharapan

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIRMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELCTRICAL ENGINEERING
KNIG MONKUT'S INSTITUDE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

ปีการศึกษา 2558

แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

High Frequency Half-Bridge Generator in Electrical Surgery

โดย

นายไพบูลย์ วีระโพธิ์ประสิทธิ์

นายภัทรพล วัฒนสุขสกุล

นายภาสพงศ์ พรพัชรพันธ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นายไพบูลย์ วีระโพธิ์ประสิทธิ์
2. นายภัทรพล วัฒนสุขสกุล
3. นายภาสพงศ์ พรพัชรพันธ์

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)

แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

นายไพบูลย์ วีระโพธิ์ประสิทธิ์
นายภัทรพล วัฒนสุขสกุล
นายภาสพงศ์ พรพัชรพันธ์
รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ(อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอผลการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า โดยใช้วงจรทางอิเลกทรอนิกส์กำลัง ได้แก่ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบเฟสเดียวและวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ โดยหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าคือการใช้ความถี่สูงในการตัดเนื้อตัวอย่างต้องใช้ความถี่สูงเพื่อไม่ให้กล้ามเนื้อเกิดการกระตุกและเพื่อไม่ให้เนื้อเยื่อเกิดการไหม้ โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ แล้วแปลงสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าให้มีความถี่สูงขึ้นถึง 300 กิโลเฮิรตซ์ ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังบริเวณใบมีดเพื่อนำความร้อนไปผ่าตัดเนื้อตัวอย่าง นอกจากนี้ยังใช้วงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มกำลังเอาท์พุทของวงจรและเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์ มีผลทำให้กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตชิ่งล้าหลังแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตชิ่ง แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตชิ่งจะเป็นศูนย์ก่อนที่อุปกรณ์สวิตชิ่งจะเริ่มนำกระแส ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงขึ้น

จากผลการทดสอบ พบว่าเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสามารถส่งผ่านกำลังไปที่ใบมีดผ่าตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถใช้ใบมีดผ่าตัดเนื้อตัวอย่างให้เกิดรอยขาดได้ตามที่ได้คาดหวังไว้

High Frequency Half-Bridge Generator in Electrical Surgery

Paiboon Weerapropasit
Phattharaphol Wattansuksakul
Passapong Pornpacharapan
Anuwat Jangwanitlert (Supervisor)
2015

ABSTRACT

This project presents the design and construction of a High Frequency Half-Bridge Generator in Electrical Surgery which uses a power electronic circuit including a single phase full wave rectifier and a half bridge inverter. It operates by using a high frequency signal passing through the knife to cut the sample without burn and electric shock. So, we use 300 kHz as a switching frequency in the High Frequency Half-Bridge Generator in Electrical Surgery which is supplied by an AC single phase 220 V 50 Hz from MEA. Moreover, this circuit can be improved for the output power with a resonant converter. By using the resonant principle, the converter provides the current passing through the switching device and lagging the voltage of it. Thus, this converter makes the circuit more efficiency and output power.

The experimental results show that the High Frequency Half-Bridge Generator in Electrical Surgery can send the power passing through the knife with high efficiency and can cut the sample as expected.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือและการสนับสนุนเป็นอย่างดีจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานของโครงงานมาโดยตลอด และได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณวทัญญู มีศรีสุข รุ่นพี่ปริญญาเอก และ คุณษมาคม แย้มมณฑา รุ่นพี่-ปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำและให้ความรู้ที่ใช้ในการดำเนินงานโครงงานและคำแนะนำดีๆ เสมอมา

นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ความกรุณา เบิกใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ ตลอดจน คุณกมลวรรณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จที่ใช้ซื้ออุปกรณ์ในโครงงาน

ท้ายที่สุดนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนทางด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน	2
1.4 วิธีที่ใช้ในโครงงาน	3
1.5 แผนการดำเนินงานโครงงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน	6
2.1 การผ่าตัดด้วยไฟฟ้า	6
2.2 ลักษณะวิธีใช้งานของเครื่องผ่าตัดด้วยไฟฟ้า	7
2.3 หลักการเบื้องต้นของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า	8
2.4 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า	9
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานด้านกำลังไฟฟ้า	10
2.6 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบบริดจ์ (Single Phase Bridge Rectifier)	10
2.7 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)	14
2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ (Half Bridge Inverter)	15
2.9 มอสเฟสกำลัง (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)	16
2.10 การสวิทชิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์	18
2.11 หม้อแปลงกำลังไฟฟ้า (Power Transformer)	21
2.12 การออกแบบหม้อแปลงกำลังไฟฟ้าความถี่สูงโดยวิธีผลคูณของพื้นที่	26
2.13 วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน (Parallel Resonant Converter)	29

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.14 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบขนาน 29

2.15 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยวิธีผลคูณของพื้นที่ (Area Product) 31

บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบวงจร 34

3.1 บทนำ 34

3.2 โครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัด 34

3.3 การออกวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Single Phase Full Bridge Rectifier) 35

3.4 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ (Half Bridge Inverter) 37

3.5 การออกแบบวงจรเรโซแนนท์ (Resonance Converter) 39

3.6 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงด้วยวิธีผลคูณของพื้นที่ 40

3.7 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงด้วยวิธีผลคูณของพื้นที่ 45

บทที่ 4 การจำลองการทำงานและผลการทดลอง 50

4.1 บทนำ 50

4.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์ 50

4.3 ผลการจำลองและผลการทดลอง 53

4.3.1 สัญญาณขับเกตมอสเฟต 53

4.3.2 แรงดันตกคร่อมมอสเฟตและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตในสภาวะการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switching: ZVS) 54

4.3.3 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ 56

4.3.4 แรงดันเอาท์พุทขณะมีโหลด 57

4.3.5 แรงดันเอาท์พุทขณะไร้โหลด 59

4.4 สรุปผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง 60

4.4.1 การเปรียบเทียบระหว่างการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง 60

4.4.2 ประสิทธิภาพของวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วย ไฟฟ้า 61

บทที่ 5 สรุปผล 63

เอกสารอ้างอิง 64

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก อุปกรณ์การวัด	66
ภาคผนวก ข ภาพโครงงานโดยรวมของงานวิจัยและภาพต้นแบบงานวิจัย	72
ภาคผนวก ค โค้ดที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์	78
ภาคผนวก ง Datasheet อุปกรณ์	82
ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการ	125
ประวัติผู้เขียน	130

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	หลักการทั่วไปของการจี้ตัดด้วยไฟฟ้าเบื้องต้น	6
2.2	การผ่าตัดด้วยไฟฟ้าในลักษณะ Monopolar	7
2.3	การผ่าตัดด้วยไฟฟ้าในลักษณะ Bipolar	8
2.4	โครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัด	9
2.5	แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่เวลาใดๆ	10
2.6	วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น	11
2.7	แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบเต็มคลื่น	11
2.8	วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอดพร้อมตัวกรองความถี่ด้วยตัวเก็บประจุ	13
2.9	แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นพร้อมตัวเก็บประจุ	13
2.10	แรงดันด้านเข้าและด้านออกของอินเวอร์เตอร์	14
2.11	พิกัดกำลังและช่วงความถี่ใช้งานของอุปกรณ์สวิทชิ่งชนิดต่างๆ	15
2.12	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์	15
2.13	ความสัมพันธ์กระแสเดรน และแรงดันที่ขาเดรนกับซอสของมอสเฟตกำลัง	17
2.14	มอสเฟตกำลังชนิด N-Channel	18
2.15	การสร้างสัญญาณมอดดูเลชั่นโดยพีดับเบิลยูเอ็ม	19
2.16	ภาพอธิบายกฎของแอมแปร์	21
2.17	ส่วนประกอบของหม้อแปลงประเภท SHELL TYPE	22
2.18	เส้นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กของหม้อแปลงประเภท CORE TYPE และ SHELL TYPE	22
2.19	อัตราส่วนขดลวดของหม้อแปลง	23
2.20	วงจรสมมูลของหม้อแปลงกำลังไฟฟ้า	23
2.21	การทดสอบหม้อแปลง Open Circuit Test	24
2.22	การทดสอบหม้อแปลง Short Circuit Test	25
2.23	พื้นที่การพันลวดของแกน, พื้นที่พันลวดของขดลวดปฐมภูมิและ ทุติยภูมิ	26
2.24	Skin depth บนภาพตัดขวางของตัวนำ	28
2.25	วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน	29
2.26	อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบขนาน	29
2.27	ผลตอบสนองของวงจรเรโซแนนท์แบบขนานที่ความถี่ต่างๆ	30
2.28	พื้นที่การพันลวดของแกนเหนี่ยวนำ	31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.1	บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัด	34
3.2	วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์พร้อมชุดวงจรกรอง	35
3.3	แรงดันที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์	36
3.4	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์	37
3.5	แรงดันที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์	38
3.6	แรงดันที่โหลดหลังจากที่ได้เพิ่มเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์	39
3.7	กระแสที่โหลดหลังจากที่ได้เพิ่มเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์	39
3.8	ไดเมนชั่นของแกน ETD (1)	41
3.9	Window และ Surface Area (1)	42
3.10	ไดเมนชั่นของแกน ETD (2)	46
3.11	Window และ Surface Area (2)	47
4.1	วงจรที่ใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink	51
4.2	สัญญาณขับเกตของมอสเฟต S_1	53
4.3	สัญญาณขับเกตของมอสเฟต S_2	53
4.4	รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต S_1 จากผลการทดลองที่โหลด 300 โอห์ม	54
4.5	รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต S_1 จากผลการจำลองที่โหลด 300 โอห์ม	54
4.6	รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต S_2 จากผลการทดลองที่โหลด 300 โอห์ม	55
4.7	รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ผ่านไหลมอสเฟต S_2 จากผลการจำลองที่โหลด 300 โอห์ม	55
4.8	รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์จากผลการทดลองที่โหลด 300 โอห์ม	56
4.9	รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์จากผลการจำลองที่โหลด 300 โอห์ม	56
4.10	รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทที่โหลดจากผลการทดลองที่โหลด 300 โอห์ม	57
4.11	รูปคลื่นแรงดันขณะที่ใช้มีดผ่าเนื้อตัวอย่าง (อกไก่)	58
4.12	รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทที่สภาวะโหลดจากการจำลองที่โหลด 300 โอห์ม	58
4.13	รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทจากผลการทดลองขณะไร้โหลด	59
4.14	รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทจากการจำลองขณะไร้โหลด	59

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 การวัดกำลังเอาท์พุทของวงจรจากการทดลอง	61
4.16 การผ่าเนื้อตัวอย่าง (อกไก่)	62

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนการดำเนินโครงงานวิศวกรรม 1 4
1.2 แผนการดำเนินโครงงานวิศวกรรม 2 4
2.1 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ 16
2.2 สัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิด Enhancementและมอสเฟตชนิด Depletion 17
3.1 การเปรียบเทียบสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 38
3.2 ขนาดไดเมนชั่นของแกน ETD 49 41
3.3 ค่าW, A, T และ Ap ของแกน ETD 49 42
3.4 จำนวนรอบการพันของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ 43
3.5 ชนิดของตัวนำและจำนวนสายตีเกลียวของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ 45
3.6 ขนาดไดเมนชั่นของแกน ETD 39 46
3.7 ค่าW, A, T และ Ap ของแกน ETD 39 47
3.8 จำนวนรอบการพันของขดลวดตัวนำ 48
3.9 ชนิดของตัวนำและจำนวนสายตีเกลียวของลวดตัวนำ 49
4.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink 52
4.2 การเปรียบเทียบแรงดันระหว่างผลการทดลองและผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ 60
4.3 การเปรียบเทียบแรงดันเอาท์พุทระหว่างโหลด 300 โอห์มและโหลดที่ใช้ผ่า (อกไก่) 60
4.4 กำลังอินพุทและกำลังเอาท์พุท 62

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

กระแสไฟฟ้ามักจะถูกกล่าวว่าเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ แต่ถ้ามีการประยุกต์ใช้อย่างถูกต้อง กระแสไฟฟ้าสามารถนำไปใช้ในการผ่าตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานพลังงานไฟฟ้าบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปพลังงานความร้อนหรือแสง โดยร่างกายมนุษย์นั้นก็เปรียบเสมือนตัวต้านทาน โดยเซลล์ในร่างกายมนุษย์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำ ซึ่งน้ำบริสุทธิ์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ร่างกายมนุษย์มีเกลือ ไขมันและโปรตีน ฯลฯ ทำให้เซลล์ในร่างกายมนุษย์มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ นอกจากนี้แล้วกระแสไฟฟ้ายังส่งผลต่อการกระตุ้นกล้ามเนื้อ ระบบประสาท การทำงานของสมองและอัตราการเต้นของหัวใจ ดังนั้นในการผ่าตัดโดยใช้กระแสไฟฟ้าจึงต้องควรระมัดระวังอย่างมาก จากการที่เคยมีการทดลองพบว่าระบบประสาทของมนุษย์จะตอบสนองต่อความถี่ตั้งแต่ 0-100 Hz ถ้าใช้ความถี่ที่อยู่ในช่วงดังกล่าวจะเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ ดังนั้นการผ่าตัดโดยใช้กระแสไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีความถี่ที่สูงเพียงพอ (RF frequency) ก็จะทำให้ไม่เกิดอันตรายต่อร่างกายมนุษย์

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าเริ่มนิยมนำมาใช้มากขึ้น เนื่องจากการผ่าตัดด้วยไฟฟ้านั้นสามารถลดความเสียหายที่เกิดจากการใช้มีดผ่าตัดปกติ เช่น เลือด น้ำเหลือง กล่าวคือการผ่าตัดด้วยมีดไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนสูงที่จุดสัมผัส เป็นผลให้เส้นเลือดฝอยและท่อน้ำเหลืองหดตัว ทำให้น้ำเหลืองและเลือดไม่ไหลออกจากเนื้อเยื่อที่ถูกตัด เป็นต้น แต่เนื่องด้วยการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าอุปกรณ์ที่ใช้ในการผ่าตัดมีราคาที่สูงมาก ในการทำการวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องผ่าตัดด้วยไฟฟ้าให้มีราคาถูกกว่าที่มีขายทั่วไปและลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

การผ่าตัดด้วยไฟฟ้าเป็นการประยุกต์ใช้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงในการผ่าตัดเนื้อเยื่อ โดยหลักการที่สำคัญของการผ่าตัดด้วยไฟฟ้านั้นคือกระแสไฟฟ้า โดยที่ปลายของมีดผ่าตัด (Active Electrode) จะมีความหนาแน่นกระแสสูง เมื่อกระแสไหลผ่านเนื้อเยื่อของมนุษย์กระแสจะกระจายผ่านไปในทันทีในร่างกายลงไปที่แผ่นกราวด์ (Return Electrode) ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นต่อเซลล์มีค่าลดลง และในการผ่าตัดด้วยกระแสไฟฟ้านั้นอุปกรณ์จะมีการประยุกต์ใช้ Isolate transformer เพื่อแยกกราวด์ของระบบออกจากกันเพื่อเพิ่มความปลอดภัย โดยหลักการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าเนื้อเยื่อจะได้รับความร้อนโดยกระแสไฟฟ้า บริเวณที่จุดสัมผัสจะเกิดความร้อนสูงทำให้เนื้อเยื่อสุกและแห้งเป็นผลทำให้เส้นเลือดฝอยและท่อน้ำเหลืองหดตัว ทำให้ไม่มีน้ำเหลืองและเลือดไหลออกมาจากบริเวณที่ได้รับการผ่าตัด กระแสไฟฟ้าจะทำให้เซลล์เนื้อเยื่อแยกออกจากกันทำให้เกิดลักษณะเหมือนเนื้อเยื่อที่ถูกตัดด้วยมีด ซึ่งลักษณะของการผ่าตัดและห้ามเลือดจะขึ้นอยู่กับการการควบคุมปริมาณความ

หนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงที่จ่ายให้กับเครื่องมือผ่าตัดจึงมีความสำคัญมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

จากข้อดีของการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าที่อธิบายไปแล้วในข้างต้นนั้น จึงเป็นที่สนใจในการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าโดยใช้วงจรและอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ภายในประเทศและเป็นนวัตกรรมของคนไทย อย่างไรก็ตามหากได้ทำการวิจัยเพิ่มเติมและปรับปรุงอย่างต่อเนื่องจะสามารถพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและทางด้านชีวการแพทย์ของประเทศให้มีความทันสมัยมากขึ้น ซึ่งอย่างน้อยผู้วิจัยหวังว่าผู้ที่สนใจงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและชีวการแพทย์จะสามารถเรียนรู้วิธีการสร้างและการทำงานของเครื่องผ่าตัดโดยใช้การอาร์คไฟฟ้าซึ่งแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งจะนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีวัตถุประสงค์หลักๆ คือ

1. เพื่อศึกษาและออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องผ่าตัดทางไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาและออกแบบวงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์
3. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และทางด้านชีวการแพทย์

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

เครื่องมือผ่าตัดไฟฟ้าต้นแบบที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นนี้ เพื่อต้องการศึกษาหลักการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและต้องการสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อการผ่าตัดให้ใช้งานได้จริงและมีประสิทธิภาพสูงตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ โดยมีแนวทางในการวิจัยมีดังนี้

1. ออกแบบและทดสอบคุณสมบัติของแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อการผ่าตัดที่ได้สร้างขึ้นและเป็นต้นแบบในการพัฒนาการใช้งานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
2. ศึกษาข้อมูลพื้นฐานสำหรับพัฒนาวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัดโดยมีพิกัดของเครื่องมือที่ได้ออกแบบสร้างมีรายละเอียดดังนี้
    - แรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต 220 V ความถี่ 50 Hz
    - กำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด 225 W โดยมีแรงดันขณะสภาวะไร้โหลดที่มากกว่า 220 V ที่ความถี่ 300 kHz
    - สามารถสร้างสปาร์คที่มีคุณสมบัติในการตัดชิ้นเนื้อตัวอย่างได้

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

ใช้วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าโดยที่รับไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (220 V, 50 Hz) เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มาจ่ายเข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ (ซึ่งใช้มอสเฟตในการสวิตชิ่ง) ในการควบคุมสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นลักษณะสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มความถี่สูง (300 kHz) เพื่อส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรดเพื่อนำไปสร้างเป็นสปาร์ค ในเครื่องผ่าตัดแบบไฟฟ้าสำหรับการผ่าตัด

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ในการศึกษาค้นคว้ารวมถึงขั้นตอนต่างๆ จะเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของปริญญานิพนธ์ รวมทั้งหลักการทำงานของวงจรสวิทชิ่ง, วงจรคอนเวอร์เตอร์และเครื่องมือผ่าตัดที่มีอยู่โดยทั่วไปโดยการศึกษารายละเอียดของการทำงานในส่วนต่างๆ ตามเงื่อนไขที่ได้วางไว้ พร้อมกับการจำลองผลการออกแบบบางส่วน เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและนำมาปรับปรุงเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น จากนั้นทำการซื้ออุปกรณ์พร้อมออกแบบลายวงจรและทำการประกอบเป็นเครื่องมือผ่าตัดไฟฟ้า หลังจากประกอบตัวเครื่องเรียบร้อยแล้วก็ทำการเก็บผลโดยการตัดชิ้นเนื้อตัวอย่าง พร้อมนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณภาพของรอยตัดชิ้นเนื้อตัวอย่าง ส่วนขั้นตอนสุดท้ายเป็นส่วนของการสรุปผลและข้อเสนอแนะที่ได้จากปริญญานิพนธ์นี้ โดยการประกอบเป็นแหล่งจ่ายเครื่องมือผ่าตัดได้นั้นมีขั้นตอนการสร้างดังนี้

1. สร้างวงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอด
2. สร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ความถี่สูงโดยใช้มอสเฟตในการสวิทชิ่ง
3. สร้างวงจรควบคุมเพื่อใช้จ่ายสัญญาณในการขับเกตให้แก่มอสเฟตในการสวิตช์
4. เขียนโปรแกรมควบคุมให้ได้สัญญาณทางไฟฟ้าเป็นพีดับเบิลยูเอ็มความถี่สูง
5. ทำการทดลองที่แต่ละจุดการทำงานและศึกษาลักษณะรอยการตัดที่ได้บนชิ้นเนื้อตัวอย่าง

ตารางที่1.1 แผนการดำเนินโครงงานวิศวกรรม 1

การดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน				
	ส.ค. 58	ก.ย. 58	ต.ค. 58	พ.ย. 58	ธ.ค. 58
1.วางแผนการดำเนินงาน ศึกษาข้อมูล	↔				
2.ออกแบบวงจรrectifier		↔			
3.ออกแบบวงจรinverter			↔		
4.ออกแบบวงจรresonant converter				↔	
5.จำลองผลการออกแบบวงจร				↔	
6.รายงานความก้าวหน้าครั้งที่1					↔
7.สอบโครงร่างปริญญานิพนธ์					↔

ตารางที่1.2 แผนการดำเนินโครงงานวิศวกรรม 2

การดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน					
	ธ.ค. 58	ม.ค. 58	ก.พ. 58	มี.ค. 58	เม.ย. 58	พ.ค. 58
1.สร้างวงจร Half Bridge Inverter	↔					
2.สร้างชุดวงจรควบคุม Half Bridge Inverter	↔					
3.เขียนโปรแกรมควบคุมสัญญาณ PWM		↔				
4.ออกแบบและสร้างหม้อแปลงความถี่สูง			↔			
5.สร้างวงจร resonant converter				↔		
6.ทดสอบวงจรที่ได้สร้างมาข้างต้น				↔		
7.ปรับปรุงและแก้ไขวงจรให้เหมาะสม					↔	
8.รายงานความคืบหน้าของปริญญานิพนธ์						↔
9.สอบปริญญานิพนธ์						↔

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

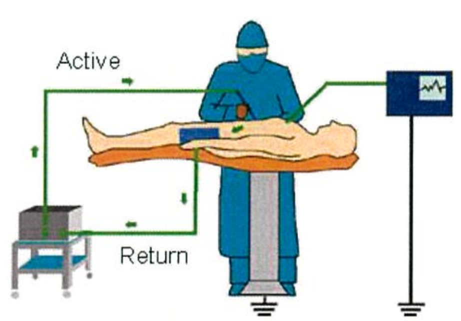
จากปัญหาในการใช้มีดผ่าตัดทำให้เกิดแผลที่เกิดขึ้นมีแผลขนาดใหญ่และมีเลือดออกเป็นจำนวนมากภายหลังจากการผ่าตัด จึงมีการคิดค้นการผ่าตัดโดยใช้ไฟฟ้า เพื่อให้การผ่าตัดนั้นเกิดแผลที่มีขนาดเล็กและมีเลือดออกน้อยลง อีกทั้งยังได้เรียนรู้เกี่ยวกับการออกแบบวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ การสร้างวงจรหรืออุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและทางด้านชีวการแพทย์

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

2.1 การผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

การผ่าตัดด้วยเครื่องจี้ตัดด้วยไฟฟ้า โดยทั่วไปอาศัยหลักการทางไฟฟ้าของเครื่องเชื่อมไฟฟ้า ที่ทำให้เกิดการสปาร์คหรือการอาร์คของกระแสไฟฟ้า เพื่อให้เกิดความร้อนสูง (ประมาณ 1,000องศาเซลเซียส) เมื่อเนื้อเยื่อมีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ของเหลวภายในเซลล์ (น้ำ) จะเดือดกลายเป็นไอ แห้งจนปริแตกแยกออกจากกันหรือหากมีการควบคุมอุณหภูมิให้พอเหมาะ (ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส) ก็สามารถทำให้ของเหลวในเซลล์หรือเม็ดเลือดแห้งแข็งจับตัวกันเป็นก้อนปิดหลอดเลือด ซึ่งเป็นการห้ามเลือด (Hemostatic effect) ปรากฏการณ์ที่เกิดจากการใช้เครื่องจี้ตัดด้วยไฟฟ้าจะมีอยู่ 2 ช่วง ดังนี้

1. ความต้านทานของเนื้อเยื่อจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเป็นศูนย์
2. ความต้านทานของเนื้อเยื่อจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากที่น้ำหรือของเหลวภายในเนื้อเยื่อแห้งไปอย่างรวดเร็วจนเนื้อเยื่อเกิดระเบิดแยกแตกออกจากกัน



รูปที่ 2.1 หลักการทั่วไปของการจี้ตัดด้วยไฟฟ้าเบื้องต้น

จากรูปที่ 2.1 เครื่องจี้ตัดด้วยไฟฟ้าจะปล่อยกระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหล ผ่าน Active Electrode ไปยังจุดที่จะทำการผ่าตัด แล้วกระแสไฟฟ้าความถี่สูงนี้จะสปาร์คผ่านเนื้อเยื่อหรือจุดที่ทำการผ่าตัด แล้วกระจายผ่านเนื้อเยื่อไปยังจุดต่างบน Plate Electrode เพื่อลดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตรงทางที่กระแสไฟฟ้าไหลออกจากเนื้อเยื่อ (ลดความร้อนที่จะเกิดขึ้น) แล้วกลับไปครบวงจรที่เครื่องจี้ตัดด้วยไฟฟ้า

เทคนิคที่ใช้สำหรับเครื่องจี้ตัดด้วยไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วจะมีอยู่ 3 ลักษณะด้วยกันคือ

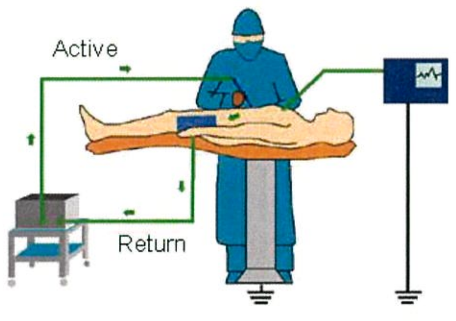
1. ตัด (Cut)
2. จี้ห้ามเลือด (Coagulating)
3. ตัดพร้อมจี้ห้ามเลือดไปด้วย (Blend)

2.2 ลักษณะวิธีการใช้งานของเครื่องผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

ลักษณะวิธีการใช้งานของเครื่องผ่าตัดด้วยไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

2.2.1 แบบ Monopolar

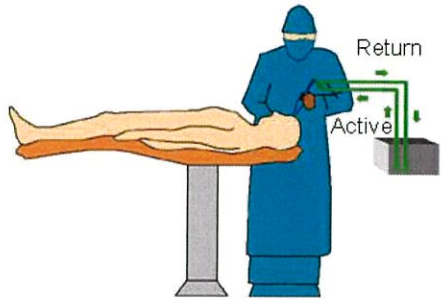
เป็นการแยกอิเล็กโทรดทั้งสองออกจากกัน เหมาะสำหรับการผ่า (Cut) ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสูงๆ



รูปที่ 2.2 การผ่าตัดด้วยไฟฟ้าในลักษณะ Monopolar

2.2.2 แบบ Bipolar

เป็นการรวมเอาอิเล็กโทรดทั้งสองอยู่ด้วยกันบนด้ามจี้ตัดตัวเดียวกัน โดยกระแสจะไหลออกจากขาข้างหนึ่งไปยังขาอีกข้างหนึ่งซึ่งก็จะเกิดความร้อนขึ้นระหว่างขาทั้งสอง กระแสความถี่สูงสำหรับการใช้วิธีนี้จะไม่มีการผ่านลงดินจะอยู่ระหว่างปลายทั้งสองข้างและจะไม่ผ่านตัวของผู้ป่วยโดยจะผ่านเฉพาะตรงบริเวณที่จะทำการจี้ตัดออกเท่านั้น วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับการจี้ตัด หรือการจี้ตัดพร้อมห้ามเลือดเฉพาะที่หรือบริเวณเนื้อเยื่อที่มีพื้นที่ไม่กว้างมากนัก เส้นเลือดที่ละเอียดอ่อนไม่มีการทำลายเนื้อเยื่อหรือเส้นประสาทข้างเคียงและใช้พลังไฟฟ้าไม่สูงมาก ในบางครั้งจึงเรียกวิธีการจี้ตัดแบบนี้ว่าการทำจุลศัลยกรรม เช่น การห้ามเลือดที่ต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษและการทำศัลยกรรมทางด้านระบบประสาท



รูปที่ 2.3 การผ่าตัดด้วยไฟฟ้าในลักษณะ Bipolar

2.3 หลักการเบื้องต้นของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

ในการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัดที่มีความถี่สูงนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการสร้างไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง มีหลักการที่สำคัญคือการแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน โดยการสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (300 kHz) ให้แก่อิเล็กโทรดใช้งานซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อยมาก (ความหนาแน่นกระแสสูง) ทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนมีความหนาแน่นมาก จากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งออกจากอิเล็กโทรดใช้งานผ่านเนื้อเยื่อเพื่อมุ่งเข้าสู่อิเล็กโทรดอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นแผ่น (Plate) ที่มีพื้นที่ผิวมาก (ความหนาแน่นกระแสต่ำ) ทำให้เกิดความร้อนซึ่งมีผลกระทบต่อเนื้อเยื่อทำให้เนื้อเยื่อฉีกออกได้

การควบคุมผลของความร้อนต่อเนื้อเยื่อสำหรับการผ่าตัดจะใช้วิธีการควบคุมความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า โดยขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสและแรงดันด้านออกของเครื่อง ขนาดของอิเล็กโทรด สภาพของอิเล็กโทรด ลักษณะของเนื้อเยื่อ ความเร็วในการตัดและความถี่ของกระแสไฟฟ้า

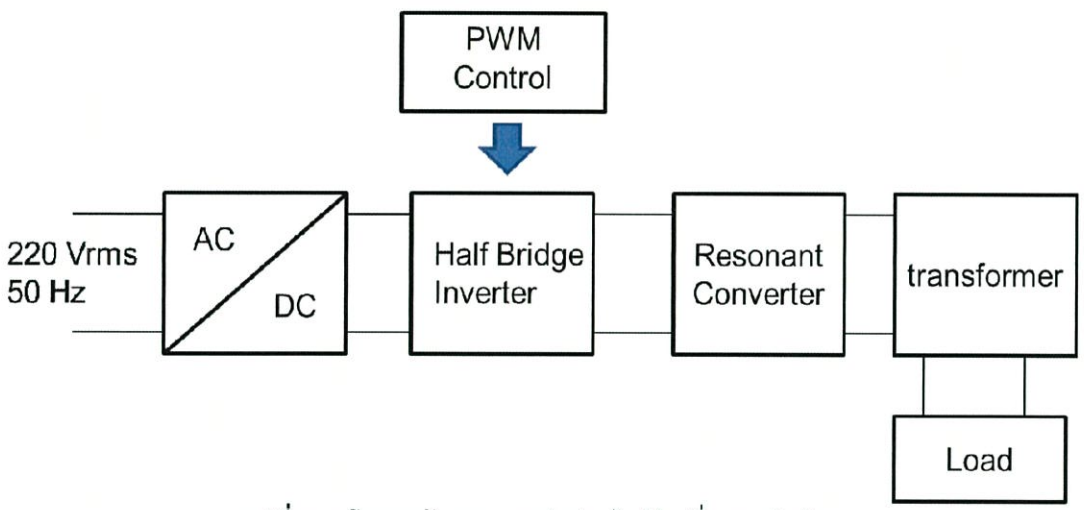
จากการศึกษาผลการตอบสนองของเนื้อเยื่อต่อกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ พบว่าไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่สูง (มากกว่า 200 kHz) มีความสามารถในการกระตุ้นเส้นประสาทหรือกล้ามเนื้อต่ำ ส่งผลให้เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับในย่านความถี่นี้ให้กับเนื้อเยื่อในบริเวณใดๆ เนื้อเยื่อที่บริเวณนั้นจะได้รับผลเฉพาะพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในรูปความร้อนเท่านั้น โดยทางการแพทย์สามารถนำสัญญาณไฟฟ้าที่ย่านความถี่นี้ไปใช้ในการผ่าตัดได้ ดังนั้นแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัดจึงใช้ความถี่สูงเพื่อลดผลการกระตุกของกล้ามเนื้อ

2.4 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

แหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัด โดยทั่วไปประกอบด้วยวงจร หรือส่วนประกอบสำคัญ ดังรูปที่ 2.4

จากรูปที่ 2.4 เป็นส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัดที่ทำการออกแบบสร้าง โดยการออกแบบก็จะมีส่วนประกอบที่สามารถแยกออกเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

1. วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Single Phase Full Bridge Rectifier)
2. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับแบบกึ่งบริดจ์ (Half-Bridge Inverter)
3. ชุดวงจรควบคุมสัญญาณขับเกต (PWM Control)
4. เรโซแนนท์คอนเวอเตอร์ (Resonant Converter)
4. หม้อแปลงความถี่สูง (High Frequency Transformer)
5. มีดหรือตัวนำไฟฟ้า (Blade)



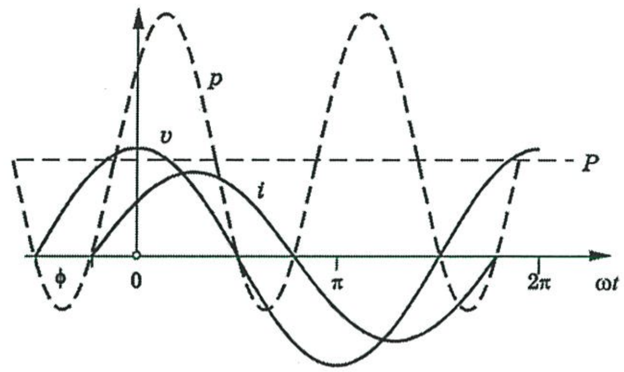
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัด

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านกำลังไฟฟ้า

2.5.1 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ

กำลังไฟฟ้าชั่วขณะเท่ากับผลคูณของค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าชั่วขณะ

$$p(t)=v(t)\cdot i(t) \tag{2.1}$$



รูปที่ 2.5 แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่เวลาใดๆ

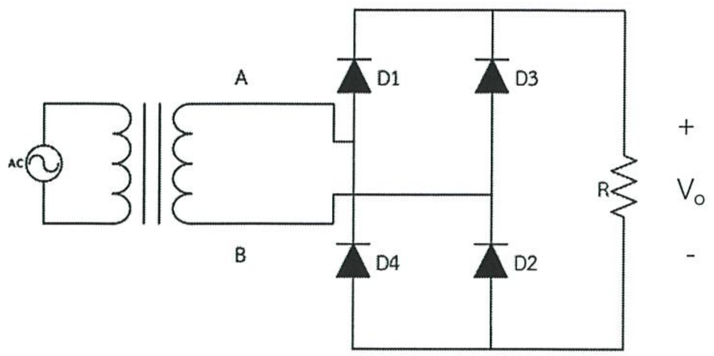
2.5.2 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

ถ้ารูปคลื่นแรงดันและกระแสมีคาบเวลาซ้ำๆ กัน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจะหาได้ตามสมการที่ 2.6

$$P_{avg}=\frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt=\frac{1}{T}\int_0^T v(t)\cdot i(t)dt \tag{2.2}$$

2.6 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบบริดจ์ (Single Phase Bridge Rectifier)

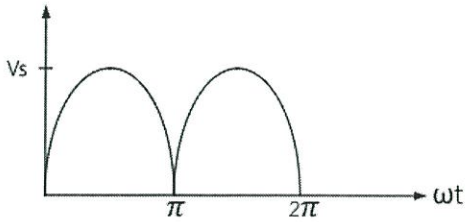
วงจรเรียงกระแสมีวัตถุประสงค์เพื่อแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีความเป็นไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุด วงจรเรียงกระแสมีทั้งที่เป็นแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่นแบบครึ่งคลื่นมักจะใช้เมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าโหลดมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นจะมีกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยด้านเข้ามีค่าไม่เป็นศูนย์ทำให้เกิดปัญหาที่หม้อแปลงอิ่มตัวได้ง่าย ส่วนวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นจะนิยมใช้ในงานที่มีพิกัดกำลังสูงและมีค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นศูนย์ทำให้เกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงที่ต่อกับวงจรด้านเข้ายากกว่าแบบครึ่งคลื่น



รูปที่ 2.6 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

2.6.1 หลักการทำงานของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด

1. การทำงานของไดโอดจะนำกระแสเป็นคู่โดยไดโอด D1 และ D2 ทำงานคู่กัน และไดโอด D3 และ D4 ทำงานคู่กันเป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าโหลดเป็นบวกหรือเป็นศูนย์ไม่มีโอกาสเป็นลบ ดังรูปที่ 2.6
2. เมื่อไดโอด D1 และ D2 นำกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดจะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย เมื่อไดโอด D3 และ D4 นำกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดจะตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายคือเท่ากับ Vs ดังรูปที่ 2.7
3. ค่าแรงดันไฟฟ้าไบอัสย้อนกลับสูงสุดที่ตกคร่อมไดโอดจะเท่ากับค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย กล่าวคือเมื่อไดโอด D1 นำกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด D3 จะตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย
4. กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายเข้าไปในวงจรบริดจ์ไดโอด คือ iD1
5. ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะเท่ากันกับค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสโหลด
6. ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นสองเท่ากับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย โดยที่แรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์จะประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและฮาร์มอนิกส์ลำดับคู่



รูปที่ 2.7 แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบเต็มคลื่น

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

$$V_o(\omega t) = \begin{cases} V_m \sin(\omega t) & \text{สำหรับ} \quad 0 \le \omega t \le \pi \\ -V_m \sin(\omega t) & \text{สำหรับ} \quad \pi \le \omega t \le 2\pi \end{cases}$$

องค์ประกอบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกจะหาได้จากค่าเฉลี่ย

$$V_o = V_{av} \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} [V_m \sin(\omega t)] d\omega t = \frac{2Vm}{\pi} \tag{2.3}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{2V_m}{\pi R} \tag{2.4}$$

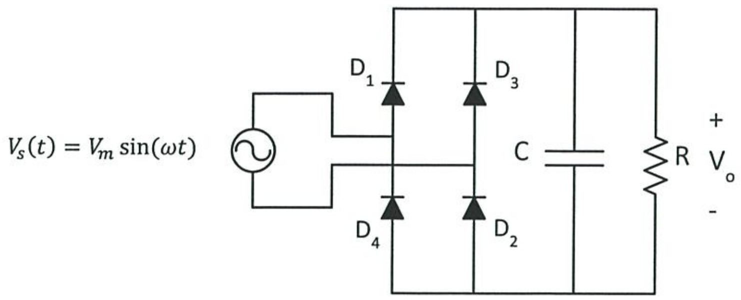
กำลังไฟฟ้าที่โหลดตัวต้านทานจะมีค่าเท่ากับ $I_{rms}{}^2R$ หรือ $\frac{V_{rms}{}^2}{R}$ โดยที่ค่าอาร์เอ็มเอ็ส ของกระแสสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นจะเป็นสัญญาณไซน์ ทำให้มีค่าดังสมการที่ 2.5 และ ค่าอาร์เอ็มเอ็สของแรงดันมีค่าดังสมการที่ 2.6

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \tag{2.5}$$

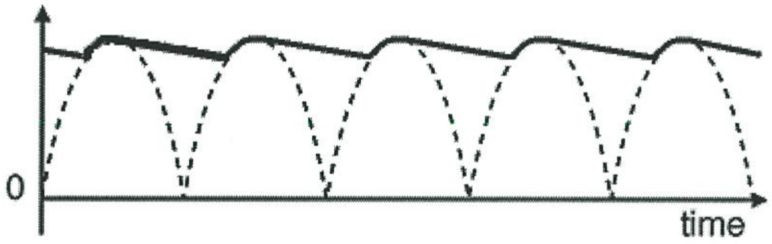
$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \tag{2.6}$$

2.6.2 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอดพร้อมตัวกรองความถี่ด้วยตัวเก็บประจุ

การต่อตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุสูงๆ ขนานกับโหลดตัวต้านทานองวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอดจะสามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอดพร้อมตัวกรองความถี่ด้วยตัวเก็บประจุ

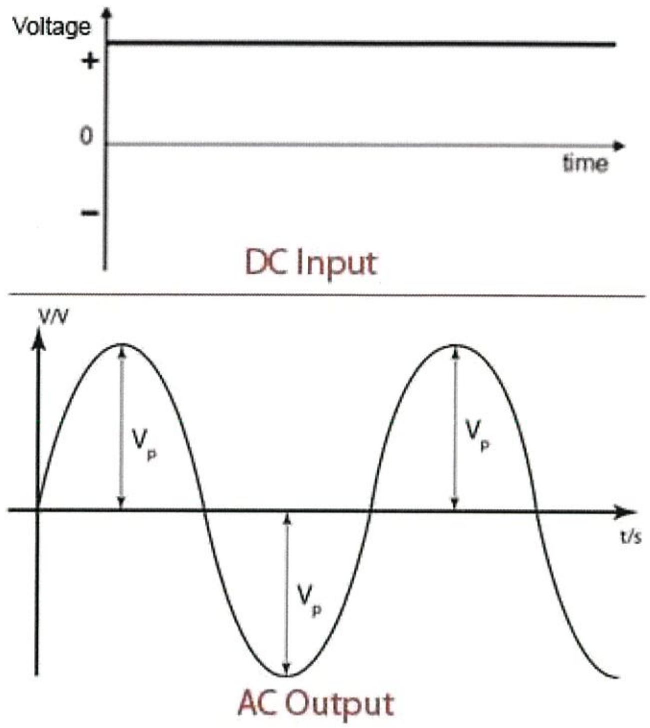


รูปที่ 2.9 แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นพร้อมตัวเก็บประจุ

ค่าระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรในรูปที่ 2.9

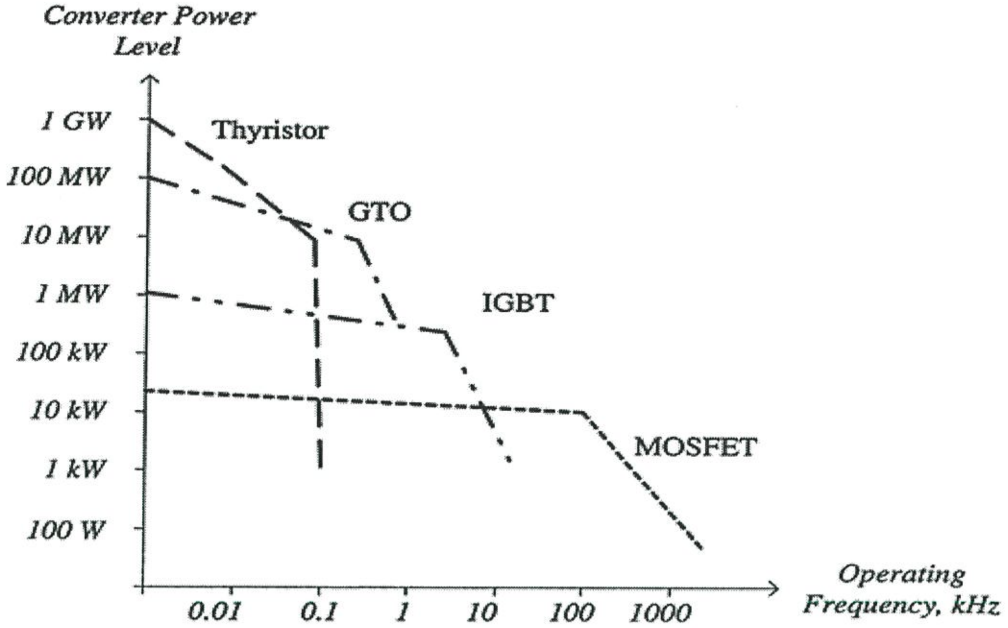
$$\Delta V_o \approx \frac{V_m \pi}{\omega RC} \approx \frac{V_m \pi}{2\pi fRC} \tag{2.7}$$

2.7 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)



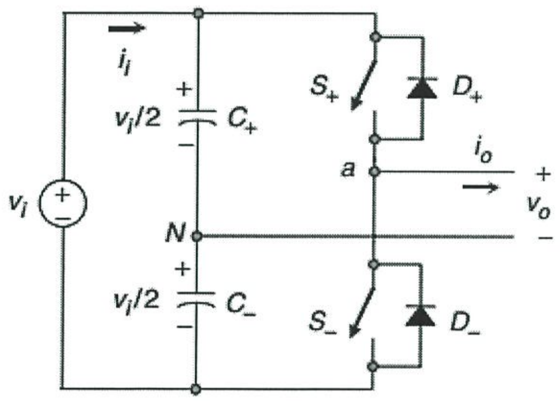
รูปที่ 2.10 แรงดันอินพุทและเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ใช้สำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ โดยความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าขึ้นอยู่กับวงจรควบคุมอุปกรณ์สวิทชิ่งและช่วงความถี่ใช้งานของอุปกรณ์สวิตชิ่ง



รูปที่ 2.11 พิกัดกำลังและช่วงความถี่ใช้งานของอุปกรณ์สวิตชิ่งชนิดต่างๆ

2.8 อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์



รูปที่ 2.12 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์

จากรูปที่ 2.12 แสดงวงจรของอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่มีตัวเก็บประจุสองตัวต่ออนุกรมกันและขนานกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันตกคร่อมเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตชิ่งควรมีค่าสูงกว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะมีทั้งหมด 3 โหมด คือ

1. โหมดที่ 1 สวิตช์ S+ ทำงาน
2. โหมดที่ 2 สวิตช์ S- ทำงาน
3. โหมดที่ 3 คือไม่มีสวิตช์ตัวไหนทำงานเลย

สวิตช์ S+ และ S- ไม่สามารถทำงานพร้อมกันได้ เนื่องจากทำงานพร้อมกันจะเปรียบเสมือนกับการลัดวงจรของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ โหมดการทำงานแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์

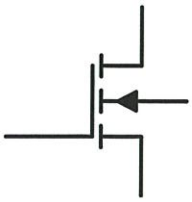
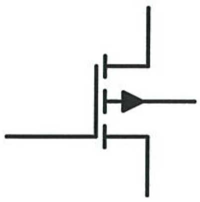
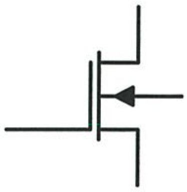
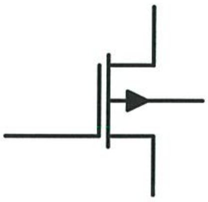
State	State	v_o	Components Conducting
S_+ is on and S_- is off	1	$v_i/2$	S_+ if $i_o > 0$ D_+ if $i_o < 0$
S_- is on and S_+ is off	2	$-v_i/2$	D_- if $i_o > 0$ S_- if $i_o < 0$
s_+ and S_- are all off	3	$-v_i/2$ $v_i/2$	D_- if $i_o > 0$ D_+ if $i_o < 0$

2.9 มอสเฟสกำลัง (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)

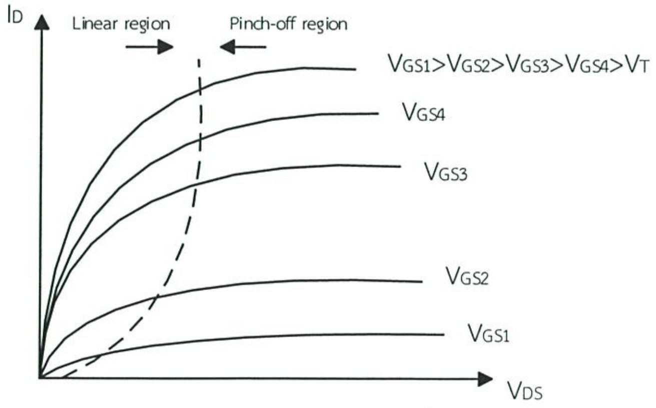
มอสเฟตกำลังแบ่งตามชนิดการทำงานได้ 2 ชนิด คือ ชนิดเอนฮานซ์เมต์มอสเฟต (Enhancement MOSFET) หรือเรียกว่าอีมอสเฟต (E-MOSFET) และชนิดดีพลีชั่นมอสเฟต (Depletion MOSFET) หรือเรียกว่า (D-MOSFET) ซึ่งแต่ละชนิดจะแบ่งออกได้อีกเป็น ชนิด N-Channel หรือ NMOS และ P-Channel หรือ PMOS ซึ่งโครงสร้างของ NMOS และ PMOS จะมีโครงสร้างตรงข้ามกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดก

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิด Enhancement และมอสเฟตชนิด Depletion

NMOS	PMOS	MODE
 (ก)	 (ข)	Enhancement
 (ค)	 (ง)	Depletion

เมื่อต้องการให้มอสเฟตกำลังนำกระแสอย่างต่อเนื่องจะต้องมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างขาเกตกับขาซอร์ส (V_{GS}) อย่างต่อเนื่อง ช่วงเวลาการสวิตชิ่งของมอสเฟตกำลังจะมีค่าอยู่ระหว่างหลักสิบนาโนวินาทีถึงหลักร้อยนาโนวินาที ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดพิกัดของมอสเฟตกำลัง ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนและแรงดันที่ขาเดรนกับซอสของมอสเฟตกำลัง ดูได้จากรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์กระแสเดรนและแรงดันที่ขาเดรนกับซอสของมอสเฟตกำลัง

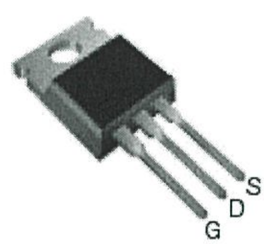
ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ส $R_{DS(on)}$ จะขึ้นอยู่กับพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้า หากทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงก็ยิ่งทำให้ค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สมีค่ามากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อกำลังสูญเสียจากการนำกระแส (Conduction Losses) เช่น มอสเฟตกำลังมีค่า

144353

พิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้า 1,000 โวลต์ จะมีค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สมากกว่ามอสเฟตกำลังมีค่าพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้า 200 โวลต์ ดังนั้นการสูญเสียจากการนำกระแสของมอสเฟตกำลังที่ทนได้ 1,000 โวลต์ จะมีกำลังสูญเสียจากการนำกระแสมากกว่าของมอสเฟตกำลังที่ทนแรงดันไฟฟ้าได้ 200 โวลต์

ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอสของมอสเฟตกำลังจะมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นบวก คือเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นความต้านทานก็จะมากขึ้น มอสเฟตกำลังจะสามารถนำมาต่อขนานกันได้ง่าย หากต้องการใช้งานที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ทั้งนี้มอสเฟตกำลังจะต้องมีคุณสมบัติต่างๆ เหมือนกันมากที่สุดจึงจะนำมาต่อขนานกันได้

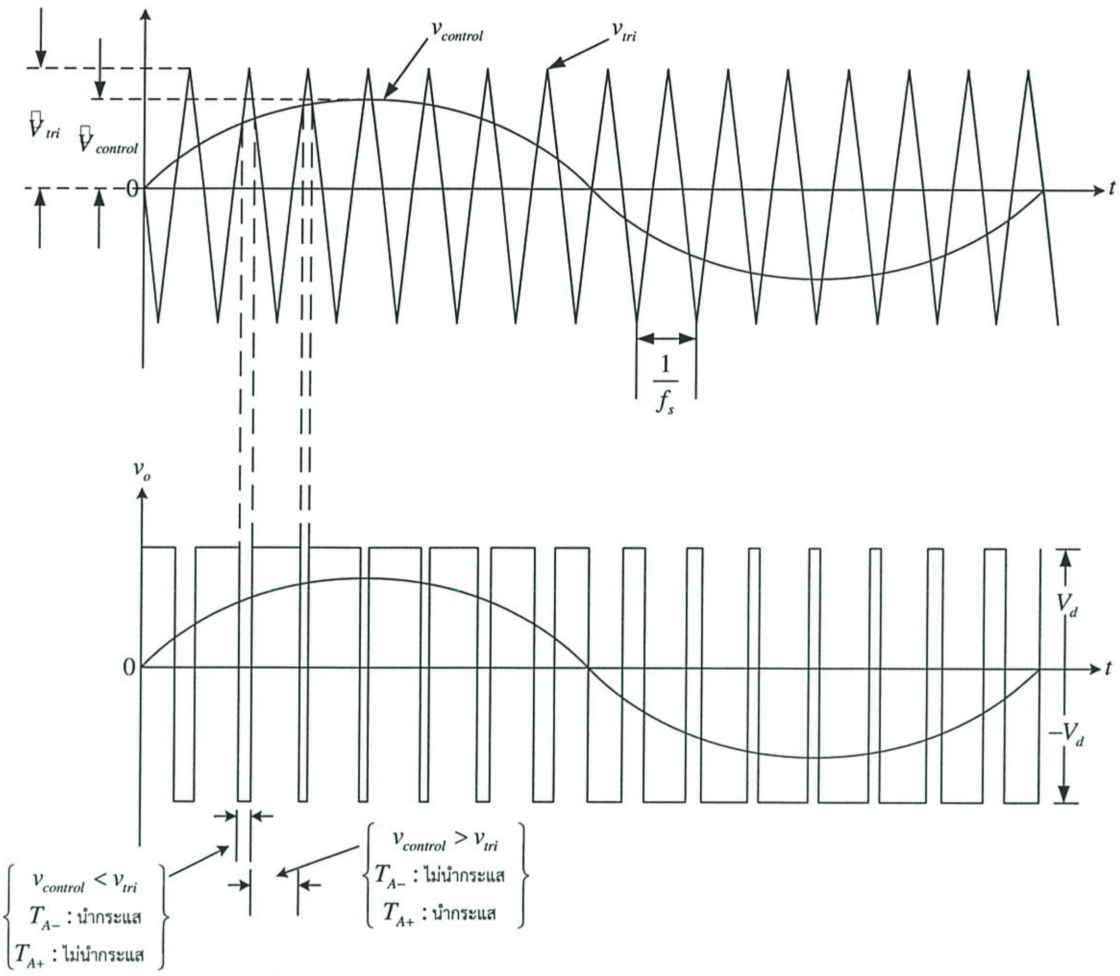
ในปัจจุบันมอสเฟตกำลังมีค่าพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า 1,000 โวลต์ แต่มีพิกัดกระแสไฟฟ้าได้ไม่เกิน 100 แอมแปร์ แต่จุดเด่นที่สุดของมอตเฟสกำลังคือการมีความถี่ของการสวิตช์มีค่ามากถึงหลักหลายร้อยกิโลเฮิรตซ์ สำหรับรูปร่างทั่วไปของมอสเฟตกำลังแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 มอสเฟตกำลังชนิด N-Channel

2.10 การสวิตชิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (Sinusoidal Pulse Width Modulation)

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (Sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการ นำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular waveform) ดังในรูปที่ 2.15 ความถี่ของการสวิตชิ่ง (f_s) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม



รูปที่ 2.15 การสร้างสัญญาณมอดดูเลชั่นโดยพีดับเบิลยูเอ็ม

คำย่อและความหมายที่สำคัญของการสวิตชิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็ม มีดังต่อไปนี้

$V_{control}$ คือ สัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก

V_{tri} คือ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตชิ่ง

f_1 คือ ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์

f_s คือ ความถี่ของการสวิตชิ่งของอินเวอร์เตอร์

m_a คือ อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด

m_f คือ อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

$\hat{V}_{control}$ คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์

$\hat{V}_{tri}$ คือ ค่ายอดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

ค่า m_a และ m_f จะนิยามจากสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \tag{2.8}$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \tag{2.9}$$

ถ้าค่า $0 \leq m_a \leq 1$ จะเป็นช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น ซึ่งหมายถึงองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้าด้านออก (Fundamental-frequency component of the output voltage)

ในกรณี $m_a > 1$ จะเป็นช่วงการควบคุมแบบโอเวอร์มอดูเลต ซึ่งผลของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์สูงกว่าช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น สำหรับเงื่อนไขของการสร้างสัญญาณสวิตชิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็ม คือ

$$V_{control} > V_{tri}\ ,\ T_{A+}\ \text{จะนำกระแส}\ \ V_{Ao} = \frac{1}{2} V_d \tag{2.10}$$

$$V_{control} < V_{tri}\ ,\ T_{A-}\ \text{จะนำกระแส}\ \ V_{Ao} = -\frac{1}{2} V_d \tag{2.11}$$

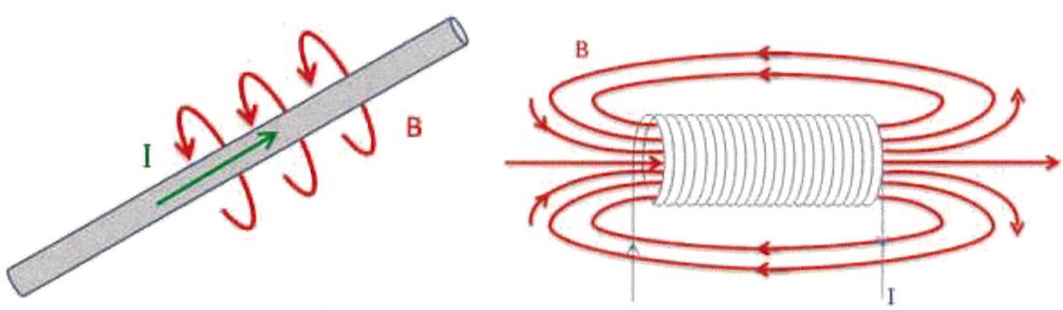
การทำงานของสวิตช์ T_{A+} และ T_{A-} จะขึ้นอยู่กับผลการเปรียบเทียบของ $V_{control}$ กับ V_{tri} โดยจะมีเงื่อนไขตามสมการที่ 2.10 และ 2.11 และจะไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแส

2.11 หม้อแปลงกำลังไฟฟ้า (Power Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าใช้สำหรับส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าใช้หลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หม้อแปลงไฟฟ้ามีหลายประเภทเช่นหม้อแปลงแรงดันให้สูงขึ้น(Step Up Transformer), หม้อแปลงแรงดันให้ต่ำลง(Step Down Transformer),หม้อแปลง 1:1(1:1Transformer) ประกอบไปด้วยขดลวดฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิ

จากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ดังสมการที่ 2.12

$$e=N\frac{\partial\phi}{\partial t} \qquad (2.12)$$



รูปที่ 2.16 ภาพอธิบายกฎของแอมแปร์

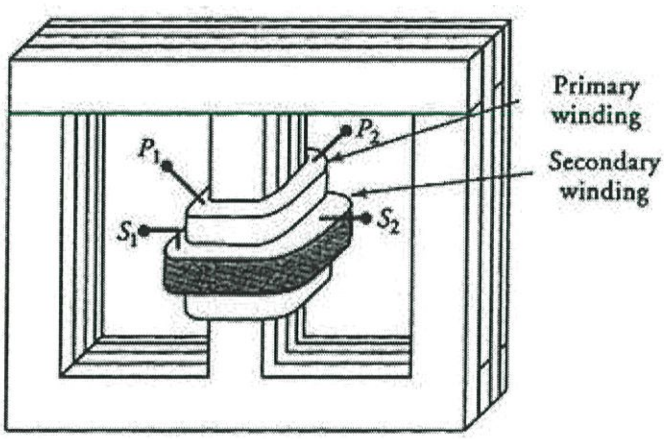
จากกฎของแอมแปร์เมื่อมีกระแสไหลจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวาดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าไม่สามารถใช้ได้กับไฟฟ้ากระแสตรง เพราะกระแสตรงจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงมีค่าเป็นศูนย์แต่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเช่นเดียวกับกระแสซึ่งอยู่ในรูปคลื่นสัญญาณไซน์เขียนได้ดังสมการที่ 2.13

$$i(t)=i_m\sin(\omega t) \qquad (2.13)$$

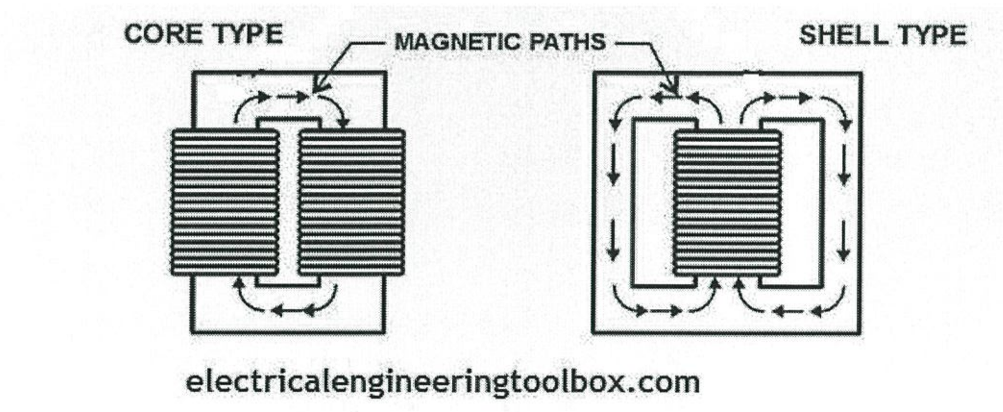
ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของกระแสจะมีลักษณะเดียวกันกับกระแส แสดงได้ดังสมการที่ 2.14

$$\phi(t)=\phi_m \sin(\omega t) \tag{2.14}$$

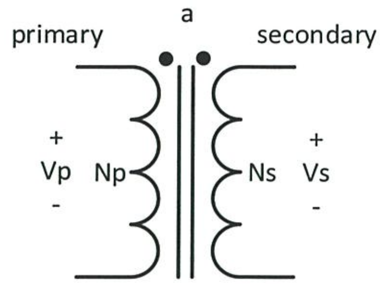
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดอีกฝั่ง จึงสามารถส่งผ่านกำลังได้



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของหม้อแปลงประเภท SHELL TYPE



รูปที่ 2.18 เส้นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กของหม้อแปลงประเภท CORE TYPE และ SHELL TYPE

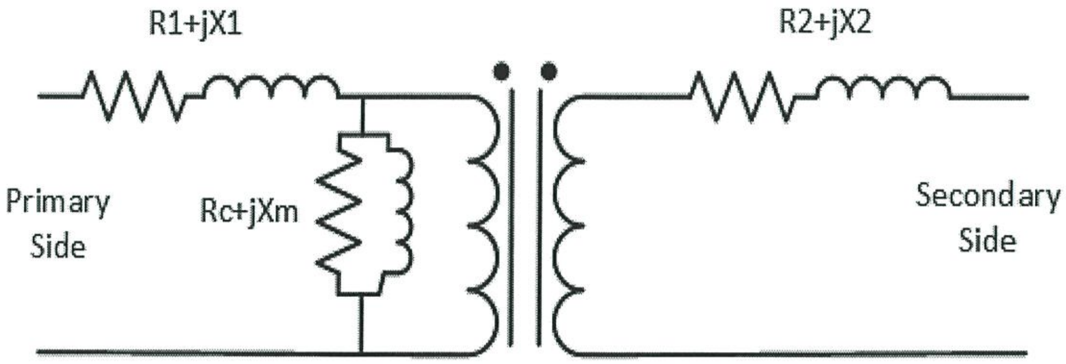


รูปที่ 2.19 อัตราส่วนขดลวดของหม้อแปลง

โดยปกติหม้อแปลงทำงานด้วยประสิทธิภาพสูง มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงดันด้านออกเป็นอัตราส่วนกับอัตราส่วนรอบ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.15

$$a = \frac{N_{primary}}{N_{secondary}} = \frac{V_{primary}}{V_{secondary}} \tag{2.15}$$

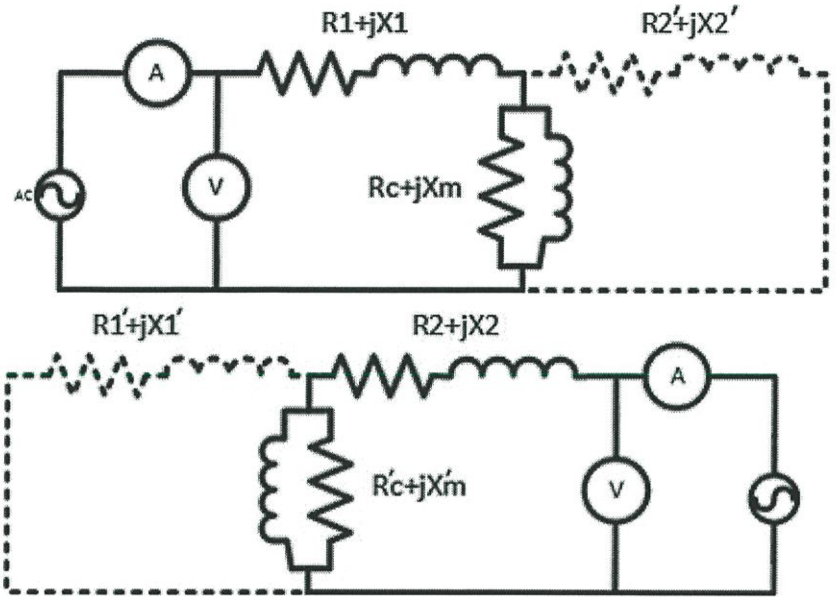
วงจรสมมูลของหม้อแปลงแสดงได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกำลังไฟฟ้า

สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงได้ด้วยวิธี Open Circuit Test และ Short Circuit Test

Open Circuit Test คือการทดสอบโดยที่อีกฝั่งเปิดวงจรทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านในฝั่งที่เปิดวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.21



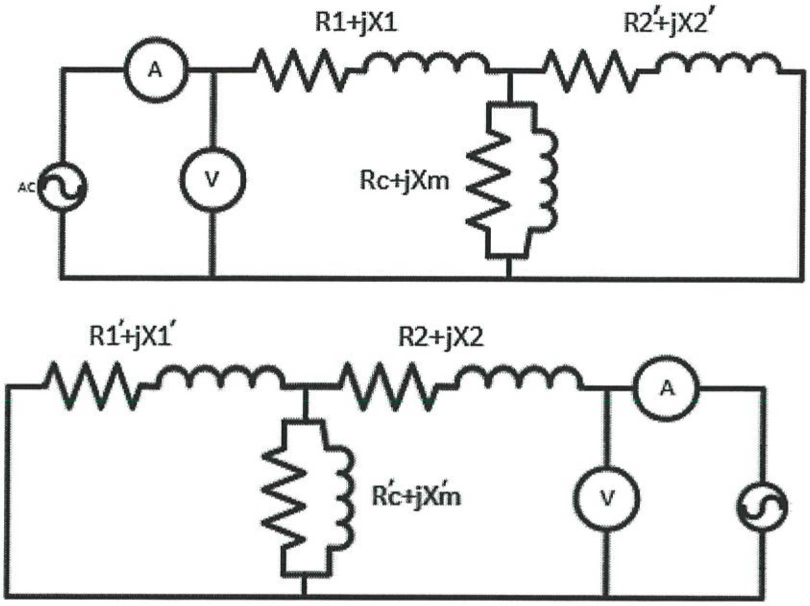
รูปที่ 2.21 การทดสอบหม้อแปลง Open Circuit Test

$$Z=\frac{V}{I} \tag{2.16}$$

$$Z_{primary.occ}=Z_1+Z_m \tag{2.17}$$

$$Z_{secondary.occ}=Z_2+\frac{Z_m}{a^2} \tag{2.18}$$

Short Circuit Test เป็นการทดสอบโดยทำการลดวงจรขดลวดอีกฝั่งหนึ่งดังที่แสดงในรูปที่2.22



รูปที่ 2.22 การทดสอบหม้อแปลง Short Circuit Test

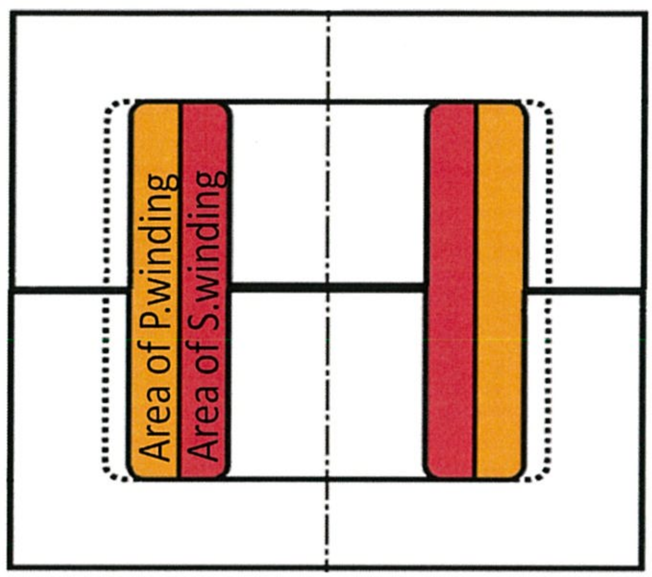
$$Z_{primary.scc}=Z_1+\frac{a^2Z_2Z_m}{a^2Z_2+Z_m} \quad (2.19)$$

$$Z_{secondary.occ}=Z_2+\frac{Z_1Z_m}{a^2(Z_1+Z_m)} \quad (2.20)$$

จาก Short Circuit Test และ Open Circuit Test แก้สมการหา R_1, R_2, R_c , X_1, X_2, X_mได้

2.12 การออกแบบหม้อแปลงกำลังไฟฟ้าความถี่สูงโดยวิธีผลคูณของพื้นที่ (Area Product)

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยวิธีผลคูณของพื้นที่หาได้จากการขีดจำกัดของการพันขดลวดทั้งหมดในพื้นที่ของการพันลวดของแกนหม้อแปลงแสดงได้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 พื้นที่การพันลวดของแกน, พื้นที่พันลวดของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

จากรูปที่ 2.23 พื้นที่ของการพันลวดของแกนหรือหน้าต่าง (Window) มีค่าเท่ากับพื้นที่การพันลวดขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) รวมกับพื้นที่การพันลวดขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) เนื่องมาจากลวดที่ใช้นั้นเป็นลวดที่พื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมทำให้เกิดช่องว่างอากาศเวลาพันขดลวด พื้นที่การพันลวดจึงไม่สามารถใช้งานได้ทั้งหมด จึงต้องคูณค่าคูณลดk แสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$kW=N_1A_{c1}+N_2A_{c2} \tag{2.21}$$

N_1 คือจำนวนรอบการพันของขดลวดปฐมภูมิ

A_{c1} คือขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดปฐมภูมิ

N_2 คือจำนวนรอบการพันของขดลวดทุติยภูมิ

A_{c2} คือขนาดตัวนำของขดลวดทุติยภูมิ

จากสมการความหนาแน่นกระแส ดังสมการที่ 2.22

$$J=\frac{I_{rms}}{A_c} \tag{2.22}$$

จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ ดังสมการที่ 2.23

$$E=N\frac{d\phi(t)}{dt} \tag{2.23}$$

เนื่องจากป้อนไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กมีลักษณะเป็นไซน์ด้วย ดังสมการที่ 2.24

$$\phi(t)=\phi_m \sin(\omega t) \tag{2.24}$$

อนุพันธ์อันดับ1ของฟลักซ์แม่เหล็ก แสดงได้ดังสมการที่ 2.25

$$\frac{d\phi(t)}{dt}=\omega\phi_m \cos(\omega t) \tag{2.25}$$

ค่าอาร์เอ็มเอ็สของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แสดงได้ดังสมการที่ 2.26

$$E_{rms}=\frac{\omega NB_m A\cos(\omega t)}{\sqrt{2}}\approx 4.44fNB_mA \tag{2.26}$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.22 และ 2.26 ลงใน 2.21 จะได้สมการที่ 2.27

$$kW=\frac{(V_{1rms}I_{1rms}+V_{2rms}I_{2rms})}{4.44fB_mJA} \tag{2.27}$$

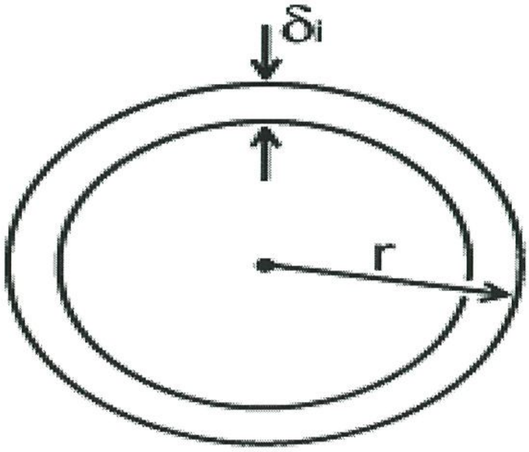
จัดรูปจะได้สมการผลคูณของพื้นที่ ดังสมการที่ 2.28

$$A_p=WA=\frac{(V_{1rms}I_{1rms}+V_{2rms}I_{2rms})}{4.44fB_mkJ} \tag{2.28}$$

เลือกแกนที่มีขนาดของ WA ให้มีค่ามากกว่า A_p
คำนวณจำนวนรอบต่ำสุดของการพันขดลวดจากสมการที่ 2.29

$$N=\frac{V}{4.44fB_mA} \tag{2.29}$$

เมื่อหม้อแปลงใช้งานที่ความถี่สูงจะเกิดปรากฏการณ์ที่กระแสไหลแต่บริเวณผิวทำให้กระแสไม่ไหลบริเวณส่วนกลางของลวดตัวนำ สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเลือกลวดตัวนำที่มีขนาดรัศมีน้อยกว่าSkin depth(δ)แล้วตีเกลียวหลายเส้นแทนการใช้ลวดตัวนำเส้นเดียว

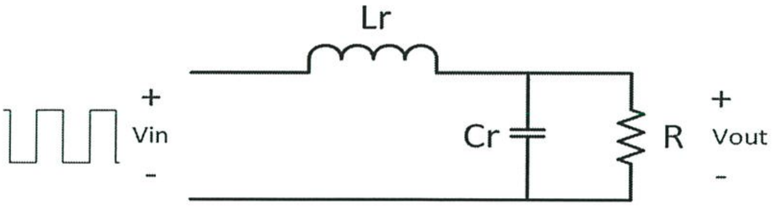


รูปที่ 2.24 Skin depth บนภาพตัดขวางของตัวนำ

Skin depth มีค่าดังสมการที่ 2.30

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_{conductor}}{\omega \mu_{conductor}}} \tag{2.30}$$

2.13 วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน (Parallel Resonant Converter)

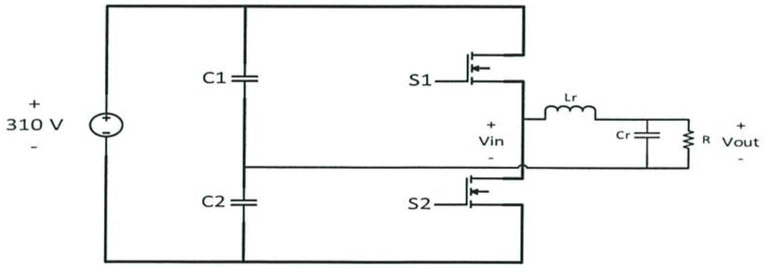


รูปที่ 2.25 วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน

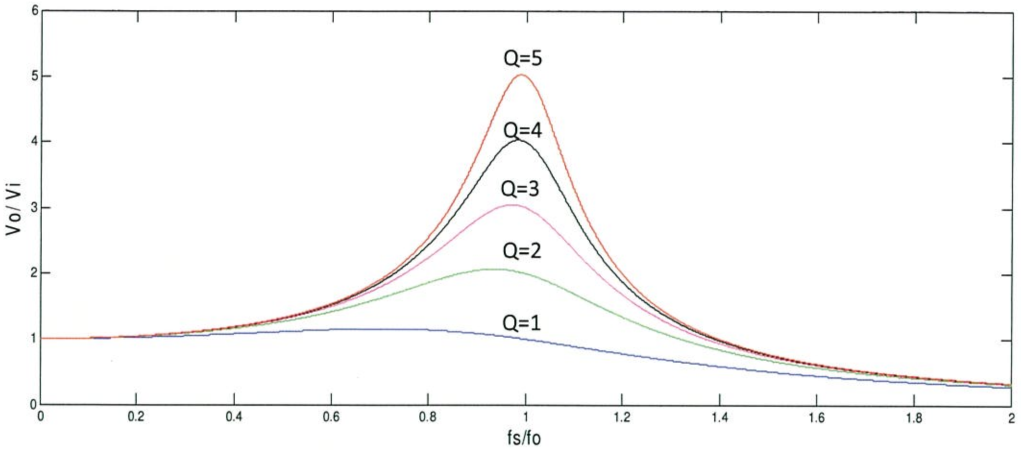
จากวงจรรูปที่ 2.25 เมื่อเกิดสภาวะเรโซแนนท์จะได้ว่า $\omega L_r = \frac{1}{\omega C_r}$ หรือ $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$ ความถี่เรโซแนนท์จะมีความถี่ดังสมการที่ 2.31

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \tag{2.31}$$

2.14 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบขนาน



รูปที่ 2.26 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบขนาน



รูปที่ 2.27 ผลตอบสนองของวงจรเรโซแนนท์แบบขนานที่ความถี่ต่างๆ

การวิเคราะห์เริ่มจากการพิจารณาการตอบสนองความถี่ของวงจร RLC ค่ายอดของแรงดันด้านเข้าและด้านออก โดยจะถูกกำหนดตามสมการที่ 2.32

$$\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| = \frac{1}{\sqrt{\left(1-\left(\frac{f_s}{f_0}\right)^2\right)^2+\left(\frac{f_s}{Qf_0}\right)^2}} \tag{2.32}$$

โดยความถี่เรโซแนนท์หาได้จาก

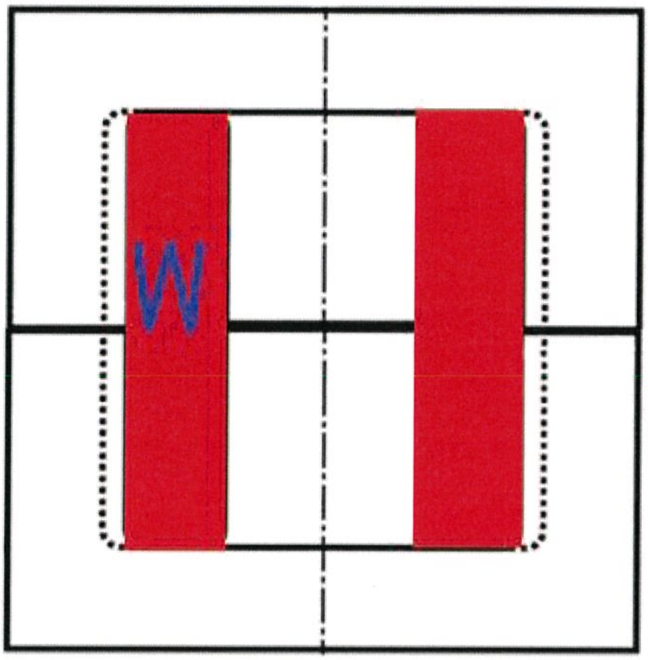
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \tag{2.33}$$

และค่า quality factor (Q) หาได้จากสมการที่ 2.34

$$Q = \frac{R}{\omega_0 L_r} \tag{2.34}$$

2.15 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยวิธิผลคูณของพื้นที่ (Area Product)

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยวิธีผลคูณของพื้นที่หาได้จากการขีดจำกัดของการพันขดลวดทั้งหมดในพื้นที่ของการพันลวดของแกนหม้อแปลงแสดงได้ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 พื้นที่การพันลวดของแกนตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่2.28 พื้นที่ของการพันลวดของแกนหรือหน้าต่าง (Window) มีค่าเท่ากับพื้นที่การพันลวดตัวนำ เนื่องมาจากลวดที่ใช้นั้นเป็นลวดที่พื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมทำให้เกิดช่องว่างอากาศเวลาพันขดลวด พื้นที่การพันลวดจึงไม่สามารถใช้งานได้ทั้งหมด จึงต้องคูณค่าคูณลดk แสดงในรูปสมการได้ดังสมการที่ 2.35

$$kW=NA_W \tag{2.35}$$

N คือจำนวนรอบการพันของขดลวดตัวนำ

A_wคือขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำ

ความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่แสดงได้ดังสมการที่ 2.36

$$J=\frac{I}{A} \tag{2.36}$$

จัดรูปสมการที่ 2.36 จะได้สมการที่ 2.37

$$Aw=\frac{I_{rms}}{J} \tag{2.37}$$

สมการของฟลักซ์ลิงเกจแสดงได้ดังสมการที่ 2.38

$$\lambda=Li=N\phi \tag{2.38}$$

$$\phi_m=B_mA \tag{2.39}$$

แทนค่าสมการที 2.39 ในสมการที่ 2.38 แล้วจัดรูปจะได้สมการที่ 2.40

$$N=\frac{LI_{peak}}{B_mA} \tag{2.40}$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.37 และ 2.40 ลงใน 2.35 จะได้สมการที่ 2.41

$$kW=\frac{LI_{peak}I_{rms}}{B_mAJ} \tag{2.41}$$

จัดรูปสมการที่ 2.41 จะได้สมการผลคูณของพื้นที่ ดังสมการที่ 2.42

$$A_p = WA = \frac{LI_{peak}I_{rms}}{kB_mJ} \tag{2.42}$$

เลือกแกนที่มีขนาดของ WA ให้มีค่ามากกว่า A_p

คำนวณจำนวนรอบต่ำสุดของการพันขดลวดจากสมการที่ 2.40

คำนวณหาขนาดขดลวดตัวนำจากสมการที่ 2.37 โดยทั่วไปจะออกแบบที่ $J=3A/mm^2$

เลือกใช้ขนาดลวดตัวนำให้มีค่าน้อยกว่า Skin depth(δ)แล้วตีเกลียวหลายเส้นแทนการใช้ลวดตัวนำเส้นเดียวจากสมการที่ 2.30

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_{conductor}}{\omega \mu_{conductor}}}$$

เมื่อได้ขนาดของขดลวดตัวนำและจำนวนรอบการพันของขดลวดแล้ว นำไปวัดค่าความเหนี่ยวนำเพื่อปรับจูนค่าให้มีค่าใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้โดยที่

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} = \frac{\mu A N^2}{l_{gap}} \tag{2.43}$$

จัดรูปสมการที่ 2.43 จะได้สมการที่ 2.44

$$l_{gap} = \frac{\mu A N^2}{L} \tag{2.44}$$

สมการที่ 2.44 คือระยะแกปของตัวเหนี่ยวนำ สามารถปรับเพิ่มหรือลดเพื่อให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไว้

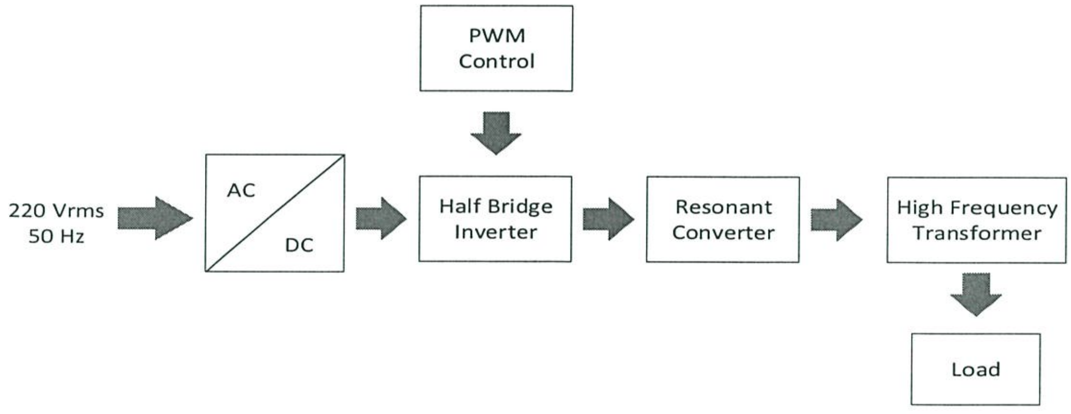
บทที่ 3
หลักการทำงานและการออกแบบวงจร

3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงหลักการทำงานและการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ความถี่สูง โดยใช้พีดับเบิลยูเอ็มในแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัดให้เป็นไปตามเป้าหมายและสมมติฐานที่วางไว้ โดยอุปกรณ์ต่างๆ ที่ออกแบบไว้จะนำไปใช้ในการจำลองวงจรโดยใช้คอมพิวเตอร์

3.2 โครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัด

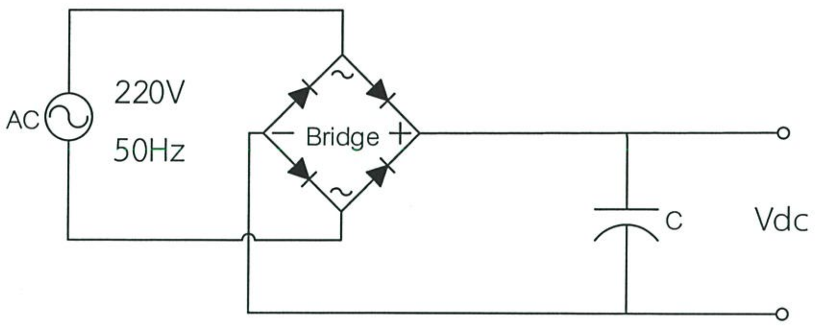
ในส่วนนี้จะเป็นโครงสร้างการทำงานโดยรวมเพื่อนำไปสู่การออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัดที่ใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่ง โดยการออกแบบจะมีส่วนประกอบหลักซึ่งประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์) โดยใช้มอสเฟตเป็นตัวสวิตชิ่ง, หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงและวงจรเรโซแนนท์



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัด

3.3 การออกแบบวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Single Phase Full Bridge Rectifier)

เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัดใช้กำลังหลักจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ ดังนั้นในส่วนนี้ ดังนั้นในส่วนนี้จะเป็นวงจรเรียงกระแสทางด้านเข้าของชุดอินเวอร์เตอร์ โดยมีไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรเรียงกระแสที่ใช้บริดจ์ไดโอด (GBPC3508) โดยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาท์พุทของวงจรเรียงกระแสนี้จะถูกกรองให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการกระเพื่อมน้อยลงและมีขนาดประมาณ 310 โวลต์ โดยมีตัวเก็บประจุเป็นชุดวงจรกรอง



รูปที่ 3.2 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์พร้อมชุดวงจรกรอง

1 3.3.1 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุเพื่อกรองแรงดันด้านเอาท์พุต

แรงดันด้านเข้า (V_{in})	=	220 V
ค่ายอดแรงดันกระแสสลับ	=	310 V
แรงดันกระเพื่อม ($V_{r\ p\text{-}p}$)	=	0.05x310
	=	15.5 V
แรงดันไฟตรงเฉลี่ย (V_{DC})	=	310–(15.5/2)
	=	302.5 V

สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัดที่ออกแบบได้เผื่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าประมาณ 225 W ดังนั้นหาค่า C ได้จากสมการที่ 3.1

$$C = \frac{I \cdot t}{V_r}$$

โดยที่ I คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด/แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ย

= 225/302.5

ดังนั้น กระแสสูงสุด = 743.802 mA

t คือ ครึ่งของคาบเวลาไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า

ดังนั้น ครึ่งคาบเวลาที่ 50 เฮิรตซ์ = 10 ms

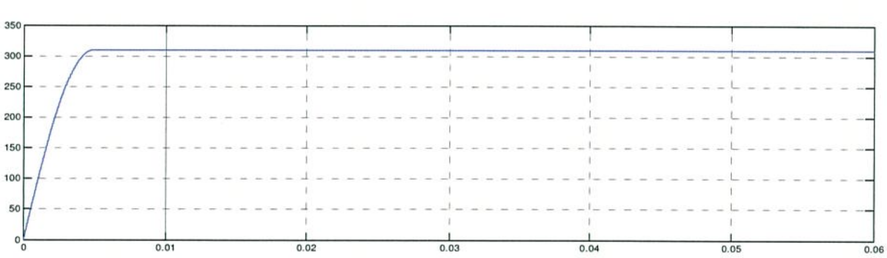
V_r คือ ค่าแรงดันกระเพื่อมจากยอดถึงยอด

= 15.5

$$C = \frac{743.802 \times 10^{-3} \times 0.01}{15.5}$$

ดังนั้น ค่าเก็บประจุ = 479.872 μF

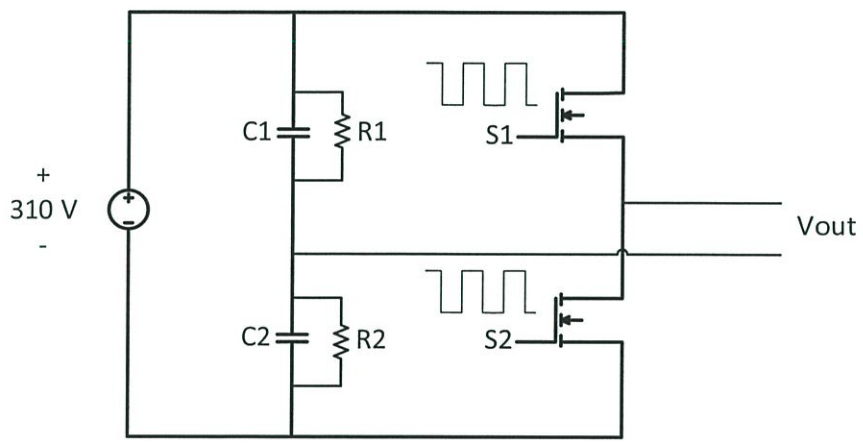
ในทางปฏิบัติได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุ (C) ชนิดอิเล็กทรอไลต์ขนาด 680 μF 1 ตัว สามารถทนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 450 V



รูปที่ 3.3 แรงดันที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

3.4 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ (Half Bridge Inverter)

ในปริญญานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์เนื่องจากกำลังเอาท์พุทที่ใช้มีค่าไม่สูงมาก การทำงานของวงจรจะมีค่ายอดเอาต์พุตของไฟฟ้าสลับเป็นครึ่งหนึ่งของไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า กล่าวคือเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า 310 V_{dc} ให้กับวงจรจะได้แรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นไฟสลับที่มีค่ายอด 155 V_P ซึ่งเกิดจากการทำงานของวงจรที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุสองตัว ทำหน้าที่แบ่งครึ่งแรงดันทางด้านเข้า และทำงานสัมพันธ์กับอุปกรณ์สวิตชิ่ง 2 ตัว ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์สลับไปมาไม่พร้อมกันตามช่วงเวลาการทำงานที่กำหนด จึงได้แรงดันเอาท์พุตเป็นไฟสลับที่มีค่ายอดเป็นครึ่งหนึ่ง นอกจากนี้ยังเห็นว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ใช้อุปกรณ์สวิตชิ่งเพียงแค่ 2 ตัวเท่านั้น ทำให้สะดวกและควบคุมง่าย



รูปที่ 3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์

ในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่พิกัดกำลัง 225 W ที่ความถี่สวิตชิ่ง 300 kHz ได้เลือกอุปกรณ์สวิตชิ่งเป็นมอสเฟตกำลังเป็นตัวสวิตช์กำลังให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัด เนื่องจากมอสเฟตกำลังนั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมและดีกว่าอุปกรณ์สวิตช์ชนิดอื่นๆ เช่น บีเจที จีทีโอ และไอจีบีที เป็นต้น ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละชนิดดังในตารางที่ 3.1

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นว่ามอสเฟตกำลังเหมาะสมสำหรับการใช้งานในงานวิจัยนี้ทั้งในด้านของพิกัดกำลังและความถี่ที่ใช้งาน การเลือกพิกัดของตัวมอสเฟตกำลังที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์นี้ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3.2

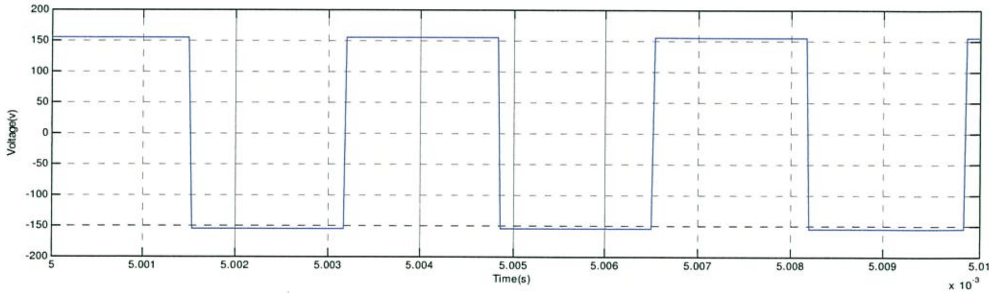
ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

อุปกรณ์	ความสามารถส่งผ่านกำลัง	ความเร็วในการสวิทชิ่ง	ความสามารถทนแรงดันไฟฟ้าลบ	ชนิดการควบคุม
จีทีโอ	สูง	ต่ำ	ได้	กระแส
บีเจที	กลาง	กลาง	ไม่ได้	กระแส
ไอจีบีที	กลาง	กลาง ค่อนข้างสูง	ได้	แรงดัน
มอสเฟตกำลัง	ต่ำ	สูง	ไม่ได้	แรงดัน

$$I_{pk}=\frac{P_o}{\eta V_{in(pk)}}$$

จะได้ $$I_{pk}=\frac{225}{0.9\times155}=1.612\text{ A}$$

ในทางปฏิบัติได้เลือกใช้งานมอสเฟตกำลังที่มีพิกัดกระแสมากกว่าที่คำนวณได้เพื่อเผื่อค่า Safety Factor เช่น อุณหภูมิรอยต่อของตัวมอสเฟตกำลังให้มีความปลอดภัยมากขึ้น โดยเลือกใช้มอสเฟตกำลังเบอร์ IRF840 ซึ่งมีพิกัดกระแส 8 A และพิกัดแรงดัน 500 V ในส่วนของตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่แบ่งครึ่งแรงดันจะเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กทรอไลต์ที่มีขนาด 680 μF ทนพิกัดแรงดันได้ 450 V ขนาดเท่ากันทั้งสองตัว



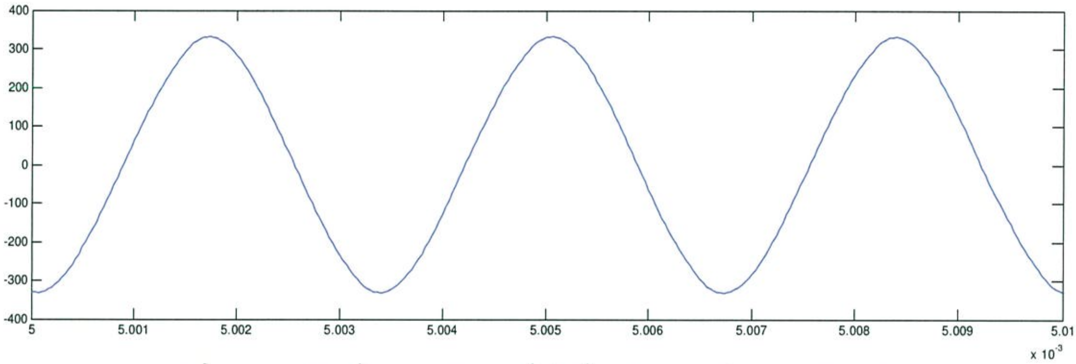
รูปที่ 3.5 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

3.5 การออกแบบวงจรเรโซแนนท์ (Resonant Converter)

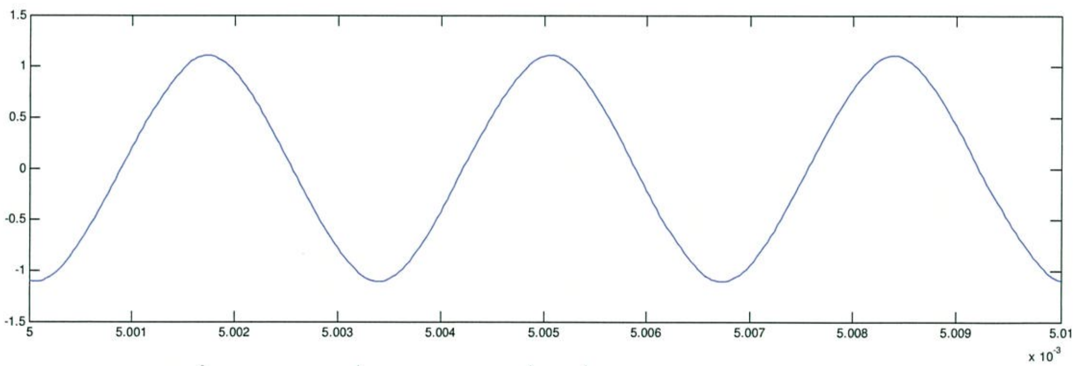
Load resistance	300 Ω
Resonant frequency	230 kHz
Switching frequency	300 kHz
Quality factor	1.74

จะได้ค่า $Cr=\dfrac{Q}{\omega_0 R}=6\ nF$

$Lr=\dfrac{1}{\omega_0^2 C_r}=0.08\ mH$



รูปที่ 3.6 แรงดันที่โหลดหลังจากที่ได้เพิ่มเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.7 กระแสที่โหลดหลังจากที่ได้เพิ่มเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์

3.6 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงด้วยวิธีผลคูณของพื้นที่

ออกแบบหม้อแปลงที่พิกัดดังนี้

แรงดันอาร์เอ็มเอ็สที่ขดลวดปฐมภูมิ	$V_{primary(rms)}=155.56V$
กระแสอาร์เอ็มเอ็สที่ขดลวดปฐมภูมิ	$I_{primary(rms)}=155.56V$
แรงดันอาร์เอ็มเอ็สที่ขดลวดทุติยภูมิ	$V_{secondary(rms)}=155.56V$
กระแสอาร์เอ็มเอ็สที่ขดลวดทุติยภูมิ	$I_{secondary(rms)}=2A$
ความถี่สวิทชิ่ง	$f_s=300kHz$
ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด	$B_m=0.3T$
ค่าคูณลดการพันขดลวด	$k=0.5$
ความหนาแน่นกระแส	$J=3\ A/mm^2$

จากสมการผลคูณของพื้นที่

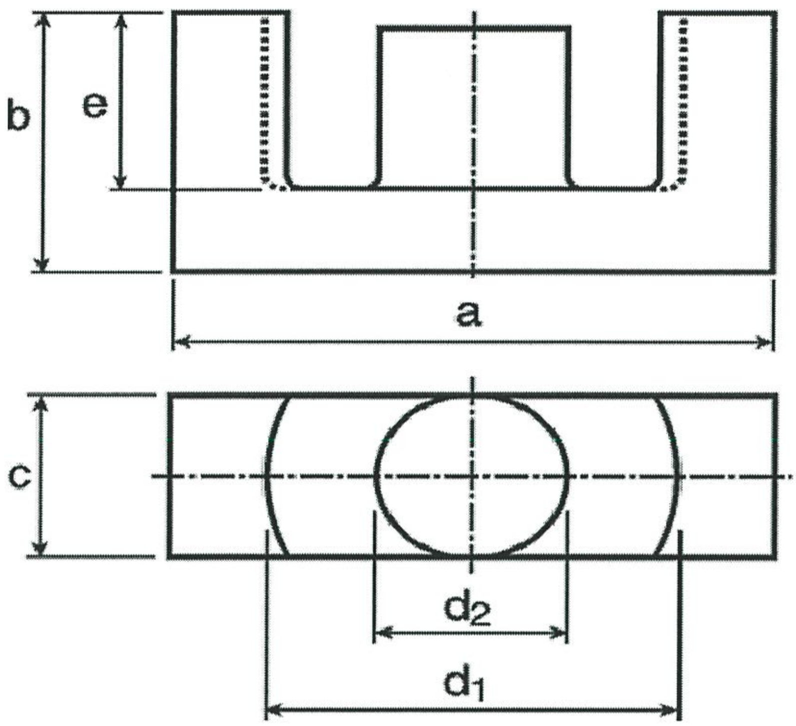
$$A_p=\frac{(V_{primary(rms)}I_{primary(rms)}+V_{secondary(rms)}I_{secondary(rms)})}{4.44f_sB_mkJ}$$

$$A_p=1.0381\times10^{-9}m^4$$

ต้องเลือกแกนที่มีขนาด WA ให้มีค่ามากกว่า A_p

(เลือกใช้แกน Ferrite ETD 49)

แกน ETD 49

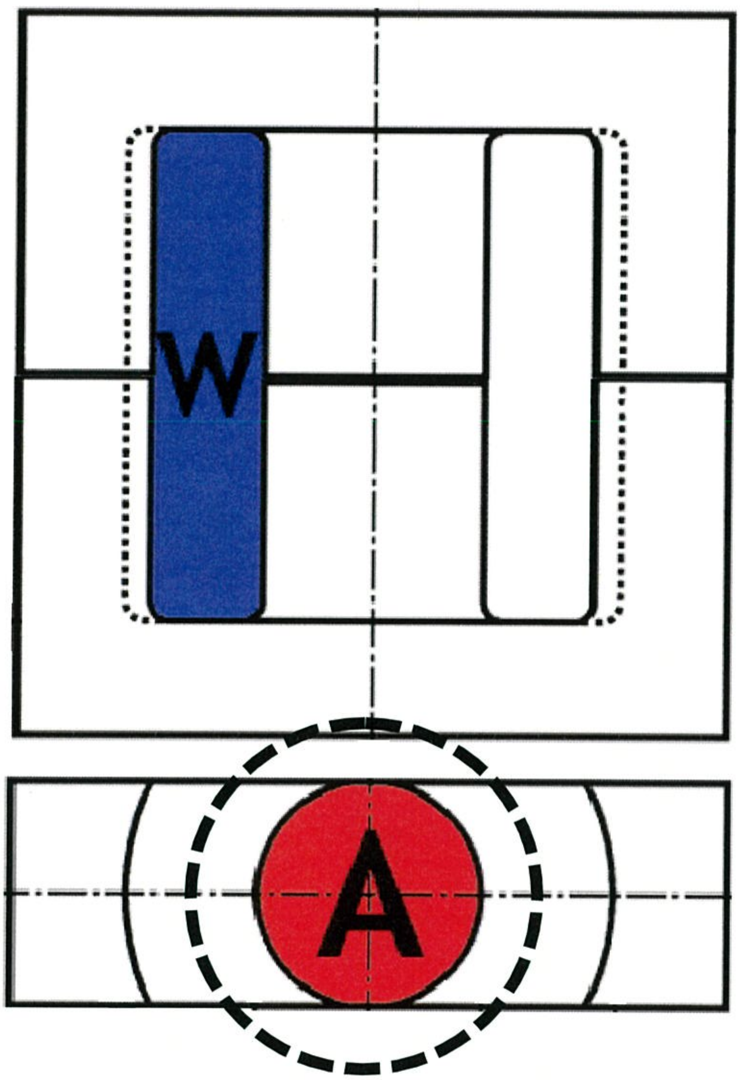


รูปที่ 3.8 ไดเมนชั่นของแกนETD (1)

ตารางที่ 3.2 ขนาดไดเมนชั่นของแกน ETD 49

Dimension of ETD 49	
a	4.855cm
b	2.475cm
c	1.610cm
d1	3.680cm
d2	1.610cm
e	1.755cm

จากขนาดต่างๆ ของแกนETD49 คำนวณหา Window (W) และ Surface Area (A)



รูปที่ 3.9 Window Area และ Surface Area (1)

ตารางที่ 3.3 ค่าW, A, T และ Ap ของแกน ETD 49

W	A	T	A_p
3.6328cm^2	2.0358 cm^2	8.3095 cm	7.3958x10^{-7} m^4

คำนวณจำนวนรอบต่ำสุดของขดลวดทุติยภูมิจาก

$$N=\frac{V}{4.44fB_mA}$$

$$N_{primary}=\frac{V_{primary(rms)}}{4.44fB_mA}=\frac{155.6}{4.44x300x10^3x0.3x2.0358x10^{-4}}=1.91$$

$$N_{secondary}=\frac{V_{secondary(rms)}}{4.44fB_mA}=\frac{155.6}{4.44x300x10^3x0.3x2.0358x10^{-4}}=1.91$$

จากการคำนวณรอบต่ำสุดที่ต้องพัน จึงเลือกที่จะพันขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิดัง ตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 จำนวนรอบการพันของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

Number of winding turns	
Primary Winding	20Turns
Secondary Winding	25Turns

ขดลวดทุติยภูมิจะมีจำนวนรอบมากกว่าขดลวดปฐมภูมิเนื่องจากชดเชยผลของแรงดันตกที่อุปกรณ์ต่างๆ

คำนวณขนาดของตัวนำจาก $A_{conductor}=\frac{I}{J}$

ที่ขดลวดปฐมภูมิออกแบบกระแสอาร์เอ็มเอ็สไว้ที่ 2 A

$$A_{conductor(primary)}=\frac{2}{3x10^6}=0.667x10^{-6}m^2=0.667mm^2$$

ที่ขดลวดทุติยภูมิออกแบบกระแสอาร์เอ็มเอ็สไว้ที่ 2 A

$$A_{conductor(secondary)}=\frac{2}{3x10^{6}}=0.667x10^{-6}m^{2}=0.667mm^{2}$$

การลดผลของ Skin effect

ออกแบบให้รัศมีของตัวนำมีค่าน้อยกว่า Skin depth(δ)

$$\delta=\sqrt{\frac{2\rho_{conductor}}{\mu_{conductor}\omega}}$$

เนื่องจากตัวนำที่ใช้เป็นทองแดงตีเกลียวหลายเส้นแทนตัวนำที่เป็นทองแดงเส้นเดียว

$$\rho_{copper(bundle)}=2x10^{-8}\Omega\cdot m$$

$$\mu_{copper}\approx 4\pi x10^{-7}\ H/m$$

$$\omega=2\pi f=2\pi x300x10^{3}\ \ rad/s$$

Skin depth มีค่า $\delta=0.12995mm$

จึงเลือกใช้ตัวนำ SWG 33

SWG 33 มีรัศมี $r=0.1270mm$

SWG 33 มีพื้นที่หน้าตัด $A_{SWG33}=0.0507mm^{2}$

คำนวณหาจำนวนสายตีเกลียวจาก $Bundles=\frac{A_{conductor}}{A_{SWG33}}$

ขดลวดปฐมภูมิต้องมีจำนวนสายตีเกลียวต่ำสุดเท่ากับ $Bundle_{primary}=\frac{0.667}{0.0507}=13.1$

ขดลวดทุติยภูมิต้องมีจำนวนสายตีเกลียวต่ำสุดเท่ากับ $Bundle_{secondary}=\frac{0.667}{0.0507}=13.1$

เลือกใช้ตัวนำที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ชนิดของตัวนำและจำนวนสายตีเกลียวของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

side	ตัวนำ	จำนวนสายตีเกลียว
Primary	SWG 33	15
Secondary	SWG 33	15

3.7 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงด้วยวิธีผลคูณของพื้นที่

ออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่พิกัดดังนี้

กระแสยอด	$I_{peak}=6A$
กระแสอาร์เอ็มเอ็ส	$I_{rms}=6A$
ความถี่สวิทชิ่ง	$f_s=300kHz$
ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด	$B_m=0.3T$
ค่าคูณลดการพันขดลวด	$k=0.5$
ความหนาแน่นกระแส	$J=3\ A/mm^2$
ค่าความเหนี่ยวนำ	$L=70uH$

จากสมการผลคูณของพื้นที่

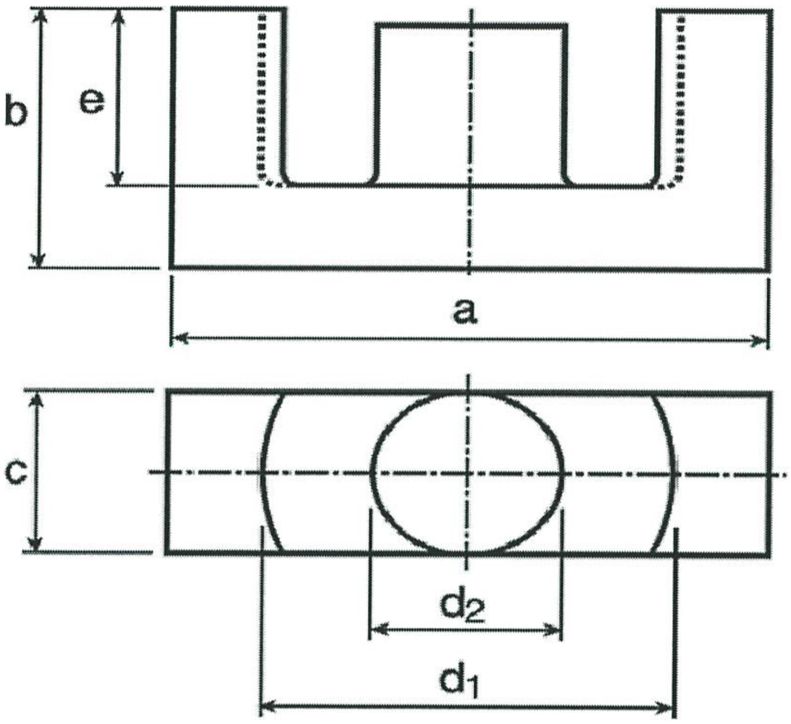
$$A_p=\frac{(LI_{peak}I_{rms})}{B_m kJ}$$

$$A_p=5.6x10^{-8}m^4$$

ต้องเลือกแกนที่มีขนาด WA ให้มีค่ามากกว่า A_p

(เลือกใช้แกน Ferrite ETD 39)

แกน ETD 39

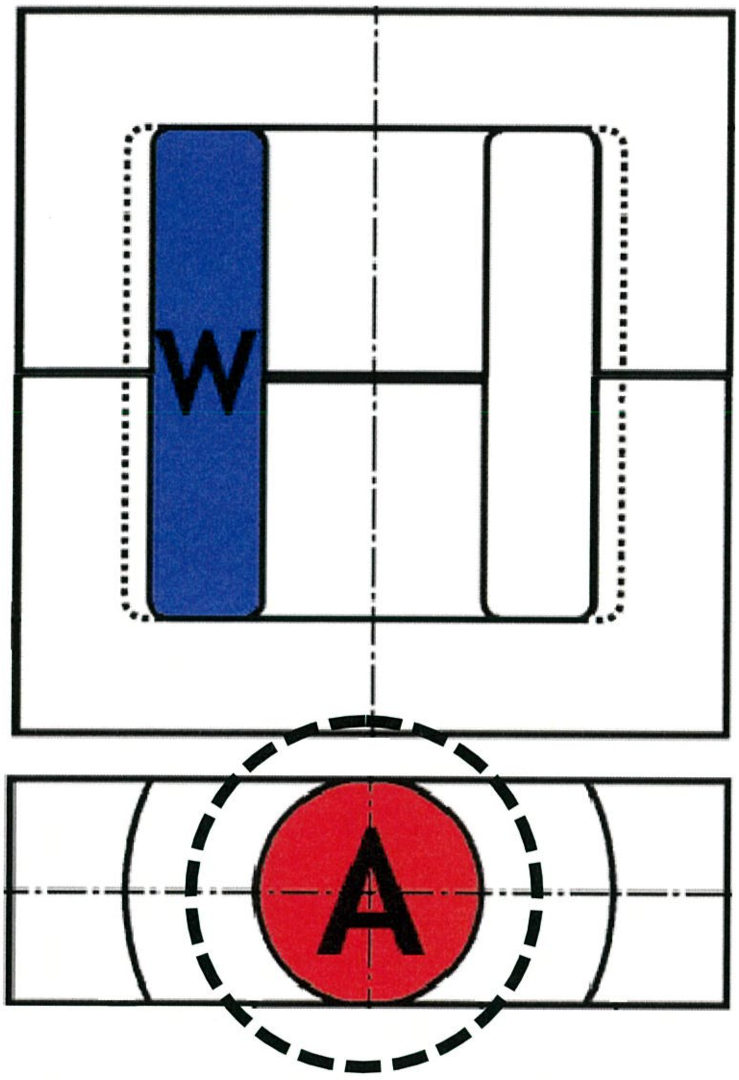


รูปที่ 3.10 ไดเมนชั่นของแกน ETD (2)

ตารางที่ 3.6 ขนาดไดเมนชั่นของแกน ETD 39

Dimension of ETD 39	
a	3.89cm
b	2.0cm
c	1.28cm
d1	2.93cm
d2	1.28cm
e	1.42cm

จากขนาดต่างๆ ของแกน ETD 39 คำนวณหา Window (W) และ Surface Area (A)



รูปที่ 3.11 Window Area และ Surface Area (2)

ตารางที่ 3.7 ค่าW, A, T และ Ap ของแกน ETD 39

W	A	T	A_p
2.343 cm^2	1.2868 cm^2	6.6131 cm	3.0149×10^{-7} m^4

คำนวณรอบต่ำสุดของการพันลวดตัวนำ

$$N=\frac{LI_{peak}}{B_m A}$$

$$N=\frac{LI_{peak}}{B_m A}=\frac{70x10^{-6}x6}{0.3x1.2868x10^{-4}}=10.8797$$

จากการคำนวณรอบของขดลวดต่ำสุดที่ต้องพัน จึงเลือกที่จะพันรอบขดลวดดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 จำนวนรอบการพันของขดลวดตัวนำ

Number of winding turns	
Conductor Winding	17 Turns

คำนวณขนาดของตัวนำจาก $A_{conductor}=\frac{I_{rms}}{J}$

ออกแบบกระแสอาร์เอ็มเอ็สไว้ที่ 6 A

$$A=\frac{6}{3x10^{6}}=2x10^{-6}m^{2}=2\ mm^{2}$$

การลดผลของ Skin effect

ออกแบบให้รัศมีของตัวนำมีค่าน้อยกว่า Skin depth(δ)

$$\delta=\sqrt{\frac{2\rho_{conductor}}{\omega\mu_{conductor}}}$$

เนื่องจากตัวนำที่ใช้เป็นทองแดงตีเกลียวหลายเส้นแทนตัวนำที่เป็นทองแดงเส้นเดียว

$$\rho_{copper(bundle)}=2x10^{-8}\,\Omega\cdot m$$

$$\mu_{copper}\approx 4\pi x10^{-7}\ H/m$$

$$\omega=2\pi f=2\pi x300x10^{3}\ \ rad/s$$

Skin depth มีค่า δ=0.12995mm

จึงเลือกใช้ตัวนำ SWG 37 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า δ

SWG 37 มีรัศมี r=0.08635mm

SWG 37 มีพื้นที่หน้าตัด $A_{SWG37}=0.023425mm^2$

คำนวณหาจำนวนสายตีเกลียวจาก $Bundle=\frac{A_{conductor}}{A_{SWG37}}$

ขดลวดต้องมีจำนวนสายตีเกลียวต่ำสุดเท่ากับ $Bundle=\frac{2}{0.023425}=85.37887$

เลือกใช้ตัวนำดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ชนิดของตัวนำและจำนวนสายตีเกลียวของลวดตัวนำ

ตัวนำ	จำนวนสายตีเกลียว
SWG37	86

เมื่อทำการพันเสร็จแล้วก็ปรับจูนระยะแกปให้มีค่าใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งได้ทำการปรับระยะแกปให้มีระยะ 1 มิลลิเมตร ซึ่งได้ค่าความเหนี่ยวนำประมาณ 72 ไมโครเฮนรี่ ทดสอบที่ความถี่ 300 กิโลเฮิรตซ์

บทที่ 4
การจำลองการทำงานและผลการทดลอง

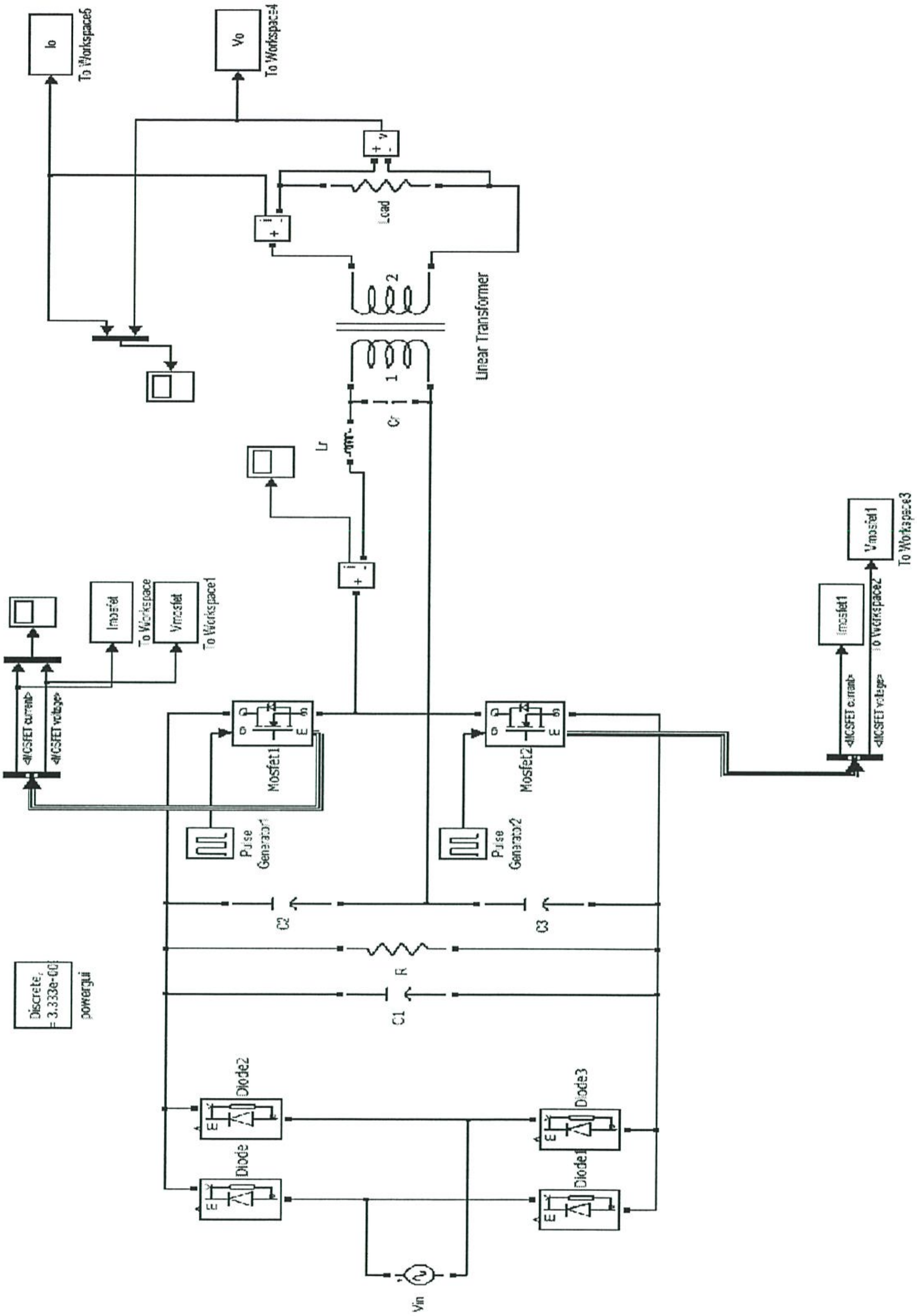
4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์ และผลที่ได้จากการทดลองของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า เพื่อวัดผลทางไฟฟ้าที่จุดต่างๆ โดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink และการทดลองการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบและสร้างที่โหลดตัวต้านทาน 300 โอห์ม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับโหลดที่ใช้ในการผ่า (อกไก่) โดยทำการวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ดังนี้

1. สัญญาณขับเกตมอสเฟต
2. แรงดันตกคร่อมมอสเฟตและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต
3. แรงดันเอาท์พุทที่อินเวอร์เตอร์
4. แรงดันเอาท์พุทขณะมีโหลด
5. แรงดันเอาท์พุทขณะไร้โหลด

4.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์

สำหรับการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink โดยใช้วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรูปที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.1 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

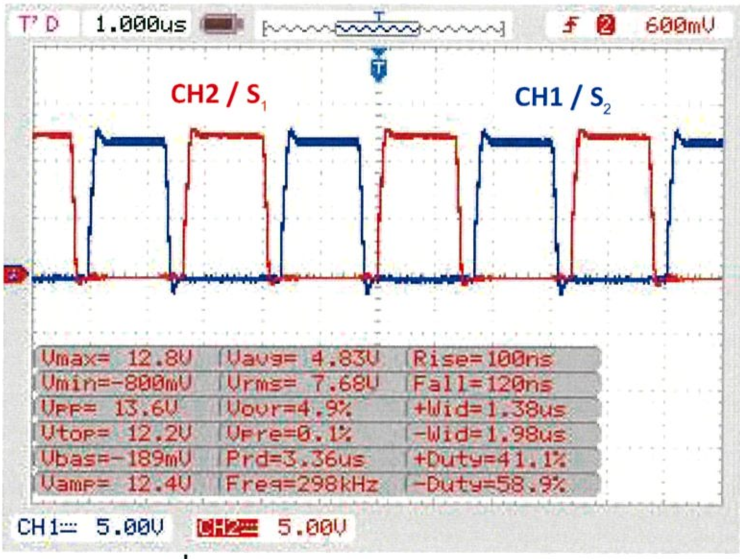
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองของวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

Rectifier			
Vin	220V		50Hz
C1	650uF		
R	300-1000Ω		
Inverter			
C2	650uF		
C3	650uF		
Pulse Generator1	300kHz	Duty50%	Delay 0 S
Pulse Generator2	300kHz	Duty50%	Delay 1/6e5 S
Resonant Converter			
Lr	60uH		
Cr	6nF		
Transformer			
Primary Voltage	300V		
Secondary Voltage	375V		
Frequency	300kHz		
Lleak	0H		
Lm	8mH		
Rc	5kΩ		

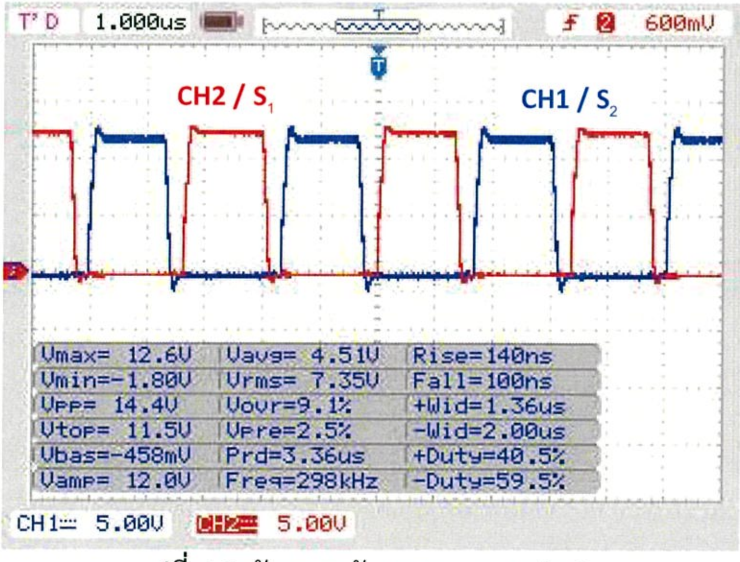
4.3 ผลการจำลองและผลการทดลอง

4.3.1 สัญญาณขับเกตมอสเฟต

วัดสัญญาณที่ขับเกตมอสเฟต ซึ่งวัดระหว่างเกตและซอร์สของมอสเฟต (V_{GS}) ได้รูปคลื่นแรงดันดังที่แสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พร้อมทั้งแสดงค่าที่วัดต่างๆ ของมอสเฟต S_1 และ S_2 ตามลำดับ



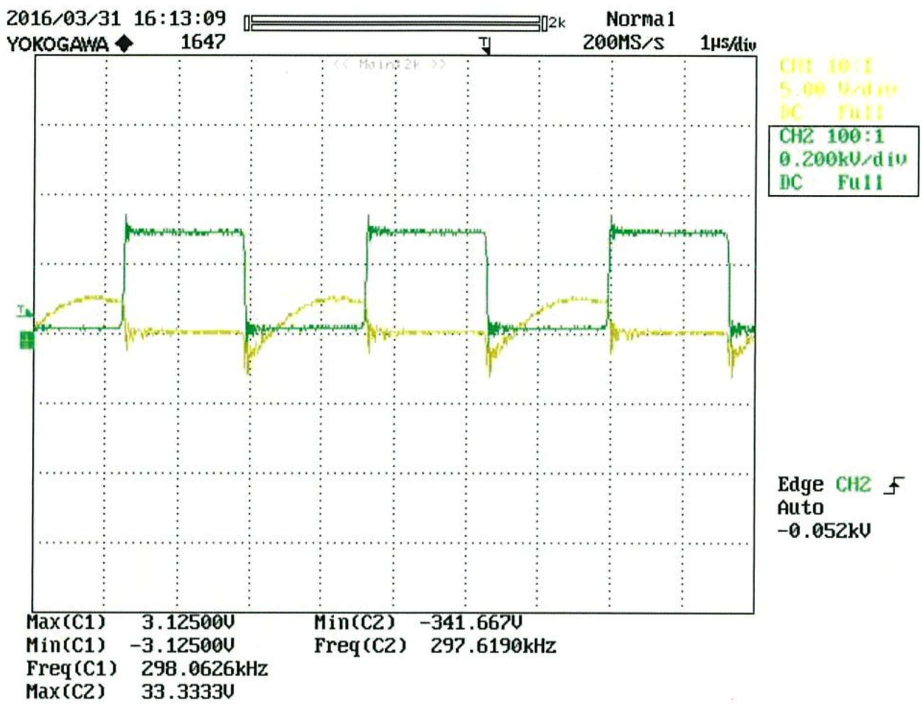
รูปที่ 4.2 สัญญาณขับเกตของมอสเฟต S_1



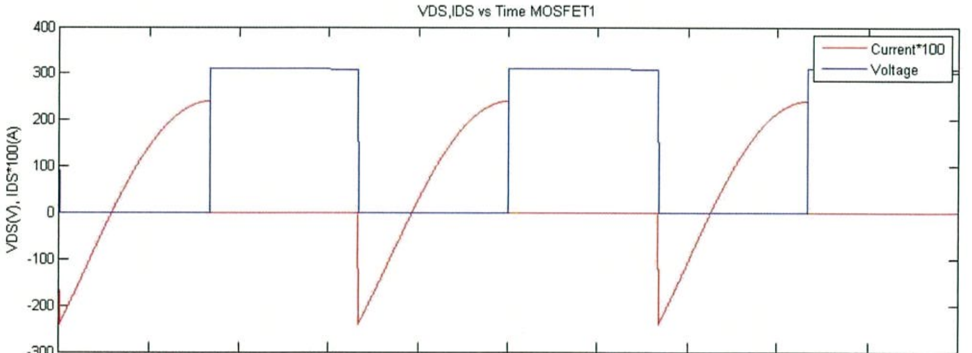
รูปที่ 4.3 สัญญาณขับเกตของมอสเฟต S_2

4.3.2 แรงดันตกคร่อมมอสเฟตและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตในสภาวะการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switching: ZVS)

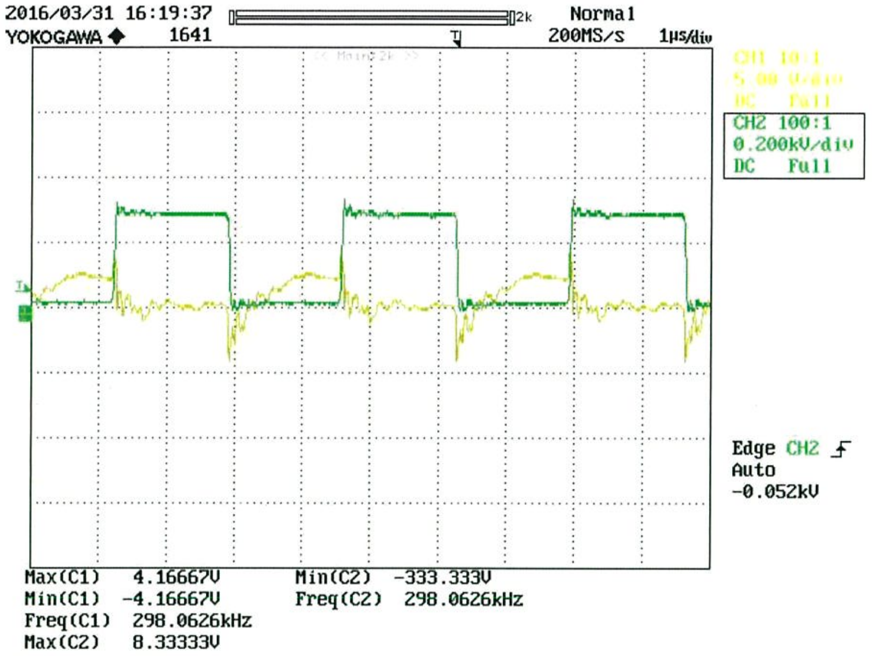
จากการใช้วงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์โดยออกแบบที่ความถี่รีโซแนนท์น้อยกว่าความถี่สวิตช์ ทำให้กระแสมีเฟสตามหลังแรงดัน จุดที่แรงดันเป็นศูนย์ก่อนมอสเฟตเริ่มนำกระแสนี้เรียกว่าการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์



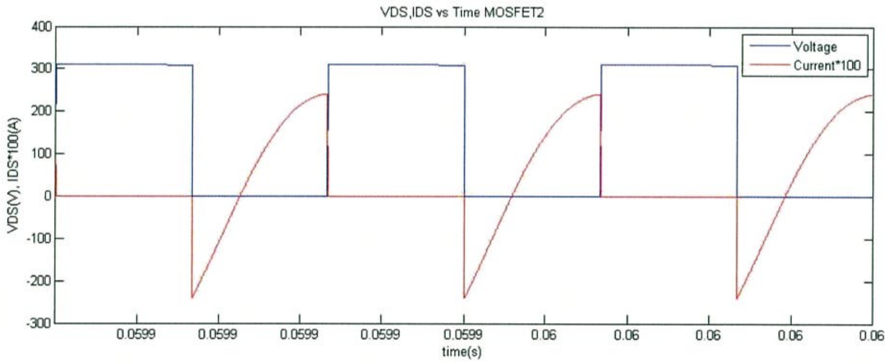
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต S_1 จากผลการทดลองที่โหลด 300 โอห์ม



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต S_1 จากผลการจำลองที่โหลด 300 โอห์ม



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต S_2
จากผลการทดลองที่โหลด 300 โอห์ม

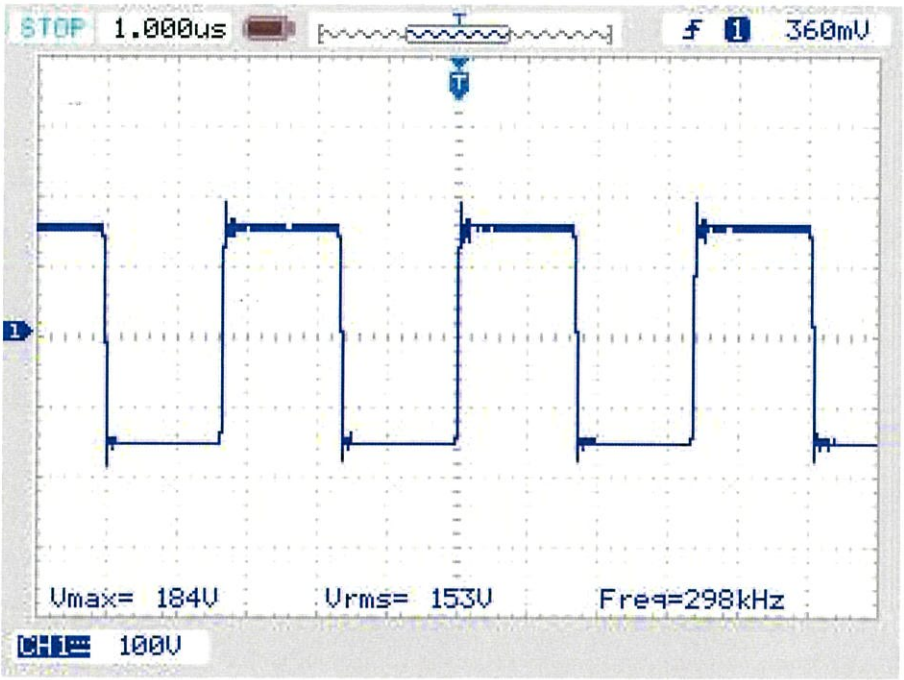


รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ผ่านไหลมอสเฟต S_2
จากผลการจำลองที่โหลด 300 โอห์ม

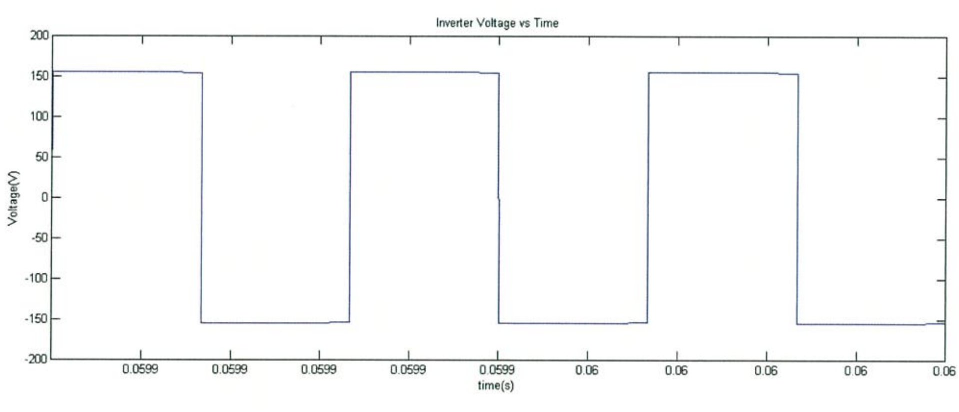
จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต S_1 และ S_2 ที่ได้จากการทดลอง รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต S_1 และ S_2 ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งพบว่าจากผลการทดลองและผลการจำลองนั้นมอสเฟตS_1 และ S_2 จะทำการสวิตช์ภายใต้แรงดันเป็นศูนย์ โดยจะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์นั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ก่อนที่มอสเฟตจะเริ่มนำกระแส

4.3.3 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์

เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) ที่ความถี่ประมาณ 300 กิโลเฮิรตซ์ ตามที่ได้ออกแบบไว้แต่ในการทดลอง รูปที่ 4.8 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์นั้นมีแรงดันสไปค์ที่มีค่ายอด 184 โวลต์ ซึ่งไม่ถึงพิกัดของมอสเฟต จึงปลอดภัยต่อการใช้งาน



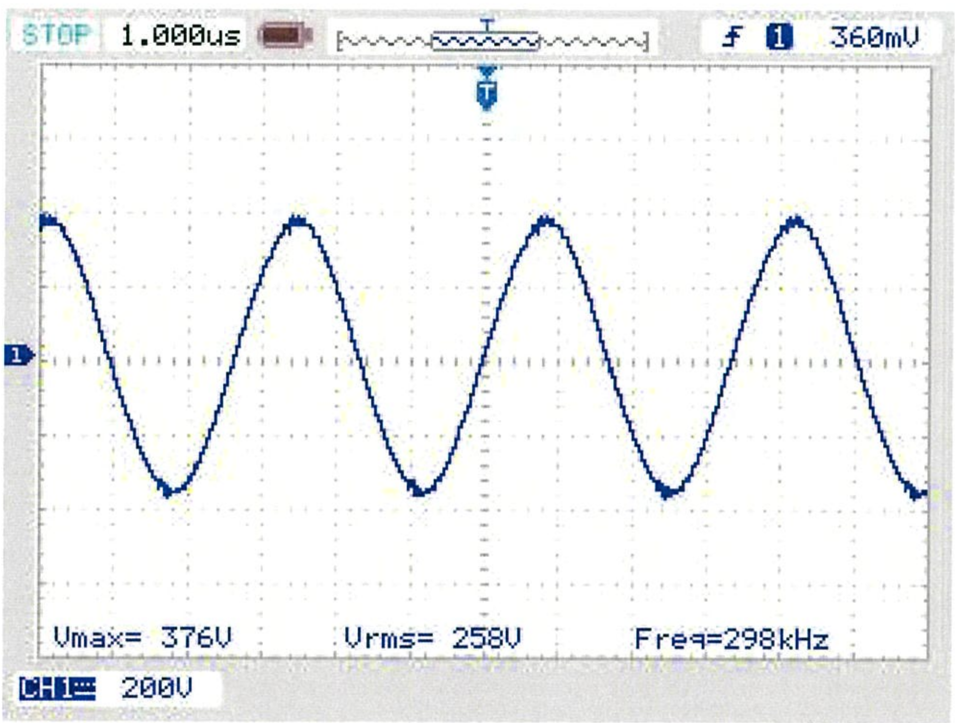
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์จากผลการทดลองที่โหลด 300 โอห์ม



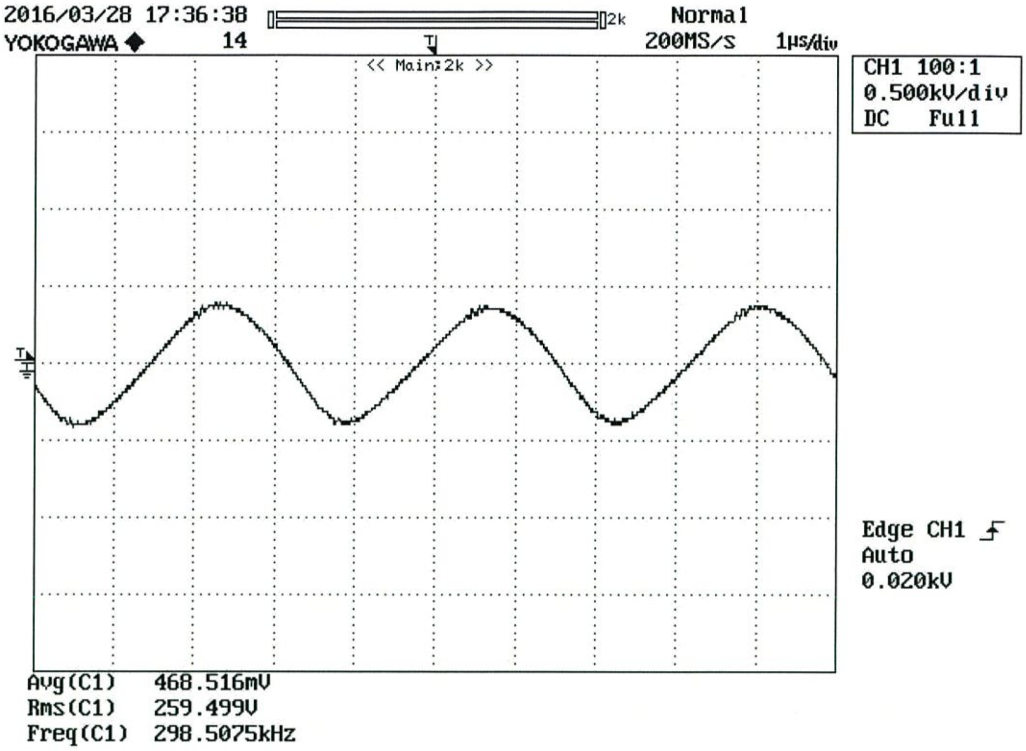
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์จากผลการจำลองที่โหลด 300 โอห์ม

4.3.4 แรงดันเอาท์พุทขณะมีโหลด

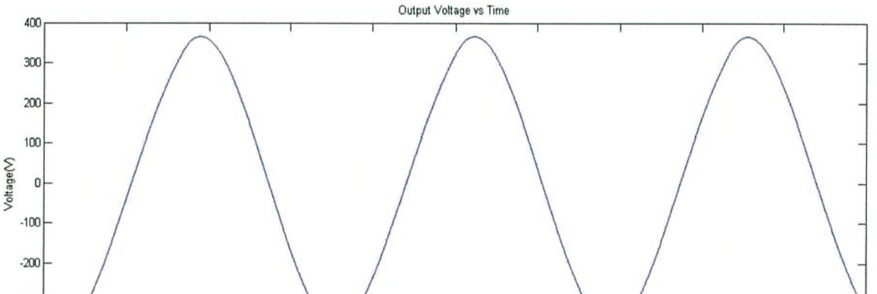
เนื่องจากวงจรแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าได้ใช้วงจรเร-โซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ทำให้แรงดันเอาท์พุทมีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์และมีค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ ทำให้กำลังที่โหลดมีค่าเพิ่มขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ โดย รูปที่ 4.10 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่เอาท์พุทที่โหลดเป็นตัวต้านทาน 300 โอห์ม, รูปที่ 4.11 แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะที่ผ่าเนื้อตัวอย่าง (อกไก่) และ รูปที่ 4.12 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่เอาท์พุทจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่โหลด 300 โอห์ม



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทที่โหลดจากผลการทดลองที่โหลด 300 โอห์ม



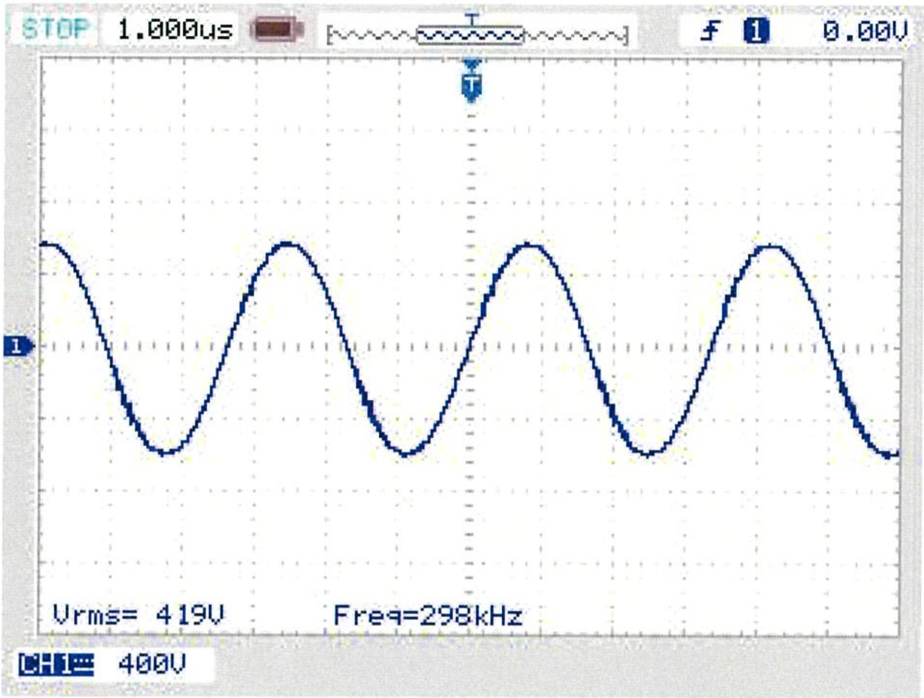
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันขณะที่ใช้มีดผ่าเนื้อตัวอย่าง (อกไก่)



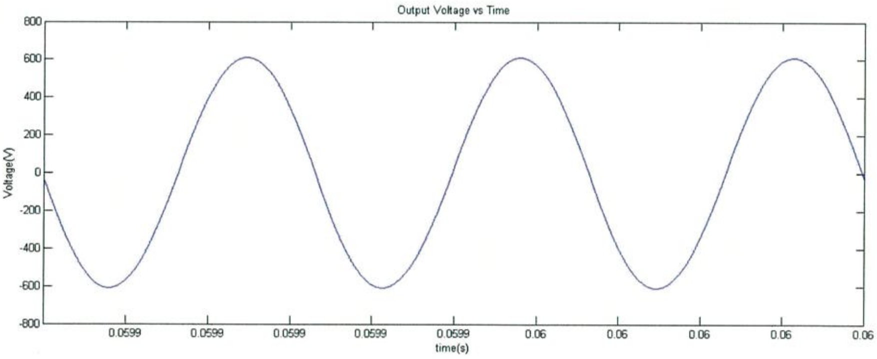
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทที่สภาวะโหลดจากการจำลองที่โหลด 300 โอห์ม

4.3.5 แรงดันเอาท์พุทขณะไร้โหลด

ในขณะไร้โหลดจากฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ทำให้แรงดันเอาท์พุทมีค่าเพิ่มขึ้นตามฟังก์ชั่นถ่ายโอนและควอลิตี้แฟคเตอร์ (Quality Factor) ของวงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทจากผลการทดลองขณะไร้โหลด



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทจากการจำลองขณะไร้โหลด

4.4 สรุปผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง

4.4.1 การเปรียบเทียบระหว่างการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

การเปรียบเทียบระหว่างการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองเพื่อทดสอบว่าวงจรที่ได้ออกแบบมาเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ เช่น ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอ็สและรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบแรงดันระหว่างผลการทดลองและผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

	ผลการทดลอง	ผลจากการจำลอง	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน
แรงดันอินเวอร์เตอร์	$153V_{rms}$	$155.500V_{rms}$	1.608 %
แรงดันเอาท์พุท	$258V_{rms}$	$227.407V_{rms}$	13.453 %
แรงดันเอาท์พุท(ไร้โหลด)	$419V_{rms}$	$431.406V_{rms}$	2.876 %

จากตารางที่ 4.2 พบว่าการจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองรวมไปถึงลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่มีลักษณะเดียวกันแต่ผลการทดลองจะมีแรงดันสไปค์ในช่วงที่สวิตช์ทำงาน ส่วนของการจำลองจะไม่มีแรงดันสไปค์ เนื่องจากอุปกรณ์เป็นอุดมคติ

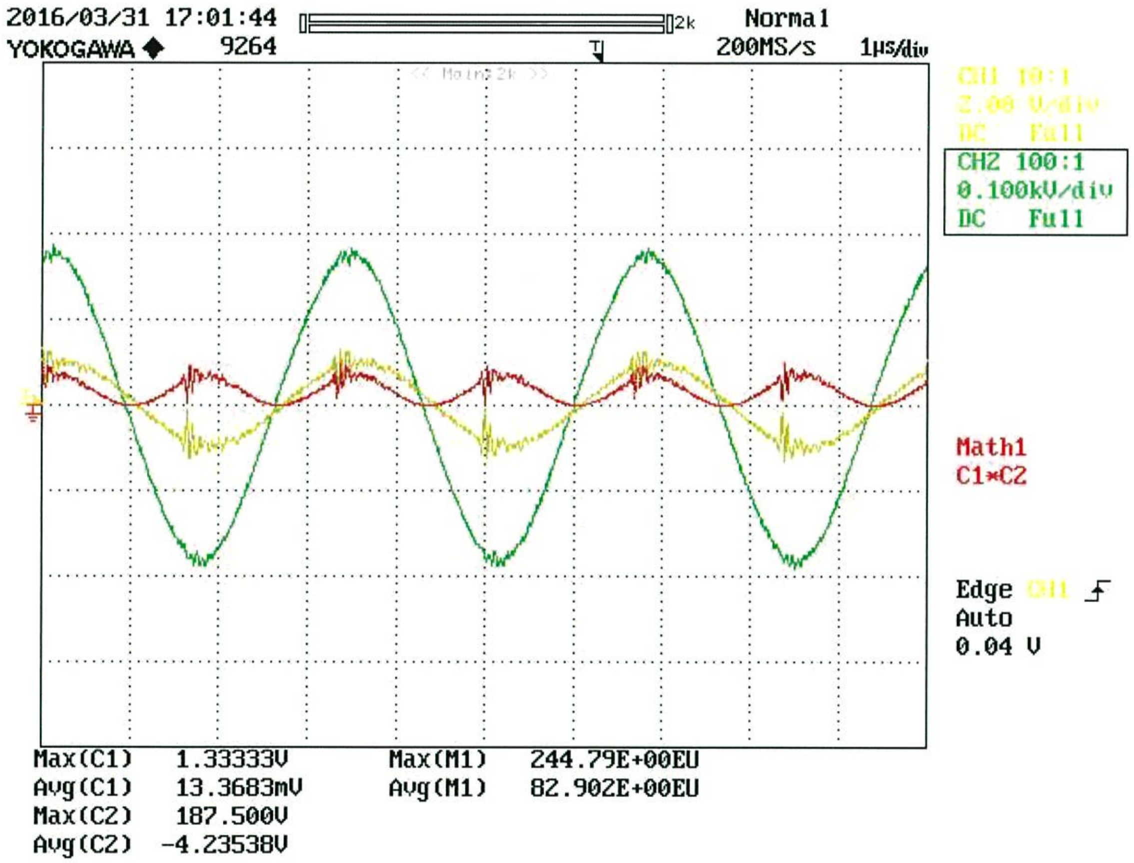
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบแรงดันเอาท์พุทระหว่างโหลด 300 โอห์มและโหลดที่ใช้ผ่า (อกไก่)

	โหลด 300 โอห์ม	โหลดเนื้อตัวอย่าง(อกไก่)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน
แรงดันเอาท์พุท	$258V_{rms}$	$259.499V_{rms}$	0.578 %

จากตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอ็สของการทดลองด้วยตัวต้านทาน 300 โอห์มมีค่าใกล้เคียงค่าแรงดันอาร์เอ็มเอ็สขณะที่ทำการผ่าอกไก่ รวมไปถึงรูปคลื่นแรงดันที่มีลักษณะเดียวกันคือเป็นสัญญาณไซน์ จึงสรุปได้ว่าการจำลองด้วยตัวต้านทาน 300 โอห์ม มีค่าใกล้เคียงกับอกไก่ทั่วไป

4.4.2 ประสิทธิภาพของวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

ทำการวัดกำลังไฟฟ้าอินพุทด้วยวัตต์มิเตอร์แบบดิจิตัลและวัดกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทด้วยออสซิโลสโคป CH1 คือแรงดันเอาท์พุท CH2 คือกระแสอินพุท ซึ่งการวัดค่ากระแสอินพุทนั้นใช้ดิฟเฟอเรนเชียลโพรบ (Differential Probe) วัดคร่อมตัวต้านทาน 1 โอห์มที่ต่ออนุกรมกับโหลด แต่ค่าปรับคูณของโพรบนั้นมีไม่ตรงกับในเครื่องออสซิโลสโคป (Probe x200 / Oscilloscope x100) จึงต้องคูณ 2 ที่กระแสและที่กำลังเอาท์พุทด้วย



รูปที่ 4.15 การวัดกำลังเอาท์พุทของวงจรจากการทดลอง

ตารางที่ 4.4 กำลังอินพุทและกำลังเอาท์พุท

ความต้านทาน	$P_{in(AVG)}$	$P_{o(AVG)}$	Efficiency
300	205.9W	165.804W	80.526%

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงมีประสิทธิภาพ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งกำลังที่สูญเสียไปจะเป็นในรูปความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ภายในวงจร หรือ อาจเกิดจากการผิดพลาดของเครื่องมือวัดรวมไปถึงสัญญาณรบกวนวงจรการวัด

รูปที่ 4.16 การผ่าเนื้อตัวอย่าง (อกไก่)

บทที่ 5
สรุปผล

จากการศึกษาและการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ จึงได้ทำการออกแบบและสร้างวงจรด้วยอุปกรณ์ดังนี้ใช้ Bridge diode rectifier 1 phase GBPC3508, electrolytic capacitor 450V/680μF จำนวน 3 ตัว, MOSFET IRF840PBF จำนวน 2 ตัว, เรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนท์ 230 กิโลเฮิรตซ์ และควอลิตี้แฟคเตอร์ที่ 1.74 ที่โหลด 300 โอห์ม ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุเป็นประเภทมีฟิล์มและไม่มีขั้ว MKBP10 จำนวน 135 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงใช้แกนเฟอร์ไรต์ ETD 39 พันลวด SWG 37 ตีเกลียว 85 เส้น จำนวนรอบการพัน 17 รอบ ระยะแกป 1 มิลลิเมตร, หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ใช้แกนเฟอร์ไรต์ ETD 49 พันลวดฝั่งปฐมภูมิด้วย SWG 33 ตีเกลียว 15 เส้น จำนวนรอบการพัน 20 รอบ พันลวดฝั่งทุติยภูมิด้วย SWG 33 ตีเกลียว 15 เส้น จำนวนรอบการพัน 25 รอบ

จากการวัดค่าแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าที่โหลด 300 โอห์ม แรงดันอินพุท 220V/50Hz พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์และมีประสิทธิภาพ 80 % จากการทดลองด้วยตัวต้านทานขนาด 300 โอห์ม พบว่ามีสภาพใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อตัวอย่าง (อกไก่) ซึ่งที่แรงดันอินพุท220V/50Hz เมื่อผ่าเนื้อเยื่อตัวอย่างคาดว่ามีกำลังไฟฟ้ามากเกินไปทำให้เนื้อเยื่อฉีกขาดได้อย่างรวดเร็วแต่เนื้อเยื่อบริเวณที่เกิดการฉีกขาดนั้นเกิดอาการไหม้และมีควันเกิดขึ้น เมื่อลดแรงดันอินพุทให้เหลือประมาณ 150V/50Hz พบว่าสามารถผ่าเนื้อเยื่อตัวอย่างได้แต่ไม่แรงเท่าที่แรงดันพิกัด บริเวณที่เนื้อเยื่อฉีกขาดไม่เกิดอาการไหม้และไม่มีควัน

ข้อเสนอแนะ

โดยปัจจุบันวงจรไม่สามารถปรับปรุงแรงดันอินพุต-เอาท์พุตได้เองโดยอัตโนมัติ เมื่อเนื้อเยื่อที่นำมาใช้ผ่า เป็นคนละชนิดกันหรือความหนาไม่เท่ากัน ความแรงของมีดที่ใช้ผ่าจะไม่เท่ากันอันเนื่องมาจากความต้านนั้นมีค่าแตกต่างกัน อาจทำให้ชิ้นเนื้อที่ผ่าเกิดการไหม้ขึ้นบริเวณที่ถูกผ่า จึงขอเสนอว่าควรมีวงจรเพื่อปรับปรุงให้แรงดันอินพุต-เอาท์พุทเองได้โดยอัตโนมัติให้เหมาะสมกับชนิดเนื้อแต่ละประเภท

เอกสารอ้างอิง

[1] A Surgeon's Electric Knife: Surgery with High Frequency Currents from : :http://h2g2.com/ edited_entry/A762644

[2] บทความ เรื่อง มีดไฟฟ้า from : http://hosdoc.com/index.php?option=com_content &view=article&id=72%3Aelectronic-knife&catid=18%3Aof-electricity-to-captive&Itemid=14

[3] D. A. Friedrichs, R. W. Erickson, and James Gilbert, “A New Dual Current-Mode Controller Improves Power Regulation in Electrosurgical Generators,” IEEE Trans. Biomedical Circuits and Systems, Vol.6 , Issue 1, 2012, pp. 39-44.

[4] วีระเชษฐ์ ขันเงิน และ วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2553. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, กรุงเทพฯ: วี.เจ. พรินติ้ง

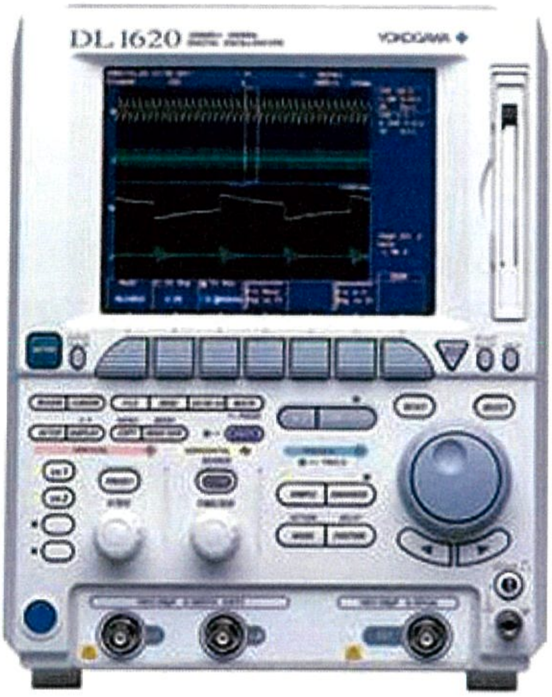
[5] อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, เอกสารประกอบการสอนวิชาการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและหม้อแปลง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542

[6] Bo Yang, “llc resonant converter”, Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System, Blacksburg Virginia, September 12, 2003

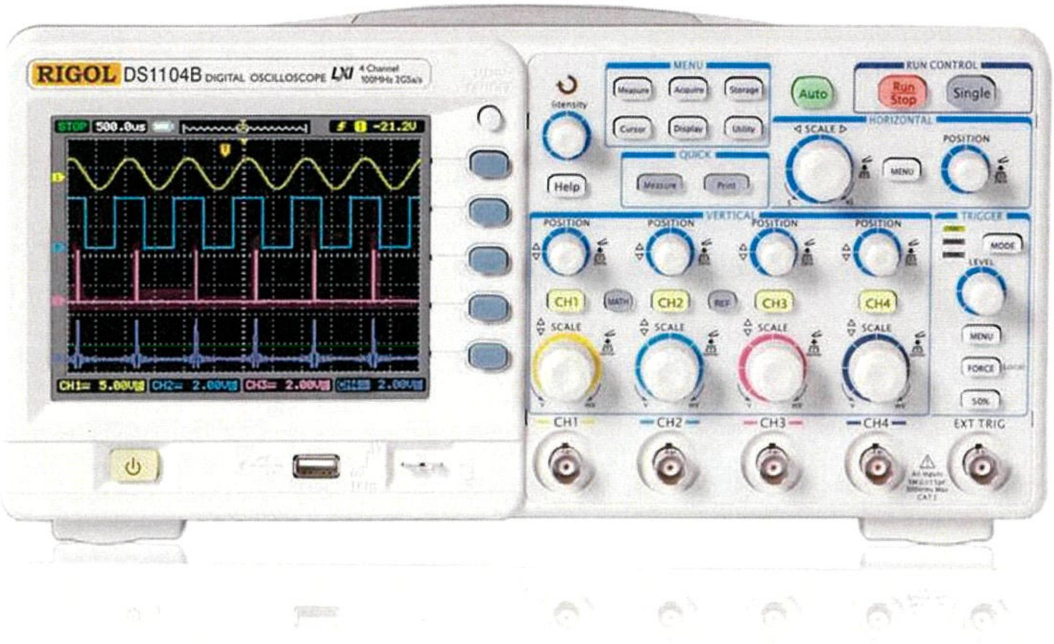
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์การวัด



Digital Oscilloscope (YOKOGAWA) รุ่น DL1620-701605 (2 Channel) 200MHz Analog Bandwidth 200Ms/s on two channels 8 bit vertical resolution DC to 30 MHz, 850V (DC+AC peak)2% DC accuracy, Internal low pass filter



Digital Oscilloscope (RIGOL) รุ่น DS1000B

4 Analog Channels + external trigger, 2 GSa/sec max sample rate, 5.7" TFT QVGA (320×240) with 64K color LED backlight display with power save mode, Advanced trigger modes including Edge, Video, Pulse Width, Alternate and Pattern trigger

Multimeter (Hewlett-Packard) รุ่น973A Dual Display Handheld Multimeter

- Accuracy: 0.1% for dc, 0.7% for ac, 0.2% for ohms, 1.2% for capacitance
- Display count: 4,000
- Includes true rms ac response, ac+dc, dB and dB
- Thermocouple and thermistor inputs
- Dual digital displays

700978 - Yokogawa Passive Probe, 4000Vp, 100MHz, 100:1, 50MO

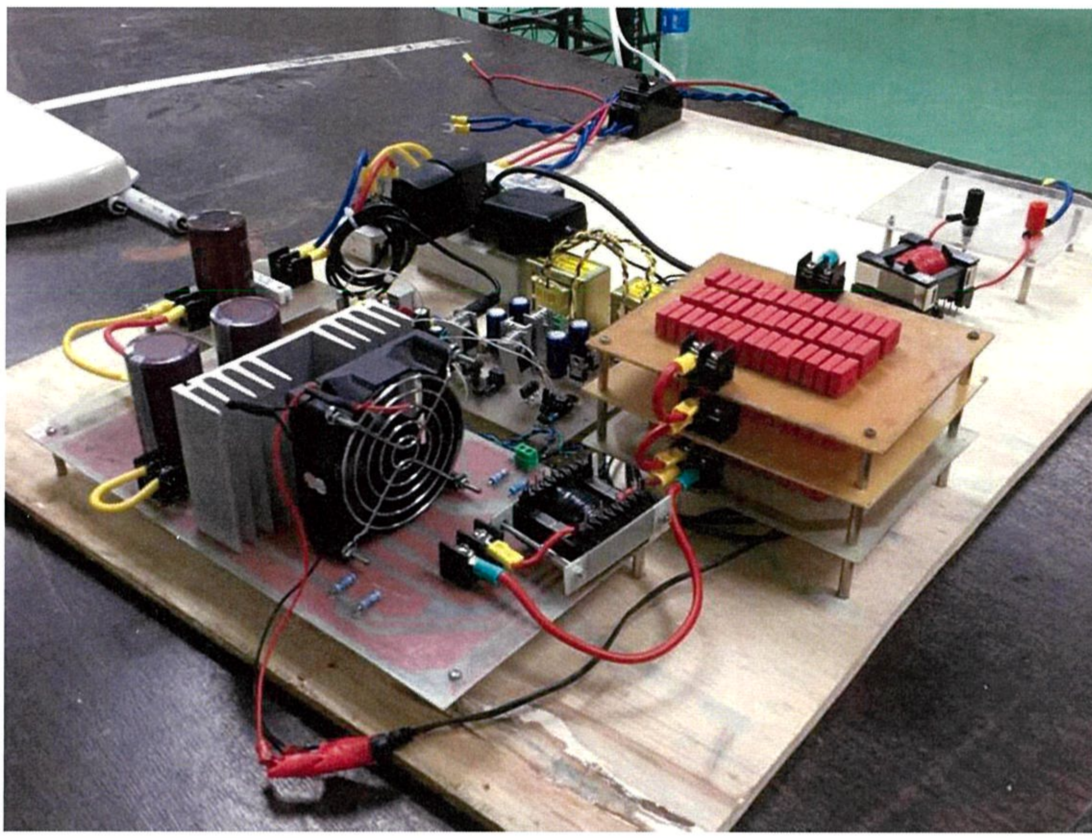
Texas60- Texas Passive Probe, 600Vp, 10:1 60MHz, 1:1 15MHz

Differential Probe (PINTEK DP-25), 1000Vp, 25MHz

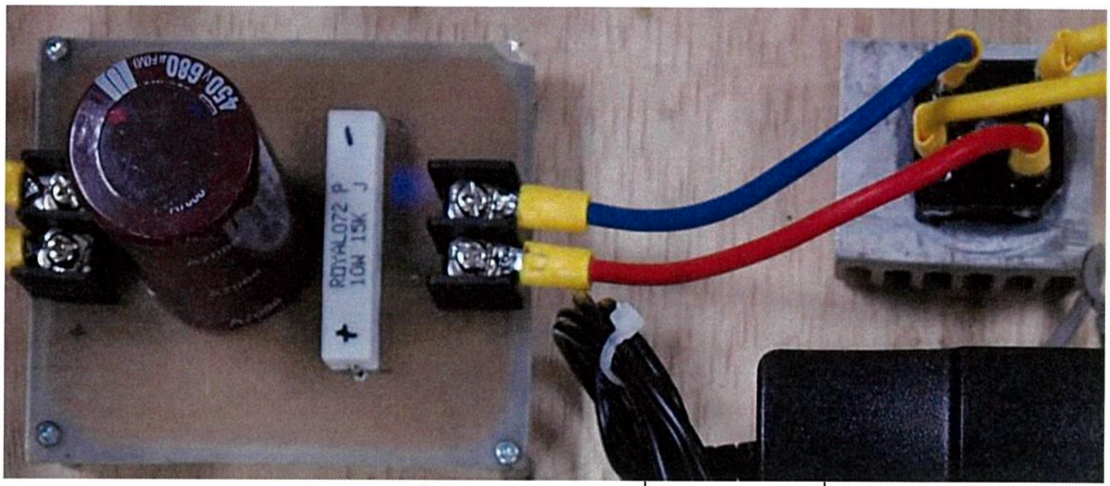
Metrix PX 110 - PX 120 Single and Three-Phase TRMS AC/DC Digital Wattmeter

ภาคผนวก ข

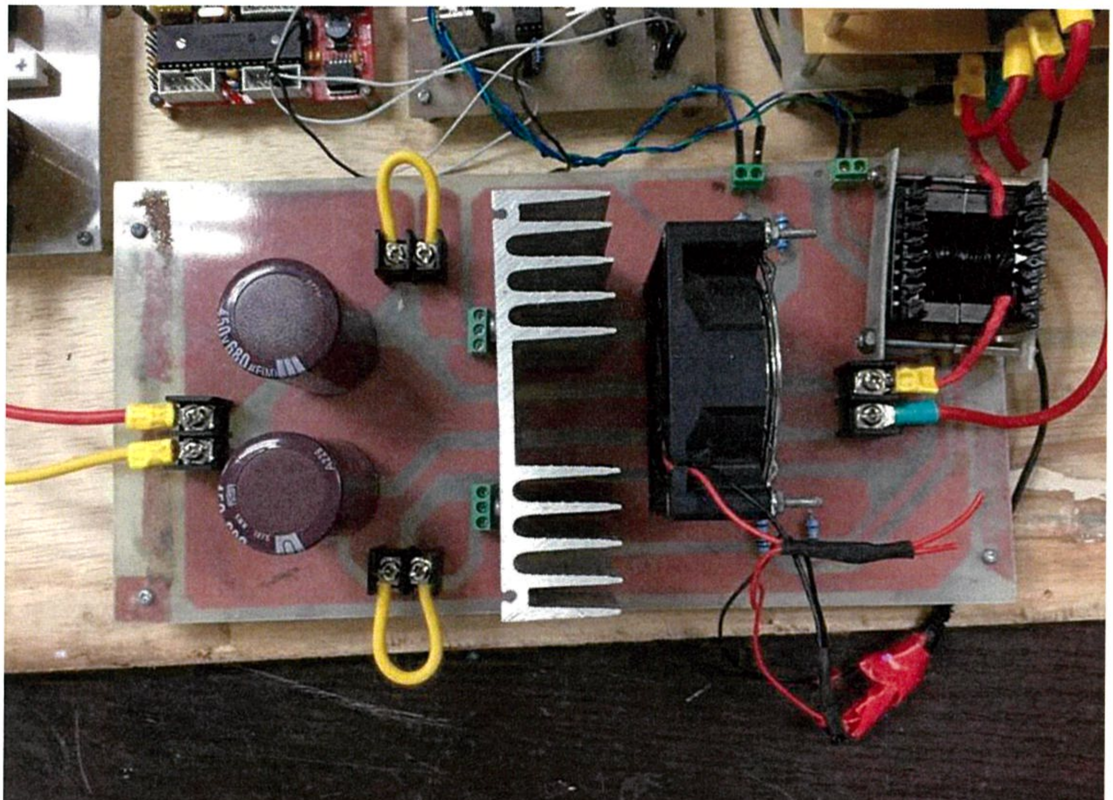
ภาพโครงงานโดยรวมของงานวิจัยและภาพต้นแบบงานวิจัย



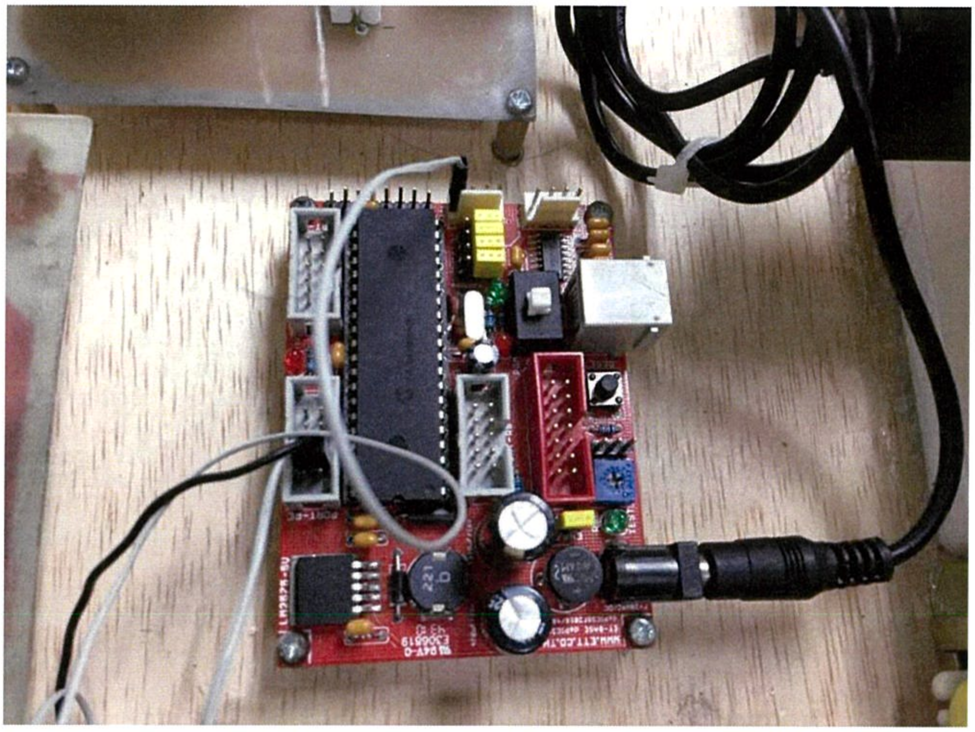
รูปโดยรวมของวงจรแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า



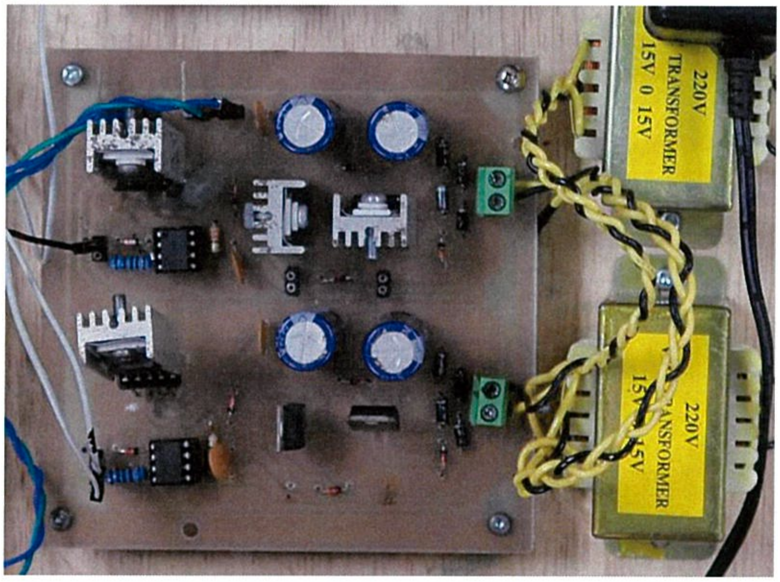
วงจรเรียงกระแสพร้อมกับตัวเก็บประจุเพื่อลดแรงดันกระเพื่อม



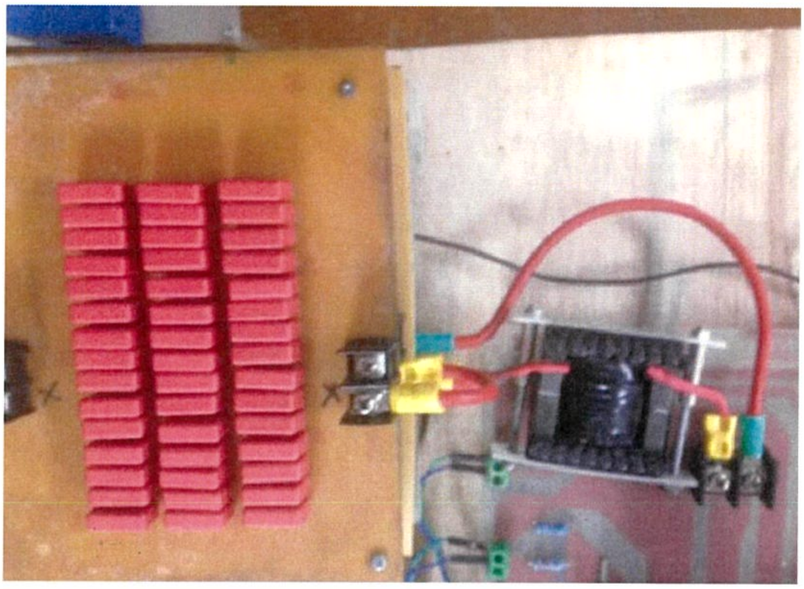
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์และพัดลมระบายความร้อน



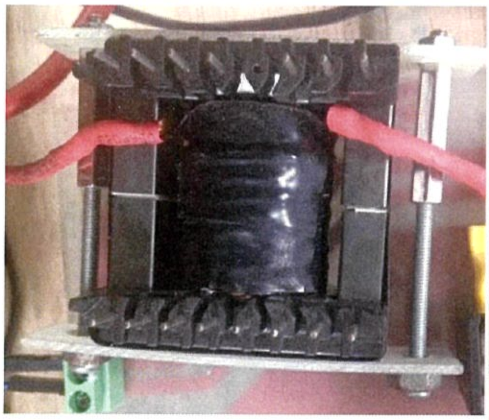
ไมโครคอนโทรลเลอร์

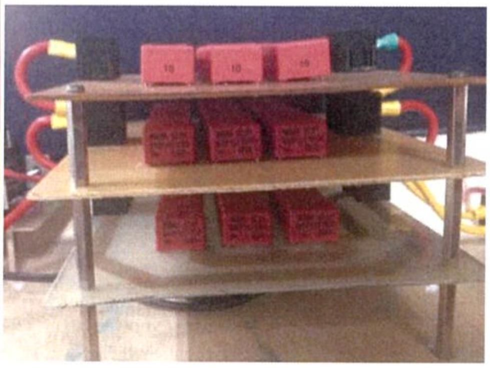


ชุดวงจรขับมอสเฟต S_1 และ S_2



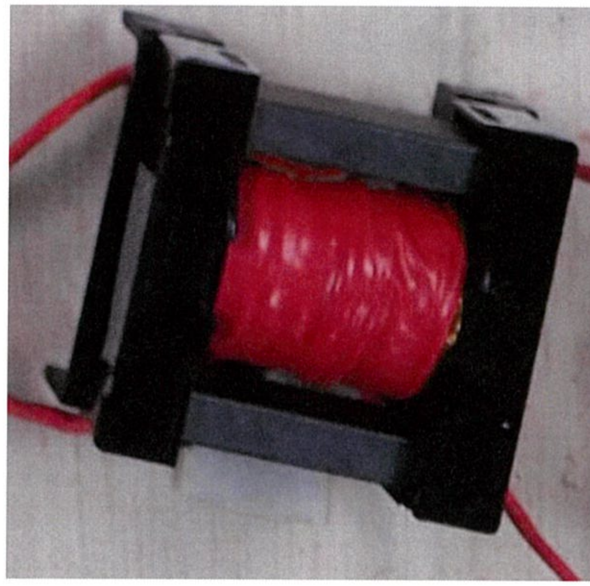
วงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์





ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง

ตัวเก็บประจุประแบบฟิล์ม



หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

ภาคผนวก ค

โค้ดที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

```
#include "p30f4011.h"

#include "pwm.h"

#include "timer.h"

/*************************************

*        Configure Fuses            *

*************************************/

_FOSC(CSW_FSCM_OFF & XT_PLL16);

_FWDT(WDT_OFF);

_FBORPOR(PBOR_OFF & MCLR_EN & PWRT_OFF & PWMxH_ACT_HI);

_FGS(CODE_PROT_OFF);

/*************************************

*     Oscillator Calculations        *

*************************************/

#define FOSC 7372800*16

#define FCY (FOSC / 4)

/**************************************************

* Function: int main(void)                         *

* Purpose: program entry point                     *

* Description: This is where the main loop resides. *

**************************************************/
```

```
int main(void)
{
        Init_PWM();


        while(1)
        {
                PDC2 = 98  ;
        }
}


void Init_PWM(void)
{
   //   //**** PTCON: PWM Time Base Control Register ****/
        PTCONbits.PTEN   = 0;
        PWMCON1bits.PEN2H = 1;
        PWMCON1bits.PEN2L = 1;
        PTCONbits.PTCKPS = 0;
        PTCONbits.PTOPS  = 0;
        PTCONbits.PTSIDL = 0;
        PTCONbits.PTMOD  = 0;
Running Mode
        PTCONbits.PTEN   = 1;
```

```
DTCON1=0b0000100100001001;

    /**** PTPER: PWM Time Base Period Register ****/

    PTPERbits.PTPER = 98; // Perio Value bits}
```

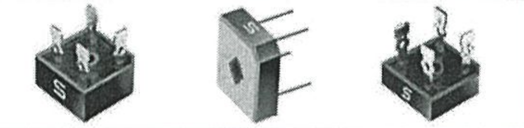
ภาคผนวก ง

Datasheet อุปกรณ์

TSC

GBPC 15, 25, 35 SERIES

High Current 15, 25, 35 AMPS. Single Phase Glass Passivated Bridge Rectifiers

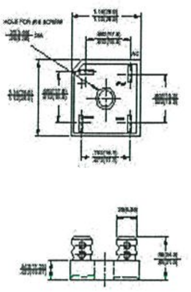


Voltage Range
50 to 1000 Volts
Current
15.0/25.0/35.0 Amperes

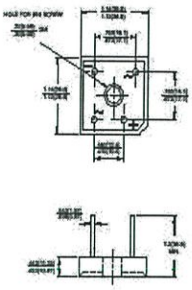
Features

- UL Recognized file # E-96005
- The plastic material used carries Underwriters Laboratory Flammability Recognition 94V-0
- Integrally molded heatsink provide very low thermal resistance for maximum heat dissipation
- Surge overload ratings from 300 amperes to 400 amperes
- Terminals solderable per MIL-STD-202, Method 208 (For wire type)
- Typical I_R less than 0.2 uA
- High temperature soldering guaranteed: 260℃/ 10 seconds / .375", (9.5mm) lead lengths(For wire type)
- Isolated voltage from case to lead over 2500 volts

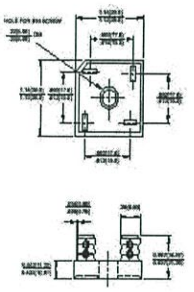
GBPC



GBPC-W



GBPC-M



Dimensions in inches and (millimeters)

Maximum Ratings and Electrical Characteristics

Rating at 25℃ ambient temperature unless otherwise specified.
Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%

Type Number		Symbol	-005	-01	-02	-04	-06	-08	-10	Units
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage		V_{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS Voltage		V_{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC Blocking Voltage		V_{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum Average Forward Rectified Current @T_C= 55℃	GBPC15 GBPC25 GBPC35	$I_{(AV)}$	15.0 25.0 35.0							A
Peak Forward Surge Current, Single Sine-wave Superimposed on Rated Load (JEDEC method)	GBPC15 GBPC25 GBPC35	I_{FSM}	300 300 400							A
Maximum Instantaneous Forward Voltage Drop Per Element at Specified Current	GBPC15 7.5A GBPC25 12.5A GBPC35 17.5A	V_F	1.1							V
Maximum DC Reverse Current at Rated DC Blocking Voltage Per Element		I_R	5							uA
Typical Thermal Resistance (Note 1)		$R\theta_{JC}$	1.5							℃/W
Operating and Storage Temperature Range		T_J, T_{STG}	-50 to +150							℃

Notes: 1. Thermal Resistance from Junction to Case.
2. Suffix "W" - Wire Lead Structure/"M" - Terminal Location Face to Face.

GBPC15005 GBPC1510
RATINGS AND CHARACTERISTIC CURVES (GBPC25005 THRU GBPC2510)
GBPC35005 GBPC3510

FIG.1- MAXIMUM FORWARD CURRENT DERATING CURVE

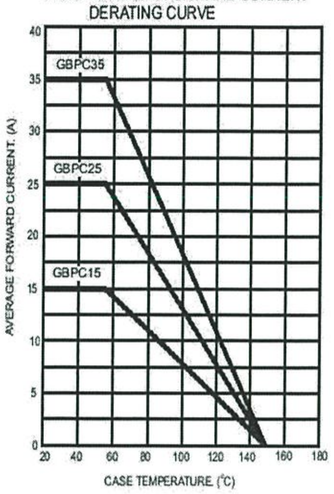


FIG.2- MAXIMUM NON-REPETITIVE FORWARD SURGE CURRENT PER BRIDGE ELEMENT

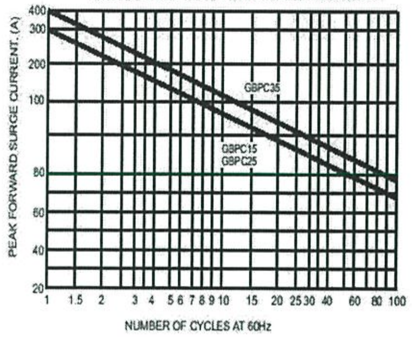


FIG.3- TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS PER BRIDGE ELEMENT

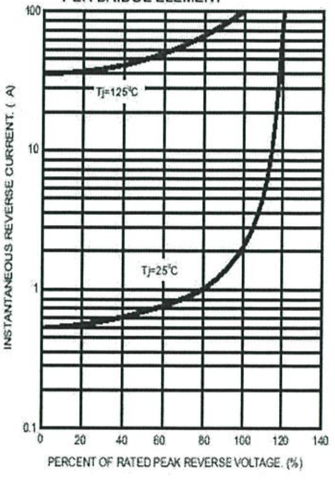
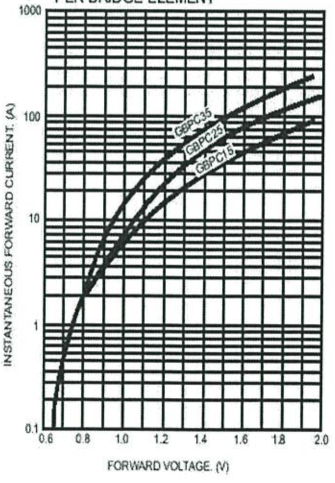


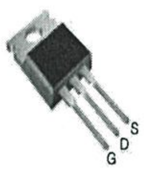
FIG.4- TYPICAL FORWARD CHARACTERISTICS PER BRIDGE ELEMENT

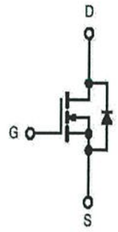


Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY		
V_{DS} (V)	500	
$R_{DS(on)}$ (Ω)	V_{GS} = 10 V	0.85
Q_g (Max.) (nC)	63	
Q_{gs} (nC)	9.3	
Q_{gd} (nC)	32	
Configuration	Single	

TO-220AB





N-Channel MOSFET

FEATURES

- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC

Pb Available

RoHS* COMPLIANT

DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.

ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF840PbF
	SiHF840-E3
SnPb	IRF840
	SiHF840

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T_C = 25 °C, unless otherwise noted)					
PARAMETER			SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage			V_{DS}	500	V
Gate-Source Voltage			V_{GS}	± 20	V
Continuous Drain Current	V_{GS} at 10 V	T_C = 25 °C	I_D	8.0	A
		T_C = 100 °C		5.1	
Pulsed Drain Current[a]			I_{DM}	32	
Linear Derating Factor				1.0	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy[b]			E_{AS}	510	mJ
Repetitive Avalanche Current[a]			I_{AR}	8.0	A
Repetitive Avalanche Energy[a]			E_{AR}	13	mJ
Maximum Power Dissipation	T_C = 25 °C		P_D	125	W
Peak Diode Recovery dV/dt[c]			dV/dt	3.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range			T_J, T_{stg}	- 55 to + 150	°C
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s			300[d]	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw			10	lbf · in
				1.1	N · m

Notes

a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).

b. V_{DD} = 50 V, starting T_J = 25 °C, L = 14 mH, R_g = 25 Ω, I_{AS} = 8.0 A (see fig. 12).

c. $I_{SD} \leq$ 8.0 A, dI/dt $\leq$ 100 A/μs, $V_{DD} \leq V_{DS}$, $T_J \leq$ 150 °C.

d. 1.6 mm from case.

* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

This datasheet is subject to change without notice.
THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	**SYMBOL**	**TYP.**	**MAX.**	**UNIT**
Maximum Junction-to-Ambient	R_{thJA}	-	62	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	R_{thCS}	0.50	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	R_{thJC}	-	1.0	

SPECIFICATIONS (T_J = 25 °C, unless otherwise noted)							
PARAMETER	**SYMBOL**	**TEST CONDITIONS**		**MIN.**	**TYP.**	**MAX.**	**UNIT**
Static							
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	V_{GS} = 0 V, I_D = 250 µA		500	-	-	V
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to 25 °C, I_D = 1 mA		-	0.78	-	V/°C
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250 µA		2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	V_{GS} = ± 20 V		-	-	± 100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	V_{DS} = 500 V, V_{GS} = 0 V		-	-	25	µA
		V_{DS} = 400 V, V_{GS} = 0 V, T_J = 125 °C		-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	V_{GS} = 10 V	I_D = 4.8 A[b]	-	-	0.85	Ω
Forward Transconductance	g_{fs}	V_{DS} = 50 V, I_D = 4.8 A[b]		4.9	-	-	S
Dynamic							
Input Capacitance	C_{iss}	V_{GS} = 0 V,		-	1300	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}	V_{DS} = 25 V,		-	310	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}	f = 1.0 MHz, see fig. 5		-	120	-	
Total Gate Charge	Q_g	V_{GS} = 10 V	I_D = 8 A, V_{DS} = 400 V, see fig. 6 and 13[b]	-	-	63	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}			-	-	9.3	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}			-	-	32	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	V_{DD} = 250 V, I_D = 8 A		-	14	-	ns
Rise Time	t_r	R_g = 9.1 Ω, R_D = 31 Ω, see fig. 10[b]		-	23	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$			-	49	-	
Fall Time	t_f			-	20	-	
Internal Drain Inductance	L_D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact		-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L_S			-	7.5	-	
Drain-Source Body Diode Characteristics							
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode		-	-	8.0	A
Pulsed Diode Forward Current[a]	I_{SM}			-	-	32	
Body Diode Voltage	V_{SD}	T_J = 25 °C, I_S = 8 A, V_{GS} = 0 V[b]		-	-	2.0	V
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	T_J = 25 °C, I_F = 8 A, dI/dt = 100 A/µs[b]		-	460	970	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}			-	4.2	8.9	µC
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)					

Notes

a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
b. Pulse width ≤ 300 µs; duty cycle ≤ 2 %.

This datasheet is subject to change without notice.
THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

TYPICAL CHARACTERISTICS (25 °C, unless otherwise noted)

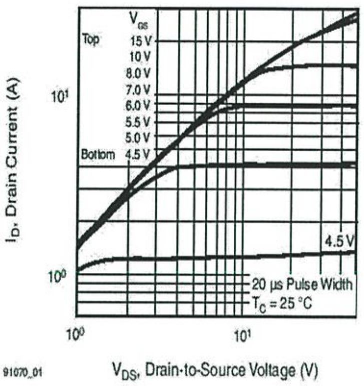


Fig. 1 - Typical Output Characteristics, T_C = 25 °C

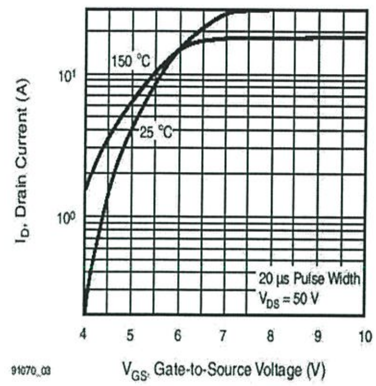


Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics

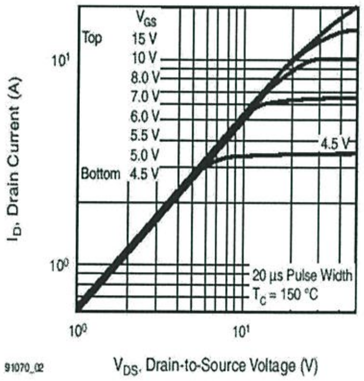


Fig. 2 - Typical Output Characteristics, T_C = 150 °C

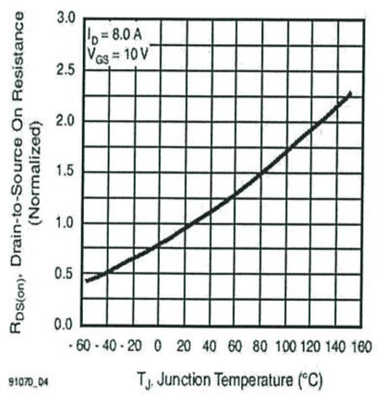


Fig. 4 - Normalized On-Resistance vs. Temperature

This datasheet is subject to change without notice.
THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

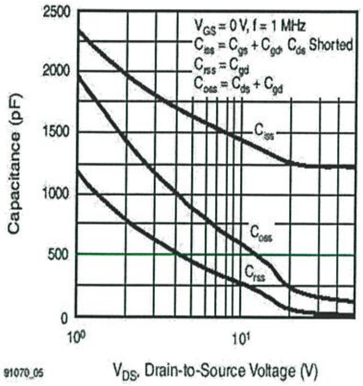


Fig. 5 - Typical Capacitance vs. Drain-to-Source Voltage

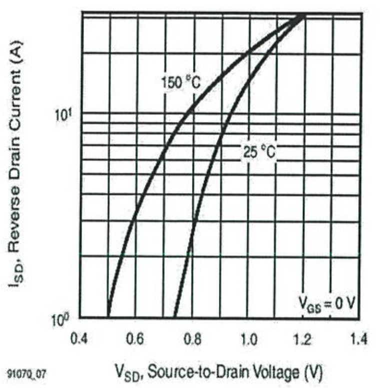


Fig. 7 - Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

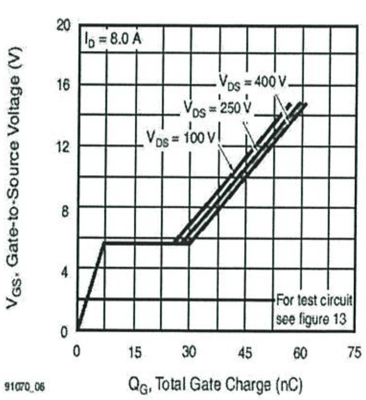


Fig. 6 - Typical Gate Charge vs. Drain-to-Source Voltage

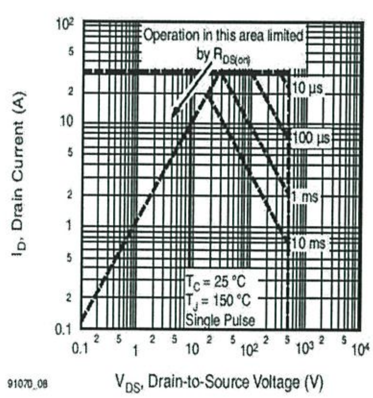


Fig. 8 - Maximum Safe Operating Area

This datasheet is subject to change without notice.
THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

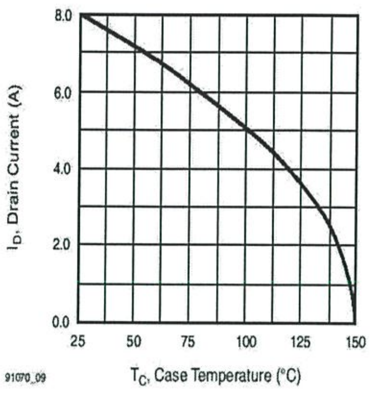


Fig. 9 - Maximum Drain Current vs. Case Temperature

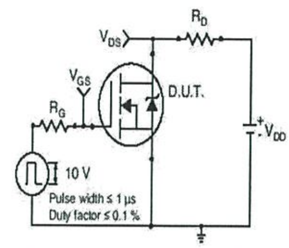


Fig. 10a - Switching Time Test Circuit

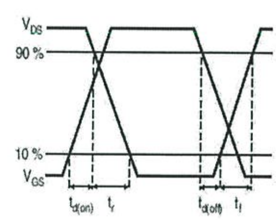


Fig. 10b - Switching Time Waveforms

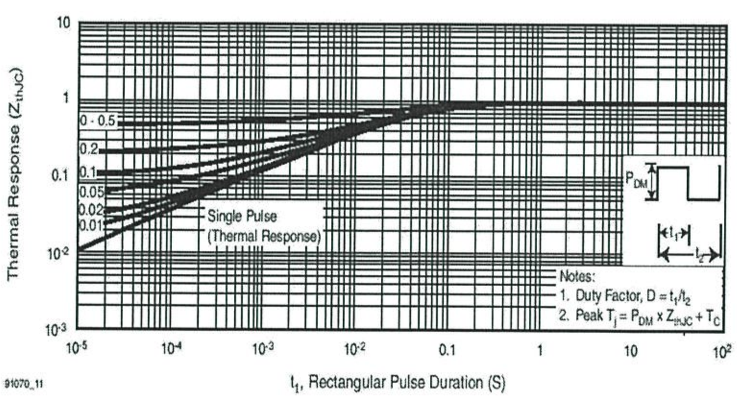


Fig. 11 - Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

This datasheet is subject to change without notice.
THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

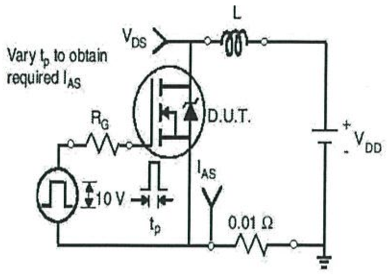


Fig. 12a - Unclamped Inductive Test Circuit

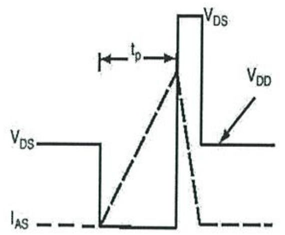


Fig. 12b - Unclamped Inductive Waveforms

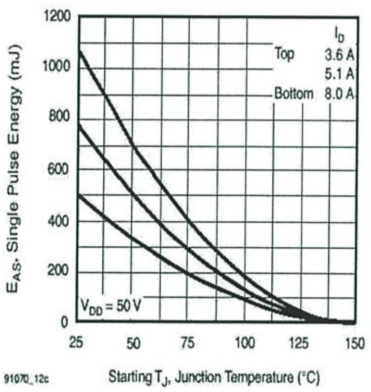


Fig. 12c - Maximum Avalanche Energy vs. Drain Current

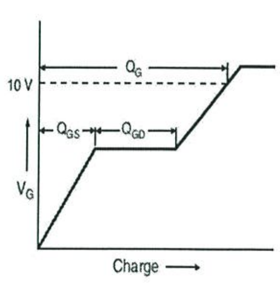


Fig. 13a - Basic Gate Charge Waveform

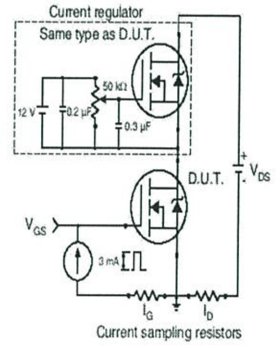
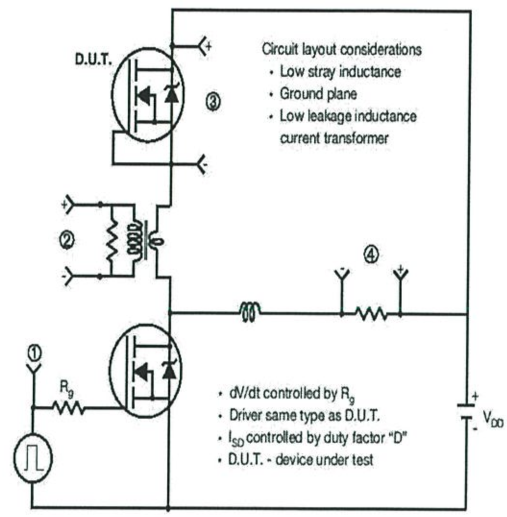
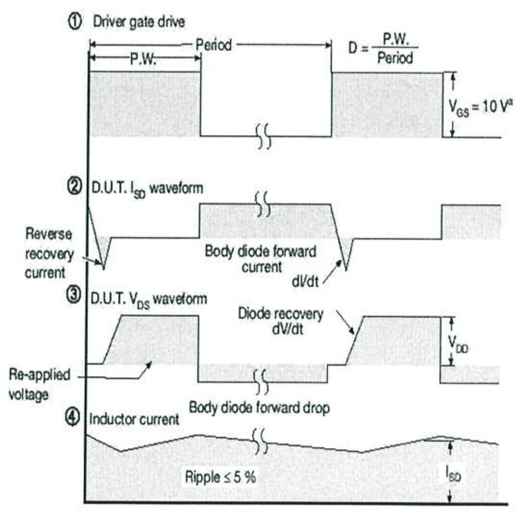


Fig. 13b - Gate Charge Test Circuit

This datasheet is subject to change without notice.
THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

Peak Diode Recovery dV/dt Test Circuit





Note

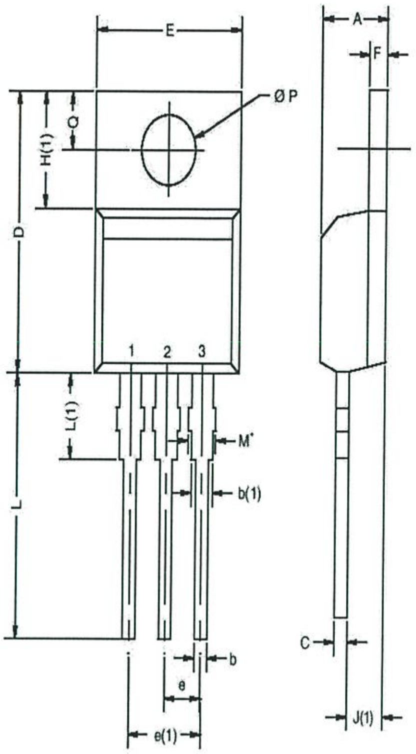
a. V_{GS} = 5 V for logic level devices

Fig. 14 - For N-Channel

Vishay Siliconix maintains worldwide manufacturing capability. Products may be manufactured at one of several qualified locations. Reliability data for Silicon Technology and Package Reliability represent a composite of all qualified locations. For related documents such as package/tape drawings, part marking, and reliability data, see www.vishay.com/ppg?91070.

This datasheet is subject to change without notice.
THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

TO-220AB

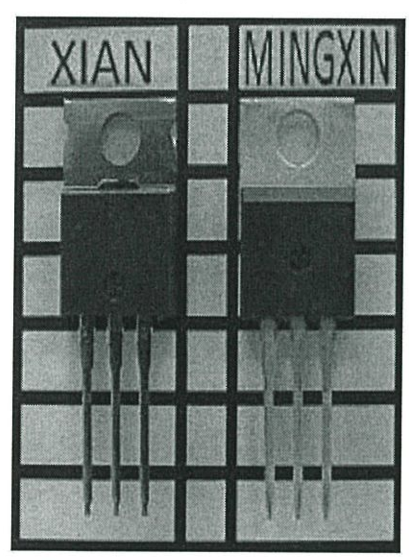


DIM.	MILLIMETERS MIN.	MILLIMETERS MAX.	INCHES MIN.	INCHES MAX.
A	4.25	4.65	0.167	0.183
b	0.69	1.01	0.027	0.040
b(1)	1.20	1.73	0.047	0.068
c	0.36	0.61	0.014	0.024
D	14.85	15.49	0.585	0.610
E	10.04	10.51	0.395	0.414
e	2.41	2.67	0.095	0.105
e(1)	4.88	5.28	0.192	0.208
F	1.14	1.40	0.045	0.055
H(1)	6.09	6.48	0.240	0.255
J(1)	2.41	2.92	0.095	0.115
L	13.35	14.02	0.526	0.552
L(1)	3.32	3.82	0.131	0.150
Ø P	3.54	3.94	0.139	0.155
Q	2.60	3.00	0.102	0.118
ECN: X12-0208-Rev. N, 08-Oct-12 DWG: 5471				

Notes

* M = 1.32 mm to 1.62 mm (dimension including protrusion)
Heatsink hole for HVM

- Xi'an and Mingxin actual photo



For technical questions, contact: hvm@vishay.com
THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and/or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify and hold Vishay and its distributors harmless from and against any and all claims, liabilities, expenses and damages arising or resulting in connection with such use or sale, including attorneys fees, even if such claim alleges that Vishay or its distributor was negligent regarding the design or manufacture of the part. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

Material Category Policy

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as RoHS-Compliant fulfill the definitions and restrictions defined under Directive 2011/65/EU of The European Parliament and of the Council of June 8, 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (EEE) - recast, unless otherwise specified as non-compliant.

Please note that some Vishay documentation may still make reference to RoHS Directive 2002/95/EC. We confirm that all the products identified as being compliant to Directive 2002/95/EC conform to Directive 2011/65/EU.

MICROCHIP

TC4420
TC4429

6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS

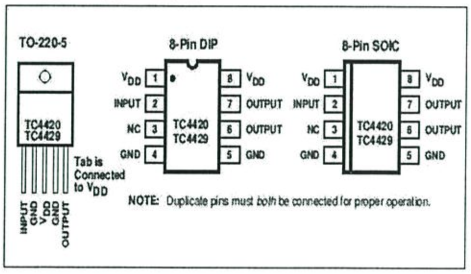
FEATURES

- Latch-Up Protected .... Will Withstand >1.5A Reverse Output Current
- Logic Input Will Withstand Negative Swing Up to 5V
- ESD Protected 4kV
- Matched Rise and Fall Times 25nsec
- High Peak Output Current .... 6A Peak
- Wide Operating Range .... 4.5V to 18V
- High Capacitive Load Drive 10,000pF
- Short Delay Time .... 55nsec Typ.
- Logic High Input, Any Voltage .... 2.4V to V_{DD}
- Low Supply Current With Logic "1" Input ... 450µA
- Low Output Impedance 2.5Ω
- Output Voltage Swing to Within 25mV of Ground or V_{DD}

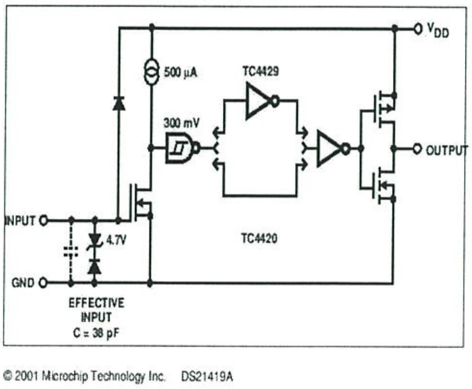
APPLICATIONS

- Switch-Mode Power Supplies
- Motor Controls
- Pulse Transformer Driver
- Class D Switching Amplifiers

PIN CONFIGURATIONS



FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



GENERAL DESCRIPTION

The TC4420/4429 are 6A (peak), single output MOSFET drivers. The TC4429 is an inverting driver (pin-compatible with the TC429), while the TC4420 is a non-inverting driver. These drivers are fabricated in CMOS for lower power, more efficient operation versus bipolar drivers.

Both devices have TTL-compatible inputs, which can be driven as high as V_{DD} + 0.3V or as low as – 5V without upset or damage to the device. This eliminates the need for external level shifting circuitry and its associated cost and size. The output swing is rail-to-rail ensuring better drive voltage margin, especially during power up/power down sequencing. Propagational delay time is only 55nsec (typ.) and the output rise and fall times are only 25nsec (typ.) into 2500pF across the usable power supply range.

Unlike other drivers, the TC4420/4429 are virtually latch-up proof. They replace three or more discrete components saving PCB area, parts and improving overall system reliability.

ORDERING INFORMATION

Part No.	Logic	Package	Temperature Range
TC4420CAT	Noninverting	5-Pin TO-220	0°C to +70°C
TC4420COA	Noninverting	8-Pin SOIC	0°C to +70°C
TC4420CPA	Noninverting	8-Pin PDIP	0°C to +70°C
TC4420EOA	Noninverting	8-Pin SOIC	– 40°C to +85°C
TC4420EPA	Noninverting	8-Pin PDIP	– 40°C to +85°C
TC4420IJA	Noninverting	8-Pin CerDIP	–25°C to +85°C
TC4420MJA	Noninverting	8-Pin CerDIP	– 55°C to +125°C
TC4429CAT	Inverting	5-Pin TO-220	0°C to +70°C
TC4429COA	Inverting	8-Pin SOIC	0°C to +70°C
TC4429CPA	Inverting	8-Pin PDIP	0°C to +70°C
TC4429EOA	Inverting	8-Pin SOIC	– 40°C to +85°C
TC4429EPA	Inverting	8-Pin PDIP	– 40°C to +85°C
TC4429IJA	Inverting	8-Pin CerDIP	– 25°C to +85°C
TC4429MJA	Inverting	8-Pin CerDIP	– 55°C to +125°C

© 2001 Microchip Technology Inc. DS21419A

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

Supply Voltage .... +20V
Input Voltage .... – 5V to > V_{DD}
Input Current (V_{IN} > V_{DD}) 50mA
Power Dissipation, ($T_A \leq 70°C$)
  PDIP 730mW
  SOIC 470mW
  CerDIP 800mW
  5-Pin TO-220 .... 1.6W
Package Power Dissipation, $T_C \leq 25°C$
  5-Pin TO-220 (With Heat Sink) 12.5W
Derating Factors (To Ambient)
  PDIP .... 8mW/°C
  SOIC .... 4mW/°C
  CerDIP .... 6.4mW/°C
  5-Pin TO-220 .... 12mW/°C
Thermal Impedances (To Case)
  5-Pin TO-220 $R_{\theta J\text{-}C}$ .... 10°C/W

Storage Temperature Range .... – 65°C to +150°C
Operating Temperature (Chip) .... +150°C
Operating Temperature Range (Ambient)
  C Version .... 0°C to +70°C
  I Version .... – 25°C to +85°C
  E Version .... – 40°C to +85°C
  M Version .... – 55°C to +125°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec) .... +300°C

*Static-sensitive device. Unused devices must be stored in conductive material. Protect devices from static discharge and static fields. Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS: T_A = +25°C with 4.5V ≤ V_{DD} ≤ 18V, unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Input						
V_{IH}	Logic 1 High Input Voltage		2.4	1.8	—	V
V_{IL}	Logic 0 Low Input Voltage		—	1.3	0.8	V
V_{IN} (Max)	Input Voltage Range		– 5	—	V_{DD} +0.3	V
I_{IN}	Input Current	0V ≤ V_{IN} ≤ V_{DD}	– 10	—	10	µA
Output						
V_{OH}	High Output Voltage	See Figure 1	V_{DD} – 0.025	—	—	V
V_{OL}	Low Output Voltage	See Figure 1	—	—	0.025	V
R_O	Output Resistance, High	I_{OUT} = 10 mA, V_{DD} = 18V	—	2.1	2.8	Ω
R_O	Output Resistance, Low	I_{OUT} = 10 mA, V_{DD} = 18V	—	1.5	2.5	Ω
I_{PK}	Peak Output Current	V_{DD} = 18V (See Figure 5)	—	6	—	A
I_{REV}	Latch-Up Protection Withstand Reverse Current	Duty Cycle ≤ 2% t ≤ 300µsec	1.5	—	—	A
Switching Time (Note 1)						
t_R	Rise Time	Figure 1, C_L = 2500pF	—	25	35	nsec
t_F	Fall Time	Figure 1, C_L = 2500pF	—	25	35	nsec
t_{D1}	Delay Time	Figure 1	—	55	75	nsec
t_{D2}	Delay Time	Figure 1	—	55	75	nsec
Power Supply						
I_S	Power Supply Current	V_{IN} = 3V V_{IN} = 0V	— —	0.45 55	1.5 150	mA µA
V_{DD}	Operating Input Voltage		4.5	—	18	V

 © 2001 Microchip Technology Inc.

6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS

TC4420
TC4429

ELECTRICAL CHARACTERISTICS: Measured over operating temperature range with $4.5V \le V_{DD} \le 18V$, unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Input						
V_{IH}	Logic 1 High Input Voltage		2.4	—	—	V
V_{IL}	Logic 0 Low Input Voltage		—	—	0.8	V
V_{IN} (Max)	Input Voltage Range		–5	—	V_{DD} + 0.3	V
I_{IN}	Input Current	$0V \le V_{IN} \le V_{DD}$	–10	—	10	μA
Output						
V_{OH}	High Output Voltage	See Figure 1	V_{DD} – 0.025	—	—	V
V_{OL}	Low Output Voltage	See Figure 1	—	—	0.025	V
R_O	Output Resistance, High	I_{OUT} = 10mA, V_{DD} = 18V	—	3	5	Ω
R_O	Output Resistance, Low	I_{OUT} = 10mA, V_{DD} = 18V	—	2.3	5	Ω
Switching Time (Note 1)						
t_R	Rise Time	Figure 1, C_L = 2500pF	—	32	60	nsec
t_F	Fall Time	Figure 1, C_L = 2500pF	—	34	60	nsec
t_{D1}	Delay Time	Figure 1	—	50	100	nsec
t_{D2}	Delay Time	Figure 1	—	65	100	nsec
Power Supply						
I_S	Power Supply Current	V_{IN} = 3V V_{IN} = 0V	— —	0.45 60	3 400	mA μA
V_{DD}	Operating Input Voltage		4.5	—	18	V

NOTE: 1. Switching times guaranteed by design.

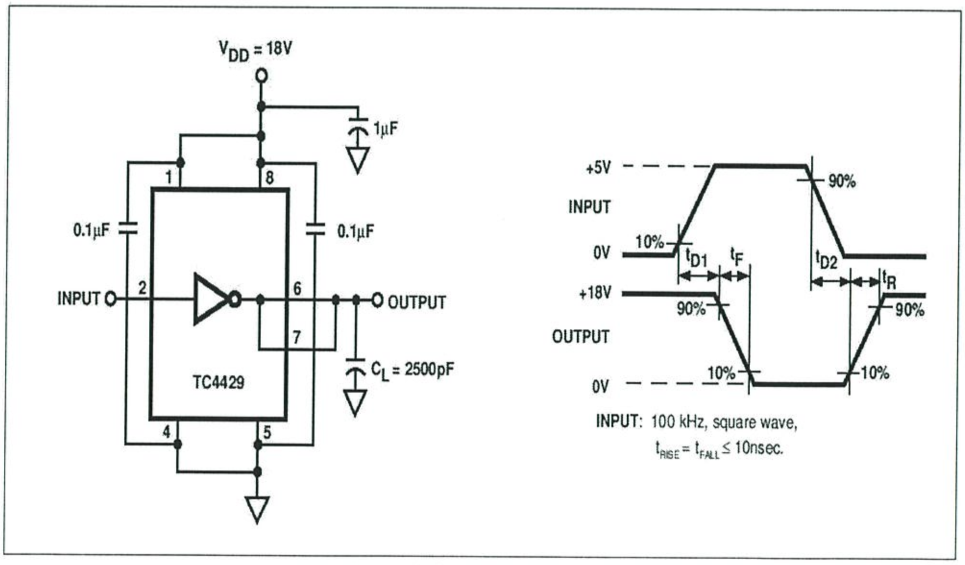
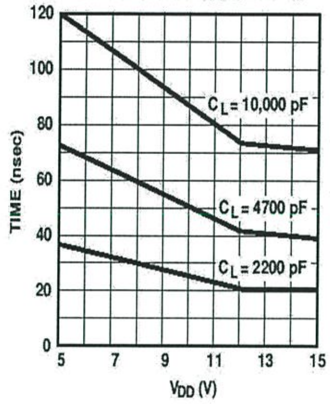


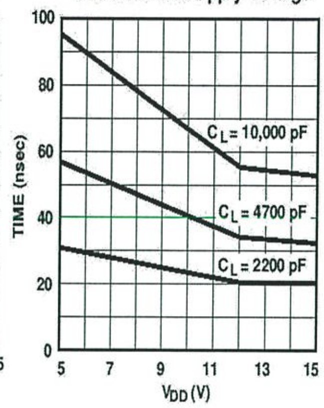
Figure 1. Switching Time Test Circuit

TYPICAL CHARACTERISTICS

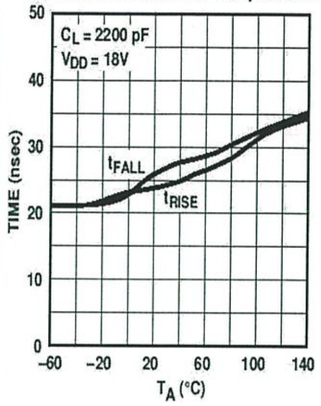
Rise Time vs. Supply Voltage



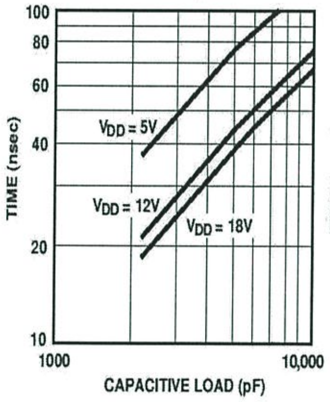
Fall Time vs. Supply Voltage



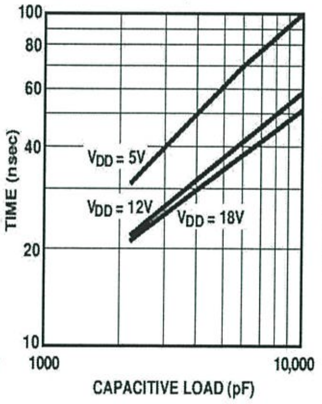
Rise and Fall Times vs. Temperature



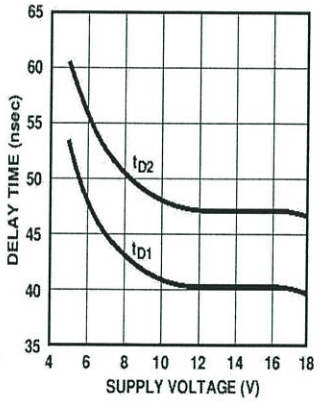
Rise Time vs. Capacitive Load



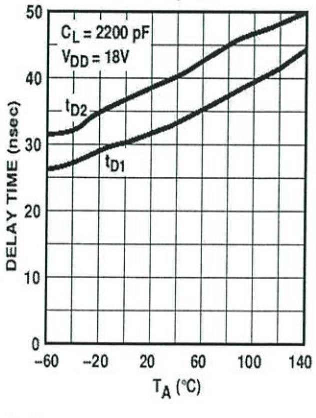
Fall Time vs. Capacitive Load



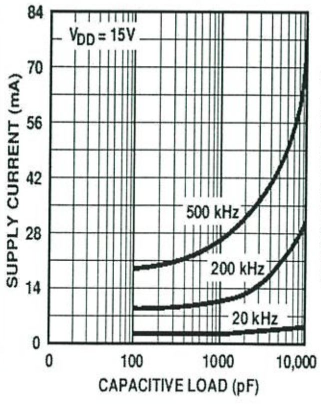
Propagation Delay Time vs. Supply Voltage



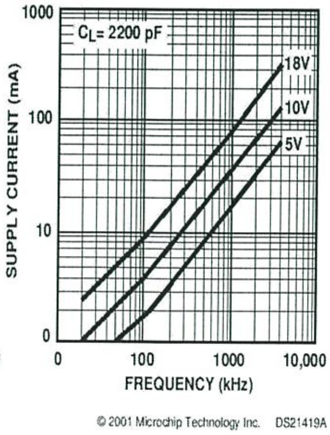
Propagation Delay Time vs. Temperature



Supply Current vs. Capacitive Load

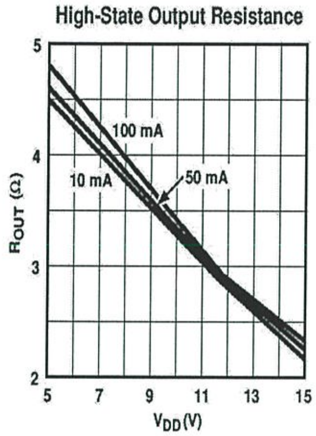


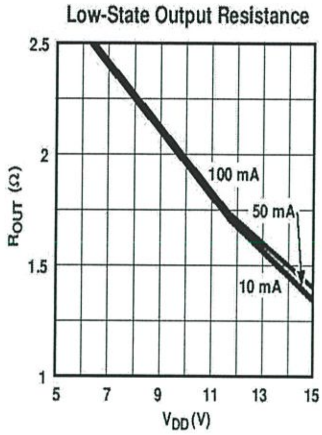
Supply Current vs. Frequency

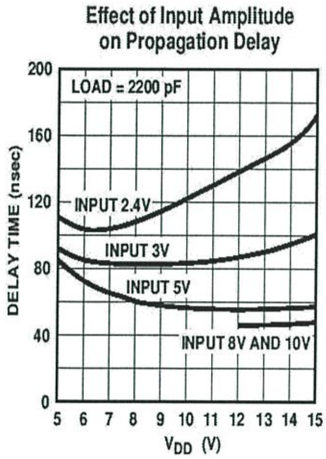


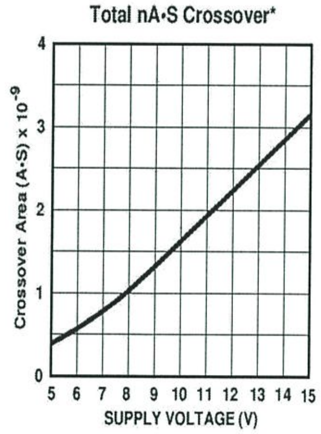
© 2001 Microchip Technology Inc.

TYPICAL CHARACTERISTICS (Cont.)







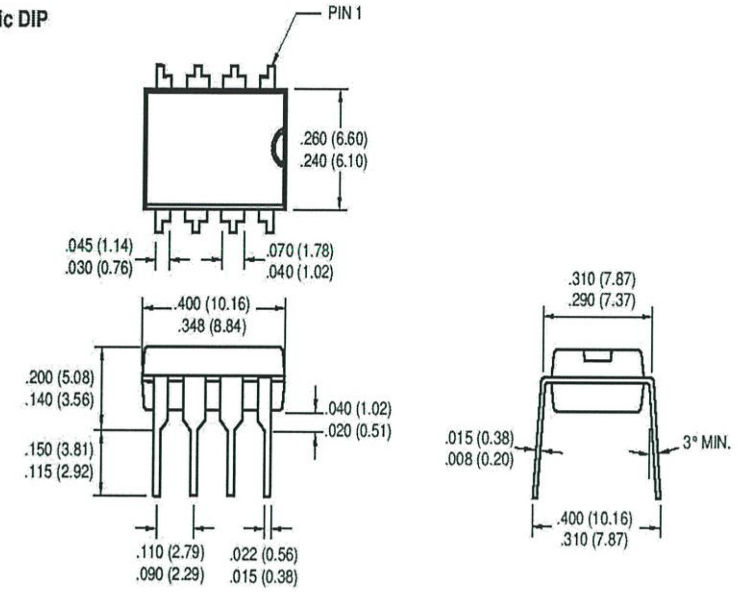


* The values on this graph represent the loss seen by the driver during one complete cycle. For a single transition, divide the value by 2.

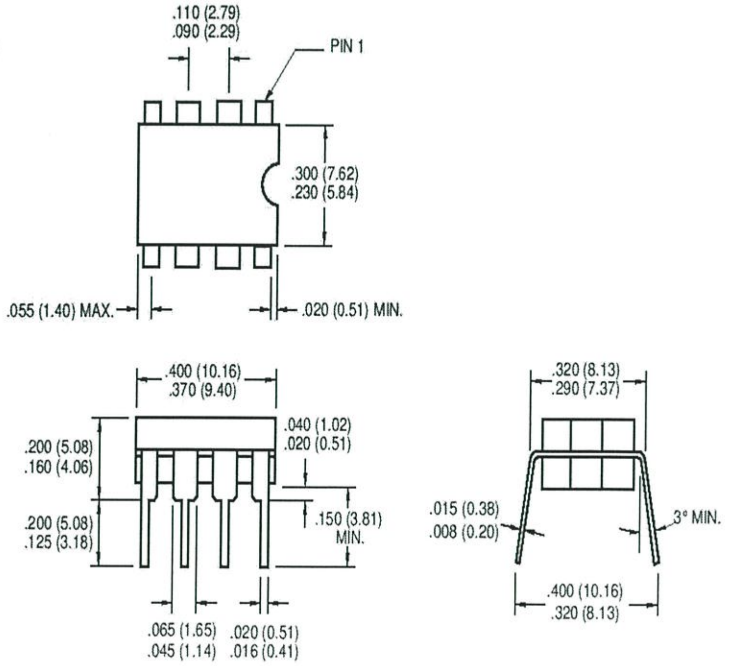
TC4420
TC4429

PACKAGE DIMENSIONS

8-Pin Plastic DIP



8-Pin CerDIP



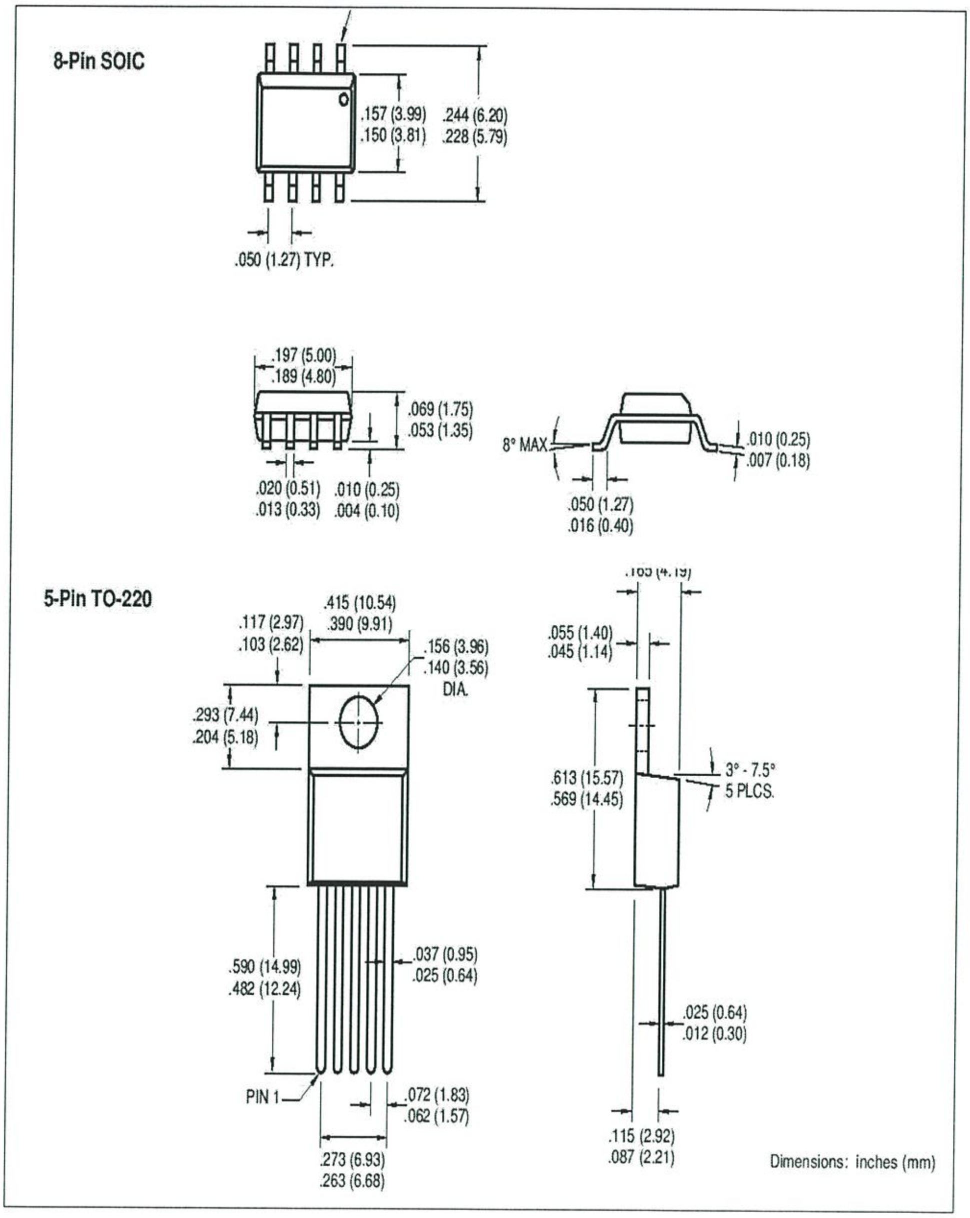
Dimensions: inches (mm)

© 2001 Microchip Technology Inc. DS21419A

6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS

TC4420
TC4429

PACKAGE DIMENSIONS (Cont.)



© 2001 Microchip Technology Inc.

MICROCHIP

WORLDWIDE SALES AND SERVICE

AMERICAS

Corporate Office
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 480-792-7200 Fax: 480-792-7277
Technical Support: 480-792-7627
Web Address: http://www.microchip.com

Rocky Mountain
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 480-792-7966 Fax: 480-792-7456

Atlanta
500 Sugar Mill Road, Suite 200B
Atlanta, GA 30350
Tel: 770-640-0034 Fax: 770-640-0307

Austin
Analog Product Sales
8303 MoPac Expressway North
Suite A-201
Austin, TX 78759
Tel: 512-345-2030 Fax: 512-345-6085

Boston
2 Lan Drive, Suite 120
Westford, MA 01886
Tel: 978-692-3848 Fax: 978-692-3821

Boston
Analog Product Sales
Unit A-8-1 Millbrook Tarry Condominium
97 Lowell Road
Concord, MA 01742
Tel: 978-371-6400 Fax: 978-371-0050

Chicago
333 Pierce Road, Suite 180
Itasca, IL 60143
Tel: 630-285-0071 Fax: 630-285-0075

Dallas
4570 Westgrove Drive, Suite 160
Addison, TX 75001
Tel: 972-818-7423 Fax: 972-818-2924

Dayton
Two Prestige Place, Suite 130
Miamisburg, OH 45342
Tel: 937-291-1654 Fax: 937-291-9175

Detroit
Tri-Atria Office Building
32255 Northwestern Highway, Suite 190
Farmington Hills, MI 48334
Tel: 248-538-2250 Fax: 248-538-2260

Los Angeles
18201 Von Karman, Suite 1090
Irvine, CA 92612
Tel: 949-263-1888 Fax: 949-263-1338

Mountain View
Analog Product Sales
1300 Terra Bella Avenue
Mountain View, CA 94043-1836
Tel: 650-968-9241 Fax: 650-967-1590

New York
150 Motor Parkway, Suite 202
Hauppauge, NY 11788
Tel: 631-273-5305 Fax: 631-273-5335

San Jose
Microchip Technology Inc.
2107 North First Street, Suite 590
San Jose, CA 95131
Tel: 408-436-7950 Fax: 408-436-7955

Toronto
6285 Northam Drive, Suite 108
Mississauga, Ontario L4V 1X5, Canada
Tel: 905-673-0699 Fax: 905-673-6509

ASIA/PACIFIC

China - Beijing
Microchip Technology Beijing Office
Unit 915
New China Hong Kong Manhattan Bldg.
No. 6 Chaoyangmen Beidajie
Beijing, 100027, No. China
Tel: 86-10-85282100 Fax: 86-10-85282104

China - Shanghai
Microchip Technology Shanghai Office
Room 701, Bldg. B
Far East International Plaza
No. 317 Xian Xia Road
Shanghai, 200051
Tel: 86-21-6275-5700 Fax: 86-21-6275-5060

Hong Kong
Microchip Asia Pacific
RM 2101, Tower 2, Metroplaza
223 Hing Fong Road
Kwai Fong, N.T., Hong Kong
Tel: 852-2401-1200 Fax: 852-2401-3431

India
Microchip Technology Inc.
India Liaison Office
Divyasree Chambers
1 Floor, Wing A (A3/A4)
No. 11, OíShaugnessey Road
Bangalore, 560 025, India
Tel: 91-80-2290061 Fax: 91-80-2290062

Japan
Microchip Technology Intl. Inc.
Benex S-1 6F
3-18-20, Shinyokohama
Kohoku-Ku, Yokohama-shi
Kanagawa, 222-0033, Japan
Tel: 81-45-471-6166 Fax: 81-45-471-6122

Korea
Microchip Technology Korea
168-1, Youngbo Bldg. 3 Floor
Samsung-Dong, Kangnam-Ku
Seoul, Korea
Tel: 82-2-554-7200 Fax: 82-2-558-5934

ASIA/PACIFIC (continued)

Singapore
Microchip Technology Singapore Pte Ltd.
200 Middle Road
#07-02 Prime Centre
Singapore, 188980
Tel: 65-334-8870 Fax: 65-334-8850

Taiwan
Microchip Technology Taiwan
11F-3, No. 207
Tung Hua North Road
Taipei, 105, Taiwan
Tel: 886-2-2717-7175 Fax: 886-2-2545-0139

EUROPE

Australia
Microchip Technology Australia Pty Ltd
Suite 22, 41 Rawson Street
Epping 2121, NSW
Australia
Tel: 61-2-9868-6733 Fax: 61-2-9868-6755

Denmark
Microchip Technology Denmark ApS
Regus Business Centre
Lautrup hoj 1-3
Ballerup DK-2750 Denmark
Tel: 45 4420 9895 Fax: 45 4420 9910

France
Arizona Microchip Technology SARL
Parc díActivite du Moulin de Massy
43 Rue du Saule Trapu
Batiment A - ler Etage
91300 Massy, France
Tel: 33-1-69-53-63-20 Fax: 33-1-69-30-90-79

Germany
Arizona Microchip Technology GmbH
Gustav-Heinemann Ring 125
D-81739 Munich, Germany
Tel: 49-89-627-144 0 Fax: 49-89-627-144-44

Germany
Analog Product Sales
Lochhamer Strasse 13
D-82152 Martinsried, Germany
Tel: 49-89-895650-0 Fax: 49-89-895650-22

Italy
Arizona Microchip Technology SRL
Centro Direzionale Colleoni
Palazzo Taurus 1 V. Le Colleoni 1
20041 Agrate Brianza
Milan, Italy
Tel: 39-039-65791-1 Fax: 39-039-6899883

United Kingdom
Arizona Microchip Technology Ltd.
505 Eskdale Road
Winnersh Triangle
Wokingham
Berkshire, England RG41 5TU
Tel: 44 118 921 5869 Fax: 44-118 921-5820

All rights reserved. © 2001 Microchip Technology Incorporated. Printed in the USA. 1/01 Printed on recycled paper. 01/09/01

Information contained in this publication regarding device applications and the like is intended through suggestion only and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. No representation or warranty is given and no liability is assumed by Microchip Technology Incorporated with respect to the accuracy or use of such information, or infringement of patents or other intellectual property rights arising from such use or otherwise. Use of Microchipís products as critical components in life support systems is not authorized except with express written approval by Microchip. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, except as maybe explicitly expressed herein, under any intellectual property rights. The Microchip logo and name are registered trademarks of Microchip Technology Inc. in the U.S.A. and other countries. All rights reserved. All other trademarks mentioned herein are the property of their respective companies.

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

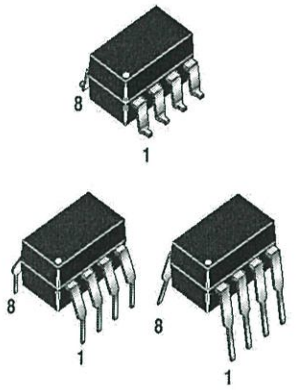
HIGH SPEED-10 MBit/s LOGIC GATE OPTOCOUPLERS

SINGLE-CHANNEL
6N137
HCPL-2601
HCPL-2611

DUAL-CHANNEL
HCPL-2630
HCPL-2631

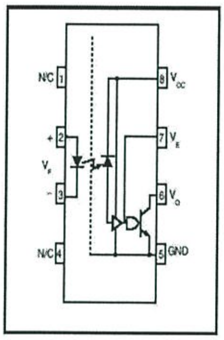
DESCRIPTION

The 6N137, HCPL-2601/2611 single-channel and HCPL-2630/2631 dual-channel optocouplers consist of a 850 nm AlGaAS LED, optically coupled to a very high speed integrated photodetector logic gate with a strobable output. This output features an open collector, thereby permitting wired OR outputs. The coupled parameters are guaranteed over the temperature range of -40°C to +85°C. A maximum input signal of 5 mA will provide a minimum output sink current of 13 mA (fan out of 8).
An internal noise shield provides superior common mode rejection of typically 10 kV/µs. The HCPL- 2601 and HCPL- 2631 has a minimum CMR of 5 kV/µs.
The HCPL-2611 has a minimum CMR of 10 kV/µs.

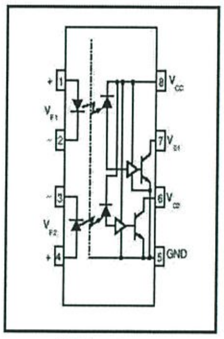


FEATURES

- Very high speed-10 MBit/s
- Superior CMR-10 kV/µs
- Double working voltage-480V
- Fan-out of 8 over -40°C to +85°C
- Logic gate output
- Strobable output
- Wired OR-open collector
- U.L. recognized (File # E90700)



6N137
HCPL-2601
HCPL-2611



HCPL-2630
HCPL-2631

APPLICATIONS

- Ground loop elimination
- LSTTL to TTL, LSTTL or 5-volt CMOS
- Line receiver, data transmission
- Data multiplexing
- Switching power supplies
- Pulse transformer replacement
- Computer-peripheral interface

TRUTH TABLE
(Positive Logic)

Input	Enable	Output
H	H	L
L	H	H
H	L	H
L	L	H
H	NC	L
L	NC	H

A 0.1 µF bypass capacitor must be connected between pins 8 and 5.
(See note 1)

© 2001 Fairchild Semiconductor Corporation

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR®

HIGH SPEED-10 MBit/s LOGIC GATE OPTOCOUPLERS

SINGLE-CHANNEL
6N137
HCPL-2601
HCPL-2611

DUAL-CHANNEL
HCPL-2630
HCPL-2631

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (No derating required up to 85°C)

Parameter		Symbol	Value	Units
Storage Temperature		T_{STG}	-55 to +125	°C
Operating Temperature		T_{OPR}	-40 to +85	°C
Lead Solder Temperature		T_{SOL}	260 for 10 sec	°C
EMITTER				
DC/Average Forward Input Current	Single channel	I_F	50	mA
	Dual channel (Each channel)		30	
Enable Input Voltage Not to exceed V_{CC} by more than 500 mV	Single channel	V_E	5.5	V
Reverse Input Voltage	Each channel	V_R	5.0	V
Power Dissipation	Single channel	P_I	100	mW
	Dual channel (Each channel)		45	
DETECTOR				
Supply Voltage		V_{CC} (1 minute max)	7.0	V
Output Current	Single channel	I_O	50	mA
	Dual channel (Each channel)		50	
Output Voltage	Each channel	V_O	7.0	V
Collector Output Power Dissipation	Single channel	P_O	85	mW
	Dual channel (Each channel)		60	

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Parameter	Symbol	Min	Max	Units
Input Current, Low Level	I_{FL}	0	250	µA
Input Current, High Level	I_{FH}	*6.3	15	mA
Supply Voltage, Output	V_{CC}	4.5	5.5	V
Enable Voltage, Low Level	V_{EL}	0	0.8	V
Enable Voltage, High Level	V_{EH}	2.0	V_{CC}	V
Low Level Supply Current	T_A	-40	+85	°C
Fan Out (TTL load)	N		8	

* 6.3 mA is a guard banded value which allows for at least 20 % CTR degradation. Initial input current threshold value is 5.0 mA or less

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR®

HIGH SPEED-10 MBit/s LOGIC GATE OPTOCOUPLERS

SINGLE-CHANNEL
6N137
HCPL-2601
HCPL-2611

DUAL-CHANNEL
HCPL-2630
HCPL-2631

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = -40°C to +85°C Unless otherwise specified.)

INDIVIDUAL COMPONENT CHARACTERISTICS

Parameter	Test Conditions	Symbol	Min	Typ**	Max	Unit
EMITTER Input Forward Voltage	(I_F = 10 mA)	V_F			1.8	V
	T_A =25°C			1.4	1.75	
Input Reverse Breakdown Voltage	(I_R = 10 µA)	B_{VR}	5.0			V
Input Capacitance	(V_F = 0, f = 1 MHz)	C_{IN}		60		pF
Input Diode Temperature Coefficient	(I_F = 10 mA)	$\Delta V_F/\Delta T_A$		-1.4		mV/°C
DETECTOR High Level Supply Current — Single Channel	(V_{CC} = 5.5 V, I_F = 0 mA)	I_{CCH}		7	10	mA
Dual Channel	(V_E = 0.5 V)			10	15	
Low Level Supply Current — Single Channel	(V_{CC} = 5.5 V, I_F = 10 mA)	I_{CCL}		9	13	mA
Dual Channel	(V_E = 0.5 V)			14	21	
Low Level Enable Current	(V_{CC} = 5.5 V, V_E = 0.5 V)	I_{EL}		-0.8	-1.6	mA
High Level Enable Current	(V_{CC} = 5.5 V, V_E = 2.0 V)	I_{EH}		-0.6	-1.6	mA
High Level Enable Voltage	(V_{CC} = 5.5 V, I_F = 10 mA)	V_{EH}	2.0			V
Low Level Enable Voltage	(V_{CC} = 5.5 V, I_F = 10 mA) (Note 3)	V_{EL}			0.8	V

SWITCHING CHARACTERISTICS (T_A = -40°C to +85°C, V_{CC} = 5 V, I_F = 7.5 mA Unless otherwise specified.)

AC Characteristics	Test Conditions	Symbol	Min	Typ**	Max	Unit
Propagation Delay Time to Output High Level	(Note 4) (T_A =25°C)	T_{PLH}	20	45	75	ns
	(R_L = 350 Ω, C_L = 15 pF) (Fig. 12)				100	
Propagation Delay Time to Output Low Level	(Note 5) (T_A =25°C)	T_{PHL}	25	45	75	ns
	(R_L = 350 Ω, C_L = 15 pF) (Fig. 12)				100	
Pulse Width Distortion	(R_L = 350 Ω, C_L = 15 pF) (Fig. 12)	$\|T_{PHL}-T_{PLH}\|$		3	35	ns
Output Rise Time (10-90%)	(R_L = 350 Ω, C_L = 15 pF) (Note 6) (Fig. 12)	t_r		50		ns
Output Fall Time (90-10%)	(R_L = 350 Ω, C_L = 15 pF) (Note 7) (Fig. 12)	t_f		12		ns
Enable Propagation Delay Time to Output High Level	(I_F = 7.5 mA, V_{EH} = 3.5 V) (R_L = 350 Ω, C_L = 15 pF) (Note 8) (Fig. 13)	t_{ELH}		20		ns
Enable Propagation Delay Time to Output Low Level	(I_F = 7.5 mA, V_{EH} = 3.5 V) (R_L = 350 Ω, C_L = 15 pF) (Note 9) (Fig. 13)	t_{EHL}		20		ns
Common Mode Transient Immunity (at Output High Level) — 6N137, HCPL-2630	(T_A =25°C) $\|V_{CM}\|$ = 50 V, (Peak) (I_F = 0 mA, V_{OH} (Min.) = 2.0 V) (R_L = 350 Ω) (Note 10)	$\|CM_H\|$		10,000		V/µs
HCPL-2601, HCPL-2631	(Fig. 14)		5000	10,000		
HCPL-2611	$\|V_{CM}\|$ = 400 V		10,000	15,000		
Common Mode Transient Immunity (at Output Low Level) — 6N137, HCPL-2630	(R_L = 350 Ω) (I_F = 7.5 mA, V_{OL} (Max.) = 0.8 V) $\|V_{CM}\|$ = 50 V (Peak)	$\|CM_L\|$		10,000		V/µs
HCPL-2601, HCPL-2631	(T_A =25°C) (Note 11) (Fig. 14)		5000	10,000		
HCPL-2611 (T_A =25°C)	$\|V_{CM}\|$ = 400 V		10,000	15,000		

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR®

HIGH SPEED-10 MBit/s LOGIC GATE OPTOCOUPLERS

SINGLE-CHANNEL
6N137
HCPL-2601
HCPL-2611

DUAL-CHANNEL
HCPL-2630
HCPL-2631

TRANSFER CHARACTERISTICS (T_A = -40°C to +85°C Unless otherwise specified.)

DC Characteristics	Test Conditions	Symbol	Min	Typ**	Max	Unit
High Level Output Current	(V_{CC} = 5.5 V, V_O = 5.5 V) (I_F = 250 μA, V_E = 2.0 V) (Note 2)	I_{OH}			100	μA
Low Level Output Current	(V_{CC} = 5.5 V, I_F = 5 mA) (V_E = 2.0 V, I_{CL} = 13 mA) (Note 2)	V_{OL}		.35	0.6	V
Input Threshold Current	(V_{CC} = 5.5 V, V_O = 0.6 V, V_E = 2.0 V, I_{OL} = 13 mA)	I_{FT}		3	5	mA

ISOLATION CHARACTERISTICS (T_A = -40°C to +85°C Unless otherwise specified.)

Characteristics	Test Conditions	Symbol	Min	Typ**	Max	Unit
Input-Output Insulation Leakage Current	(Relative humidity = 45%) (T_A = 25°C, t = 5 s) (V_{I-O} = 3000 VDC) (Note 12)	I_{I-O}			1.0*	μA
Withstand Insulation Test Voltage	(RH < 50%, T_A = 25°C) (Note 12) (t = 1 min.)	V_{ISO}	2500			V_{RMS}
Resistance (Input to Output)	(V_{I-O} = 500 V) (Note 12)	R_{I-O}		10^{12}		Ω
Capacitance (Input to Output)	(f = 1 MHz) (Note 12)	C_{I-O}		0.6		pF

** All typical values are at V_{CC} = 5 V, T_A = 25°C

NOTES

1. The V_{CC} supply to each optoisolator must be bypassed by a 0.1μF capacitor or larger. This can be either a ceramic or solid tantalum capacitor with good high frequency characteristic and should be connected as close as possible to the package V_{CC} and GND pins of each device.
2. Each channel.
3. Enable Input - No pull up resistor required as the device has an internal pull up resistor.
4. t_{PLH} - Propagation delay is measured from the 3.75 mA level on the HIGH to LOW transition of the input current pulse to the 1.5 V level on the LOW to HIGH transition of the output voltage pulse.
5. t_{PHL} - Propagation delay is measured from the 3.75 mA level on the LOW to HIGH transition of the input current pulse to the 1.5 V level on the HIGH to LOW transition of the output voltage pulse.
6. t_r - Rise time is measured from the 90% to the 10% levels on the LOW to HIGH transition of the output pulse.
7. t_f - Fall time is measured from the 10% to the 90% levels on the HIGH to LOW transition of the output pulse.
8. t_{ELH} - Enable input propagation delay is measured from the 1.5 V level on the HIGH to LOW transition of the input voltage pulse to the 1.5 V level on the LOW to HIGH transition of the output voltage pulse.
9. t_{EHL} - Enable input propagation delay is measured from the 1.5 V level on the LOW to HIGH transition of the input voltage pulse to the 1.5 V level on the HIGH to LOW transition of the output voltage pulse.
10. CM_H - The maximum tolerable rate of rise of the common mode voltage to ensure the output will remain in the high state (i.e., V_{OUT} > 2.0 V). Measured in volts per microsecond (V/μs).
11. CM_L - The maximum tolerable rate of rise of the common mode voltage to ensure the output will remain in the low output state (i.e., V_{OUT} < 0.8 V). Measured in volts per microsecond (V/μs).
12. Device considered a two-terminal device: Pins 1,2,3 and 4 shorted together, and Pins 5,6,7 and 8 shorted together.

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

HIGH SPEED-10 MBit/s LOGIC GATE OPTOCOUPLERS

SINGLE-CHANNEL
6N137
HCPL-2601
HCPL-2611

DUAL-CHANNEL
HCPL-2630
HCPL-2631

TYPICAL PERFORMANCE CURVES

Fig.1 Low Level Output Voltage vs. Ambient Temperature

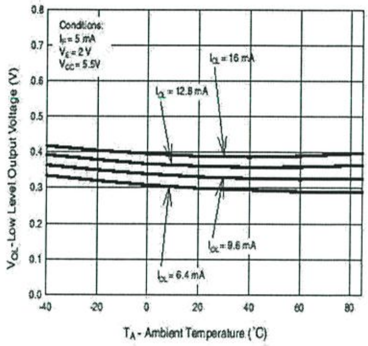


Fig. 2 Input Diode Forward Voltage vs. Forward Current

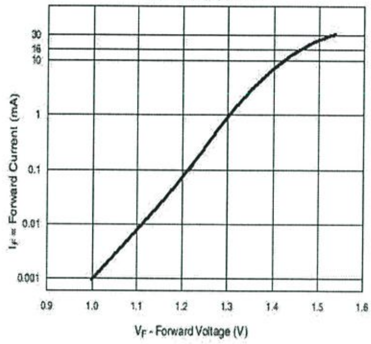


Fig.3 Switching Time vs. Forward Current

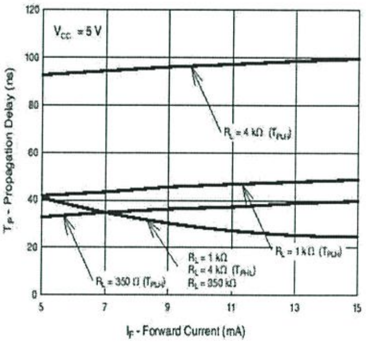


Fig. 4 Low Level Output Current vs. Ambient Temperature

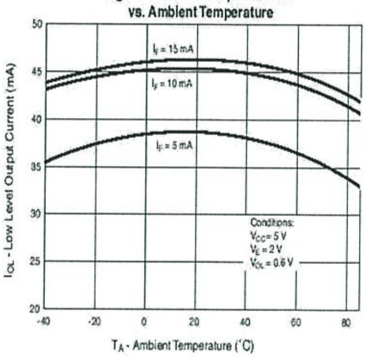


Fig. 5 Input Threshold Current vs. Ambient Temperature

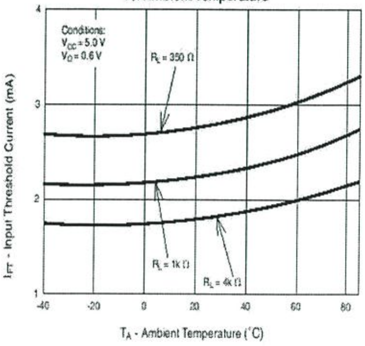
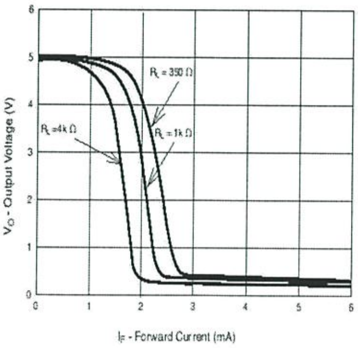


Fig. 6 Output Voltage vs. Input Forward Current



FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

HIGH SPEED-10 MBit/s LOGIC GATE OPTOCOUPLERS

SINGLE-CHANNEL
6N137
HCPL-2601
HCPL-2611

DUAL-CHANNEL
HCPL-2630
HCPL-2631

Fig. 7 Pulse Width Distortion vs. Temperature

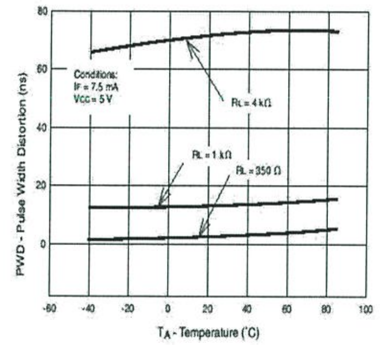


Fig. 8 Rise and Fall Time vs. Temperature

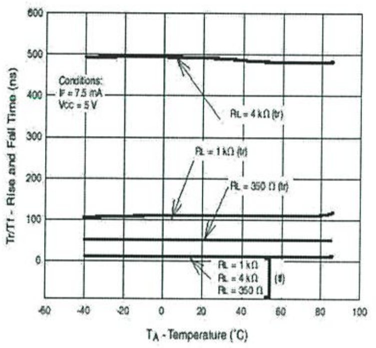


Fig. 9 Enable Propagation Delay vs. Temperature

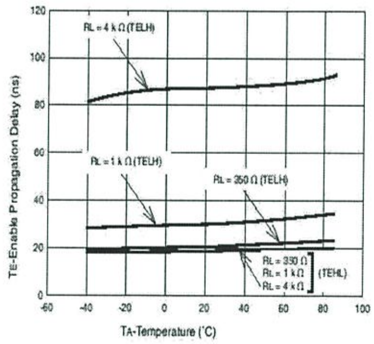


Fig. 10 Switching Time vs. Temperature

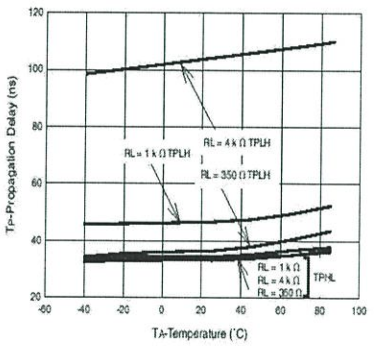
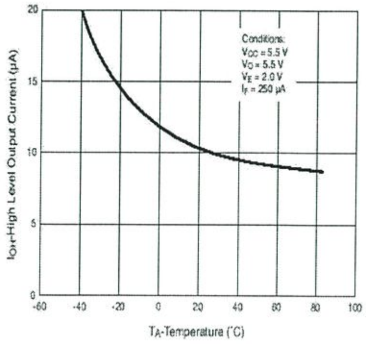


Fig. 11 High Level Output Current vs. Temperature



FAIRCHILD SEMICONDUCTOR®

HIGH SPEED-10 MBit/s LOGIC GATE OPTOCOUPLERS

SINGLE-CHANNEL
6N137
HCPL-2601
HCPL-2611

DUAL-CHANNEL
HCPL-2630
HCPL-2631

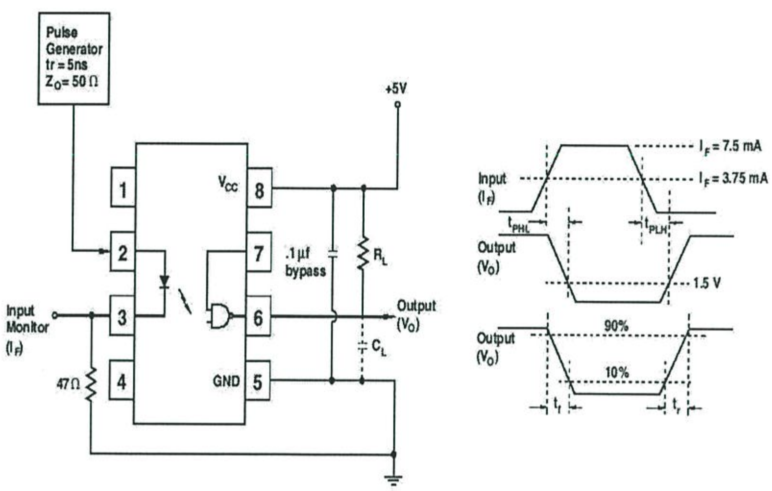


Fig. 12 Test Circuit and Waveforms for t_{PLH}, t_{PHL}, t_r and t_f.

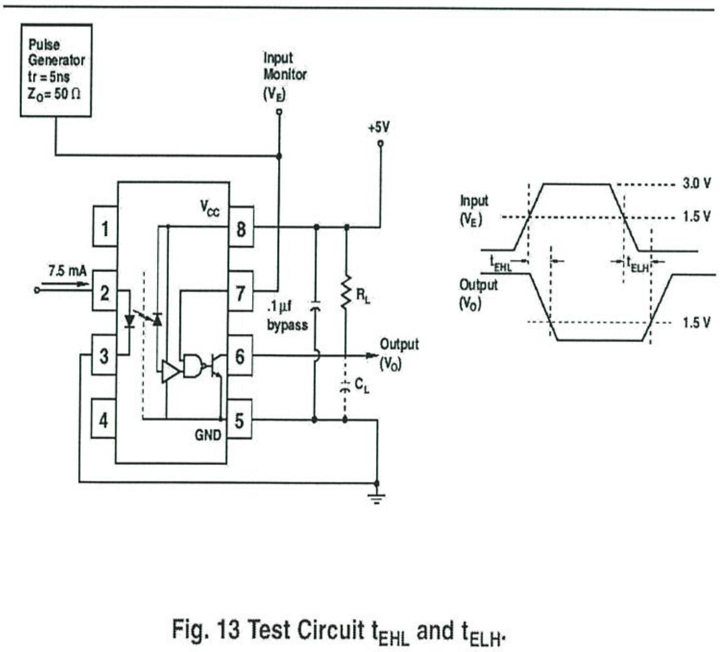


Fig. 13 Test Circuit t_{EHL} and t_{ELH}.

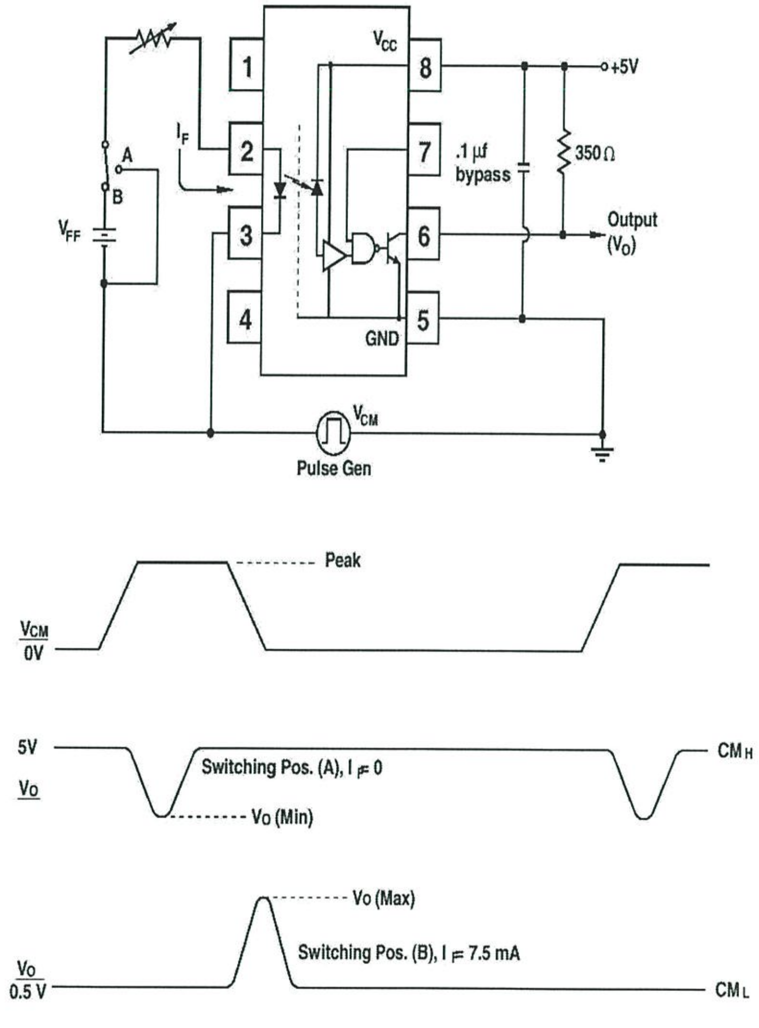


Fig. 14 Test Circuit Common Mode Transient Immunity

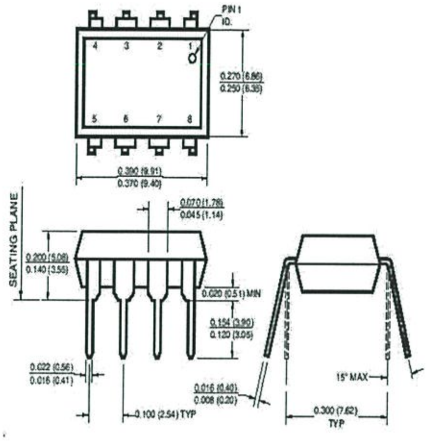
FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

HIGH SPEED-10 MBit/s LOGIC GATE OPTOCOUPLERS

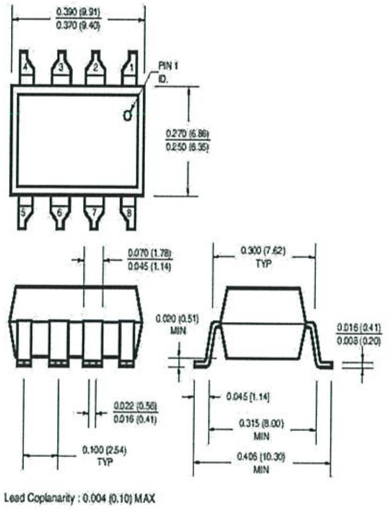
SINGLE-CHANNEL
6N137
HCPL-2601
HCPL-2611

DUAL-CHANNEL
HCPL-2630
HCPL-2631

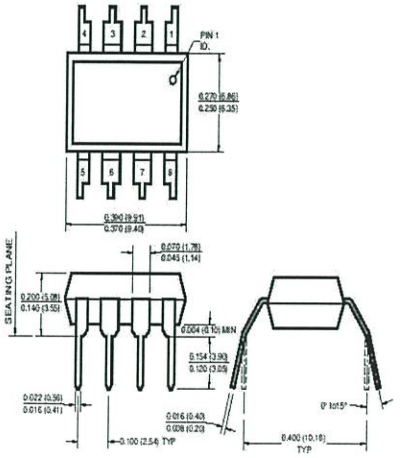
Package Dimensions (Through Hole)



Package Dimensions (Surface Mount)



Package Dimensions (0.4"Lead Spacing)



NOTE

All dimensions are in inches (millimeters)

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR®

HIGH SPEED-10 MBit/s LOGIC GATE OPTOCOUPLERS

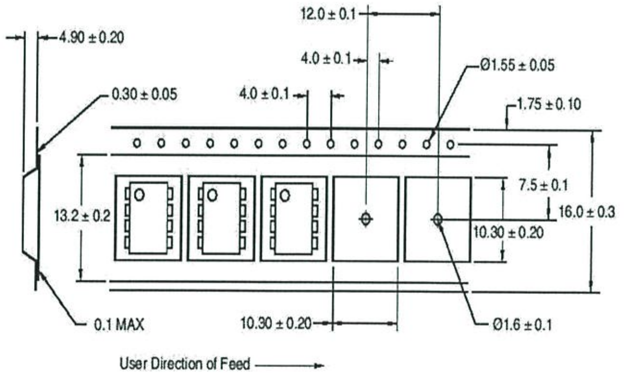
SINGLE-CHANNEL
6N137
HCPL-2601
HCPL-2611

DUAL-CHANNEL
HCPL-2630
HCPL-2631

ORDERING INFORMATION

Option	Order Entry Identifier	Description
S	.S	Surface Mount Lead Bend
SD	.SD	Surface Mount; Tape and reel
W	.W	0.4" Lead Spacing

QT Carrier Tape Specifications ("D" Taping Orientation)



FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

HIGH SPEED-10 MBit/s LOGIC GATE OPTOCOUPLERS

SINGLE-CHANNEL
6N137
HCPL-2601
HCPL-2611

DUAL-CHANNEL
HCPL-2630
HCPL-2631

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

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

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body,or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury of the user.

2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

WIMA MKP 10

Polypropylene (PP) Capacitors for Pulse Applications with Double-Sided Metallized Electrodes in PCM 7.5 mm to 52.5 mm. Capacitances from 1000 pF to 47 µF. Rated Voltages from 100 VDC to 3000 VDC.

Special Features

- **Pulse duty construction**
- **Self-healing**
- **Very low dissipation factor**
- **Negative capacitance change versus temperature**
- **According to RoHS 2011/65/EU**

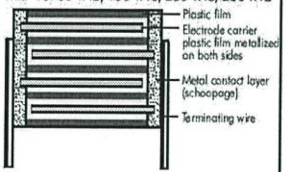
Typical Applications

For pulse applications e.g.
- **Switch mode power supplies**
- **TV and monitor sets**
- **Lighting**
- **Audio/video equipment**

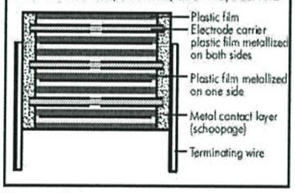
Construction

Dielectric: Polypropylene (PP) film
Capacitor electrodes:
Double-sided metallized plastic film
Internal construction:

MKP 10: 63 VAC, 180 VAC, 250 VAC, 280 VAC



MKP 10: 400 VAC, 600 VAC, 650 VAC, 700 VAC



Encapsulation:
Solvent-resistant, flame-retardant plastic case with epoxy resin seal, UL 94 V-0
Terminations: Tinned wire.
Marking: Colour: Red.
Marking: Black. Epoxy resin seal: Red

Electrical Data

Capacitance range:
1000 pF to 47 µF (E12-values on request)
Rated voltages: 100 VDC, 250 VDC, 400 VDC, 630 VDC, 1000 VDC, 1600 VDC, 2000 VDC, 2500 VDC, 3000 VDC
Capacitance tolerances:
±20%, ±10%, ±5%
Operating temperature range:
-55° C to +100° C
Insulation resistance at +20° C:
C ≤ 0.33 µF: ≥ 1 x 10^5 MΩ
(mean value: 5 x 10^5 MΩ)
C > 0.33 µF: ≥ 30 000 sec (MΩ x µF)
(mean value: 100 000 sec)
Measuring voltage: 100 V/1 min.
Test voltage: 2 sec.

L	≤ 2000 VDC	2500 VDC	≥ 3000 VDC
<41.5	1.6 U_r	1.4 U_r	1.2 U_r
41.5	1.4 U_r	1.4 U_r	1.2 U_r
57	1.2 U_r	1.2 U_r	1.2 U_r

Climatic test category:
55/100/56 in accordance with IEC
Dielectric absorption: 0.05%
Voltage derating:
A voltage derating factor of 1.35 % per K must be applied from +85° C for DC voltages and from +75° C for AC voltages.
Reliability:
Operational life > 300 000 hours
Failure rate < 1 fit (0.5 x U_r and 40° C)
Specific dissipation:

Box size* W x H x L in mm	Specific dissipation in Watts per K above the ambient temperature
35 x 50 x 57	0.132
45 x 55 x 57	0.164
45 x 65 x 57	0.184

* other box sizes see page 11.

Dissipation factors at + 20° C: tan δ

at f	C ≤ 0.1 µF	0.1 µF < C ≤ 1.0 µF	C > 1.0 µF
1 kHz	≤ 6 x 10^{-4}	≤ 6 x 10^{-4}	≤ 6 x 10^{-4}
10 kHz	≤ 6 x 10^{-4}	≤ 6 x 10^{-4}	–
100 kHz	≤ 15 x 10^{-4}	–	–

Maximum pulse rise time for pulses equal to the rated voltage

Capacitance pF/µF	max. pulse rise time V/µsec at T_A < 40° C								
	100 VDC	250 VDC	400 VDC	630 VDC	1000 VDC	1600 VDC	2000 VDC	2500 VDC	3000 VDC
1000 ... 2200	1250	2300	2300	2300	3500	7000	11500	11500	–
3300 ... 6800	1150	1500	1500	1500	3500	7000	11500	11500	–
0.01 ... 0.022	900	1400	1500	1500	2700	3800	4400	11500	–
0.033 ... 0.068	500	1000	1150	1400	2700	2700	2700	2700	2700
0.1 ... 0.22	250	650	650	1150	1800	1800	1800	1800	1800
0.33 ... 0.68	130	390	500	900	1150	1150	1150	1150	1150
1.0 ... 2.2	90	250	250	500	500	650	650	650	500
3.3 ... 4.7	65	100	130	190	230	330	–	–	–
6.8 ... 15	45	65	90	160	–	–	–	–	–
22 ... 47	30	45	45	–	–	–	–	–	–

Mechanical Tests

Pull test on pins:
d ≤ 0.8 ∅: 10 N in direction of pins
d > 0.8 ∅: 20 N in direction of pins
according to IEC 60068-2-21
Vibration: 6 hours at 10 ... 2000 Hz and 0.75 mm displacement amplitude or 10 g in accordance with IEC 60068-2-6
Low air density: 1kPa = 10 mbar in accordance with IEC 60068-2-13
Bump test: 4000 bumps at 390 m/sec² in accordance with IEC 60068-2-29

Packing

Available taped and reeled up to and including case size 15 x 26 x 31.5 / PCM 27.5 mm.

Detailed taping information and graphs at the end of the catalogue.

For further details and graphs please refer to Technical Information.

01.16

WIMA MKP 10

Continuation

General Data

Capacitance	W	H	L	PCM**	Part number (100 VDC/63 VAC*)	W	H	L	PCM**	Part number (250 VDC/180 VAC*)
1000 pF	4	9	10	**7.5**	MKP1D011002C______	4	9	10	**7.5**	MKP1F011002C______
1500 "	4	9	10	**7.5**	MKP1D011502C______	4	9	10	**7.5**	MKP1F011502C______
2200 "	4	9	10	**7.5**	MKP1D012202C______	4	9	10	**7.5**	MKP1F012202C______
3300 "	4	9	10	**7.5**	MKP1D013302C______	4	9	10	**7.5**	MKP1F013302C______
4700 "	4	9	10	**7.5**	MKP1D014702C______	4	9	10	**7.5**	MKP1F014702C______
6800 "	4	9	10	**7.5**	MKP1D016802C______	4	9	10	**7.5**	MKP1F016802C______
0.01 µF	4	9	10	**7.5**	MKP1D021002C______	4	9	10	**7.5**	MKP1F021002C______
						4	9	13	10	MKP1F021003C______
0.015 "	4	9	10	**7.5**	MKP1D021502C______	4	9	10	**7.5**	MKP1F021502C______
						4	9	13	10	MKP1F021503C______
0.022 "	4	9	10	**7.5**	MKP1D022202C______	4	9	10	**7.5**	MKP1F022202C______
						4	9	13	10	MKP1F022203C______
0.033 "	5	10.5	10.3	**7.5**	MKP1D023302E______	5	10.5	10.3	**7.5**	MKP1F023302E______
	4	9	13	10	MKP1D023303C______	4	9	13	10	MKP1F023303C______
0.047 "	5	10.5	10.3	**7.5**	MKP1D024702E______	5	10.5	10.3	**7.5**	MKP1F024702E______
	4	9	13	10	MKP1D024703C______	4	9	13	10	MKP1F024703C______
0.068 "	5	11	13	10	MKP1D026803F______	5	11	13	10	MKP1F026803F______
						5	11	18	15	MKP1F026804B______
0.1 µF	6	12	13	10	MKP1D031003G______	6	12	13	10	MKP1F031003G______
						5	11	18	15	MKP1F031004B______
0.15 "	6	12.5	18	15	MKP1D031504C______	6	12.5	18	15	MKP1F031504C______
						6	15	26.5	22.5	MKP1F031505B______
0.22 "	7	14	18	15	MKP1D032204D______	7	14	18	15	MKP1F032204D______
						6	15	26.5	22.5	MKP1F032205B______
0.33 "	8	15	18	15	MKP1D033304F______	8	15	18	15	MKP1F033304F______
						6	15	26.5	22.5	MKP1F033305B______
0.47 "	9	16	18	15	MKP1D034704J______	9	16	18	15	MKP1F034704J______
	7	16.5	26.5	22.5	MKP1D034705D______	7	16.5	26.5	22.5	MKP1F034705D______
0.68 "	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1D036805F______	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1F036805F______
						9	19	31.5	27.5	MKP1F036806A______
1.0 µF	10.5	19	26.5	22.5	MKP1D041005G______	11	21	26.5	22.5	MKP1F041005I______
						11	21	31.5	27.5	MKP1F041006B______
1.5 "	11	21	31.5	27.5	MKP1D041506B______	13	24	31.5	27.5	MKP1F041506D______
						13	24	41.5	37.5	MKP1F041507C______
2.2 "	13	24	31.5	27.5	MKP1D042206D______	15	26	31.5	27.5	MKP1F042206F______
						13	24	41.5	37.5	MKP1F042207C______
3.3 "	17	29	31.5	27.5	MKP1D043306G______	17	34.5	31.5	27.5	MKP1F043306I______
						17	29	41.5	37.5	MKP1F043307E______
4.7 "	20	39.5	31.5	27.5	MKP1D044706J______	20	39.5	31.5	27.5	MKP1F044706J______
	17	29	41.5	37.5	MKP1D044707E______	19	32	41.5	37.5	MKP1F044707F______
6.8 "	19	32	41.5	37.5	MKP1D046807F______	20	39.5	41.5	37.5	MKP1F046807G______
10 µF	20	39.5	41.5	37.5	MKP1D051007G______	24	45.5	41.5	37.5	MKP1F051007H______
15 "	24	45.5	41.5	37.5	MKP1D051507H______	35	50	41.5	37.5	MKP1F051507J______
	31	46	41.5	37.5	MKP1D051507I______	35	50	57	52.5	MKP1F051509F______
22 "	35	50	41.5	37.5	MKP1D052207J______	35	50	57	52.5	MKP1F052209F______
33 "	40	55	41.5	37.5	MKP1D053307K______	45	65	57	52.5	MKP1F053309J______
	35	50	57	52.5	MKP1D053309F______					
47 "	45	65	57	52.5	MKP1D054709J______					

* AC voltage: $f \leq 1000$ Hz; $1.4 \times U_{rms} + UDC \leq U_r$

** PCM = Printed circuit module = pin spacing

Dims. in mm.

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

Part number completion:		
Version code:	2-pin	= 00
	4-pin	= D4
Tolerance:	20 %	= M
	10 %	= K
	5 %	= J
Packing:	bulk	= S
Pin length:	6-2	= SD

Taped version see page 143.

Rights reserved to amend design data without prior notification.

01.16

Continuation page 66

WIMA MKP 10

Continuation

General Data

Capacitance	400 VDC/250 VAC*					630 VDC/400 VAC*				
	W	H	L	PCM**	Part number	W	H	L	PCM**	Part number
1000 pF	4	9	10	**7.5**	MKP1G011002C______	4	9	10	**7.5***	MKP1J011002C______
1500 „	4	9	10	**7.5**	MKP1G011502C______	4	9	10	**7.5***	MKP1J011502C______
2200 „	4	9	10	**7.5**	MKP1G012202C______	4	9	10	**7.5***	MKP1J012202C______
3300 „	4	9	10	**7.5**	MKP1G013302C______	4	9	10	**7.5***	MKP1J013302C______
4700 „	4	9	10	**7.5**	MKP1G014702C______	4	9	10	**7.5***	MKP1J014702C______
6800 „	4	9	10	**7.5**	MKP1G016802C______	4	9	10	**7.5***	MKP1J016802C______
						4	9	13	10	MKP1J016803C______
0.01 µF	4	9	10	**7.5**	MKP1G021002C______	5	10.5	10.3	**7.5***	MKP1J021002E______
	4	9	13	10	MKP1G021003C______	4	9	13	10	MKP1J021003C______
0.015 „	5	10.5	10.3	**7.5**	MKP1G021502E______	5	11	13	10	MKP1J021503F______
	4	9	13	10	MKP1G021503C______	5	11	18	15	MKP1J021504B______
0.022 „	5	10.5	10.3	**7.5**	MKP1G022202E______	5	11	13	10	MKP1J022203F______
	4	9	13	10	MKP1G022203C______	5	11	18	15	MKP1J022204B______
0.033 „	5.7	12.5	10.3	**7.5**	MKP1G023302F______	6	12	13	10	MKP1J023303G______
	5	11	13	10	MKP1G023303F______	5	11	18	15	MKP1J023304B______
0.047 „	6	12	13	10	MKP1G024703G______	6	12.5	18	15	MKP1J024704C______
	5	11	18	15	MKP1G024704B______	6	15	26.5	22.5	MKP1J024705B______
0.068 „	6	12.5	18	15	MKP1G026804C______	7	14	18	15	MKP1J026804D______
	6	15	26.5	22.5	MKP1G026805B______	6	15	26.5	22.5	MKP1J026805B______
0.1 µF	7	14	18	15	MKP1G031004D______	9	16	18	15	MKP1J031004J______
	6	15	26.5	22.5	MKP1G031005B______	7	16.5	26.5	22.5	MKP1J031005D______
0.15 „	8	15	18	15	MKP1G031504F______	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1J031505F______
	6	15	26.5	22.5	MKP1G031505B______	9	19	31.5	27.5	MKP1J031506A______
0.22 „	9	16	18	15	MKP1G032204J______	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1J032205F______
	7	16.5	26.5	22.5	MKP1G032205D______	9	19	31.5	27.5	MKP1J032206A______
0.33 „	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1G033305F______	11	21	26.5	22.5	MKP1J033305I______
	9	19	31.5	27.5	MKP1G033306A______	11	21	31.5	27.5	MKP1J033306B______
0.47 „	10.5	19	26.5	22.5	MKP1G034705G______	11	21	31.5	27.5	MKP1J034706B______
	9	19	31.5	27.5	MKP1G034706A______					
0.68 „	11	21	26.5	22.5	MKP1G036805I______	15	26	31.5	27.5	MKP1J036806F______
	11	21	31.5	27.5	MKP1G036806B______	13	24	41.5	37.5	MKP1J036807C______
1.0 µF	13	24	31.5	27.5	MKP1G041006D______	17	29	31.5	27.5	MKP1J041006G______
	13	24	41.5	37.5	MKP1G041007C______	15	26	41.5	37.5	MKP1J041007D______
1.5 „	17	29	31.5	27.5	MKP1G041506G______	20	39.5	31.5	27.5	MKP1J041506J______
	13	24	41.5	37.5	MKP1G041507C______	19	32	41.5	37.5	MKP1J041507F______
2.2 „	20	39.5	31.5	27.5	MKP1G042206J______	20	39.5	41.5	37.5	MKP1J042207G______
	17	29	41.5	37.5	MKP1G042207E______					
3.3 „	20	39.5	41.5	37.5	MKP1G043307G______	24	45.5	41.5	37.5	MKP1J043307H______
4.7 „	20	39.5	41.5	37.5	MKP1G044707G______	35	50	41.5	37.5	MKP1J044707J______
6.8 „	24	45.5	41.5	37.5	MKP1G046807H______	40	55	41.5	37.5	MKP1J046807K______
						35	50	57	52.5	MKP1J046809F______
10 µF	35	50	41.5	37.5	MKP1G051007J______	45	55	57	52.5	MKP1J051009H______
	35	50	57	52.5	MKP1G051009F______					
15 „	40	55	41.5	37.5	MKP1G051507K______					
	35	50	57	52.5	MKP1G051509F______					
22 „	45	65	57	52.5	MKP1G052209J______					

* AC voltage: $f \leq 1000$ Hz; $1.4 \times U_{rms} + UDC \leq U_r$

** PCM = Printed circuit module = pin spacing

* Admissible AC voltage 280 VAC max..

Dims. in mm.

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

Part number completion:		
Version code:	2-pin	= 00
	4-pin	= D4
Tolerance:	20 %	= M
	10 %	= K
	5 %	= J
Packing:	bulk	= S
Pin length:	6-2	= SD

Taped version see page 143.

Rights reserved to amend design data without prior notification.

01.16

Continuation page 67

WIMA MKP 10

Continuation

General Data

Capacitance	1000 VDC/600 VAC* W	H	L	PCM**	Part number	1600 VDC/650 VAC* W	H	L	PCM**	Part number
1000 pF	4	9	10	**7.5**	MKP1O111002C______	4	9	13	10	MKP1T011003C______
	4	9	13	10	MKP1O111003C______					
1500 "	4	9	10	**7.5**	MKP1O111502C______	4	9	13	10	MKP1T011503C______
	4	9	13	10	MKP1O111503C______					
2200 "	4	9	10	**7.5**	MKP1O112202C______	4	9	13	10	MKP1T012203C______
	4	9	13	10	MKP1O112203C______					
3300 "	4	9	10	**7.5**	MKP1O113302C______	4	9	13	10	MKP1T013303C______
	4	9	13	10	MKP1O113303C______					
4700 "	4.5	9.5	10.3	**7.5**	MKP1O114702D______	5	11	13	10	MKP1T014703F______
	4	9	13	10	MKP1O114703C______					
6800 "	5.7	12.5	10.3	**7.5**	MKP1O116802F______	6	12	13	10	MKP1T016803G______
	5	11	13	10	MKP1O116803F______	5	11	18	15	MKP1T016804B______
0.01 µF	5	11	13	10	MKP1O121003F______	5	11	18	15	MKP1T021004B______
	5	11	18	15	MKP1O121004B______					
0.015 "	6	12	13	10	MKP1O121503G______	6	12.5	18	15	MKP1T021504C______
	5	11	18	15	MKP1O121504B______	6	15	26.5	22.5	MKP1T021505B______
0.022 "	6	12.5	18	15	MKP1O122204C______	7	14	18	15	MKP1T022204D______
	6	15	26.5	22.5	MKP1O122205B______	6	15	26.5	22.5	MKP1T022205B______
0.033 "	7	14	18	15	MKP1O123304D______	8	15	18	15	MKP1T023304F______
	6	15	26.5	22.5	MKP1O123305B______	6	15	26.5	22.5	MKP1T023305B______
0.047 "	8	15	18	15	MKP1O124704F______	7	16.5	26.5	22.5	MKP1T024705D______
	6	15	26.5	22.5	MKP1O124705B______	9	19	31.5	27.5	MKP1T024706A______
0.068 "	7	16.5	26.5	22.5	MKP1O126805D______	10.5	19	26.5	22.5	MKP1T026805G______
						9	19	31.5	27.5	MKP1T026806A______
0.1 µF	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1O131005F______	11	21	26.5	22.5	MKP1T031005I______
	11	21	31.5	27.5	MKP1O131006B______	11	21	31.5	27.5	MKP1T031006B______
0.15 "	11	21	26.5	22.5	MKP1O131505I______	13	24	31.5	27.5	MKP1T031506D______
	11	21	31.5	27.5	MKP1O131506B______					
0.22 "	11	21	31.5	27.5	MKP1O132206B______	15	26	31.5	27.5	MKP1T032206F______
						13	24	41.5	37.5	MKP1T032207C______
0.33 "	13	24	31.5	27.5	MKP1O133306D______	17	34.5	31.5	27.5	MKP1T033306I______
	15	26	31.5	27.5	MKP1O133306F______	17	29	41.5	37.5	MKP1T033307E______
	13	24	41.5	37.5	MKP1O133307C______					
0.47 "	17	29	31.5	27.5	MKP1O134706G______	20	39.5	31.5	27.5	MKP1T034706J______
	13	24	41.5	37.5	MKP1O134707C______	19	32	41.5	37.5	MKP1T034707F______
0.68 "	20	39.5	31.5	27.5	MKP1O136806J______	20	39.5	41.5	37.5	MKP1T036807G______
	17	29	41.5	37.5	MKP1O136807E______					
1.0 µF	20	39.5	41.5	37.5	MKP1O141007G______	24	45.5	41.5	37.5	MKP1T041007H______
1.5 "	24	45.5	41.5	37.5	MKP1O141507H______	31	46	41.5	37.5	MKP1T041507I______
2.2 "	31	46	41.5	37.5	MKP1O142207I______	40	55	41.5	37.5	MKP1T042207K______
						35	50	57	52.5	MKP1T042209F______
3.3 "	40	55	41.5	37.5	MKP1O143307K______	45	65	57	52.5	MKP1T043309J______
	35	50	57	52.5	MKP1O143309F______					
4.7 "	45	55	57	52.5	MKP1O144709H______					

* AC voltage: $f \leq 1000$ Hz; $1.4 \times U_{rms} + UDC \leq U_r$

** PCM = Printed circuit module = pin spacing

Dims. in mm.

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

Part number completion:		
Version code:	2-pin	= 00
	4-pin	= D4
Tolerance:	20 %	= M
	10 %	= K
	5 %	= J
Packing:	bulk	= S
Pin length:	6-2	= SD
Taped version see page 143.		

Rights reserved to amend design data without prior notification.

Continuation page 68

01.16

WIMA MKP 10

Continuation

General Data

Capacitance	2000 VDC/700 VAC* W	H	L	PCM**	Part number	2500 VDC/700 VAC* W	H	L	PCM**	Part number
1000 pF	4	9	13	10	MKP1U011003C______	5	11	18	15	MKP1V011004B______
						6	15	26.5	22.5	MKP1V011005B______
1500 "	4	9	13	10	MKP1U011503C______	5	11	18	15	MKP1V011504B______
						6	15	26.5	22.5	MKP1V011505B______
2200 "	5	11	13	10	MKP1U012203F______	5	11	18	15	MKP1V012204B______
	5	11	18	15	MKP1U012204B______	6	15	26.5	22.5	MKP1V012205B______
3300 "	5	11	18	15	MKP1U013304B______	5	11	18	15	MKP1V013304B______
						6	15	26.5	22.5	MKP1V013305B______
4700 "	5	11	18	15	MKP1U014704B______	6	12.5	18	15	MKP1V014704C______
	6	15	26.5	22.5	MKP1U014705B______	6	15	26.5	22.5	MKP1V014705B______
6800 "	6	12.5	18	15	MKP1U016804C______	7	14	18	15	MKP1V016804D______
	6	15	26.5	22.5	MKP1U016805B______	7	16.5	26.5	22.5	MKP1V016805D______
0.01 µF	7	14	18	15	MKP1U021004D______	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1V021005F______
	6	15	26.5	22.5	MKP1U021005B______					
0.015 "	8	15	18	15	MKP1U021504F______	10.5	19	26.5	22.5	MKP1V021505G______
	6	15	26.5	22.5	MKP1U021505B______					
0.022 "	9	16	18	15	MKP1U022204J______	11	21	26.5	22.5	MKP1V022205I______
	7	16.5	26.5	22.5	MKP1U022205D______					
0.033 "	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1U023305F______	11	21	26.5	22.5	MKP1V023305I______
	9	19	31.5	27.5	MKP1U023306A______	9	19	31.5	27.5	MKP1V023306A______
0.047 "	10.5	19	26.5	22.5	MKP1U024705G______	11	21	31.5	27.5	MKP1V024706B______
	11	21	31.5	27.5	MKP1U024706B______					
0.068 "	11	21	26.5	22.5	MKP1U026805I______	13	24	31.5	27.5	MKP1V026806D______
	11	21	31.5	27.5	MKP1U026806B______					
0.1 µF	13	24	31.5	27.5	MKP1U031006D______	15	26	31.5	27.5	MKP1V031006F______
						13	24	41.5	37.5	MKP1V031007C______
0.15 "	15	26	31.5	27.5	MKP1U031506F______	17	34.5	31.5	27.5	MKP1V031506I______
	13	24	41.5	37.5	MKP1U031507C______	15	26	41.5	37.5	MKP1V031507D______
0.22 "	17	34.5	31.5	27.5	MKP1U032206I______	19	32	41.5	37.5	MKP1V032207F______
	17	29	41.5	37.5	MKP1U032207E______					
0.33 "	19	32	41.5	37.5	MKP1U033307F______	24	45.5	41.5	37.5	MKP1V033307H______
0.47 "	20	39.5	41.5	37.5	MKP1U034707G______	31	46	41.5	37.5	MKP1V034707I______
0.68 "	24	45.5	41.5	37.5	MKP1U036807H______	35	50	41.5	37.5	MKP1V036807J______
1.0 µF	35	50	41.5	37.5	MKP1U041007J______	40	55	41.5	37.5	MKP1V041007K______
						35	50	57	52.5	MKP1V041009F______
1.5 "	40	55	41.5	37.5	MKP1U041507K______	45	55	57	52.5	MKP1V041509H______
	35	50	57	52.5	MKP1U041509F______					
2.2 "	45	55	57	52.5	MKP1U042209H______					

* AC voltage: $f \leq 1000$ Hz; $1.4 \times U_{rms} + UDC \leq U_r$

New values

** PCM = Printed circuit module = pin spacing

Dims. in mm.

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

Part number completion:		
Version code:	2-pin	= 00
	4-pin	= D4
Tolerance:	20 %	= M
	10 %	= K
	5 %	= J
Packing:	bulk	= S
Pin length:	6-2	= SD
Taped version see page 143.		

Rights reserved to amend design data without prior notification.

Continuation page 69

01.16

WIMA MKP 10

Continuation

General Data

Capacitance	3000 VDC/700 VAC* W	H	L	PCM**	Part number
0.01 µF	8.5	18.5	26.5	22,5	MKP1W021005F______
0.015 „	10.5	19	26.5	22,5	MKP1W021505G______
0.022 „	11	21	26.5	22,5	MKP1W022205I______
0.033 „	11	21	26.5	22.5	MKP1W023305I______
	9	19	31.5	27.5	MKP1W023306A______
0.047 „	11	21	31.5	27.5	MKP1W024706B______
0.068 „	13	24	31.5	27.5	MKP1W026806D______
0.1 µF	15	26	31.5	27.5	MKP1W031006F______
	13	24	41.5	37.5	MKP1W031007C______
0.15 „	17	34.5	31.5	27.5	MKP1W031506I______
	15	26	41.5	37.5	MKP1W031507D______
0.22 „	19	32	41.5	37.5	MKP1W032207F______
0.33 „	24	45.5	41.5	37.5	MKP1W033307H______
0.47 „	31	46	41.5	37.5	MKP1W034707I______
0.68 „	35	50	41.5	37.5	MKP1W036807J______
1.0 µF	40	55	41.5	37.5	MKP1W041007K______
	35	50	57	52.5	MKP1W041009F______
1.5 „	45	55	57	52.5	MKP1W041509H______

* AC voltage: $f \leq 1000$ Hz; $1.4 \times U_{rms} + UDC \leq U_r$

New box sizes

** PCM = Printed circuit module = pin spacing

Dims. in mm.

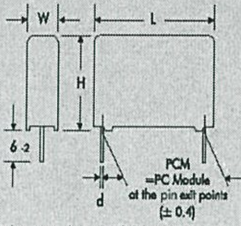
The box sizes according to the main catalogue 2015 are still available on request

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

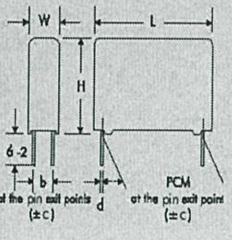
Part number completion:

Version code:	2-pin	= 00
	4-pin	= D4
Tolerance:	20 %	= M
	10 %	= K
	5 %	= J
Packing:	bulk	= S
Pin length:	6-2	= SD

Taped version see page 143.



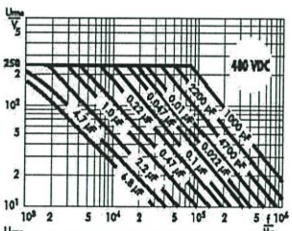
Ø d	PCM
0.6	7.5 - 10
0.8	15 - 27.5
1.0	37.5

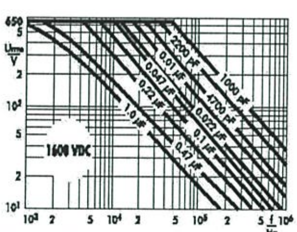


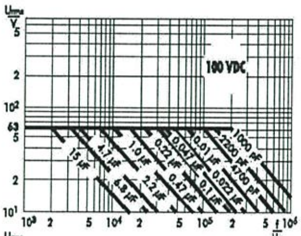
W	PCM	b	Ø d	c
17	37.5	10	1.0	0.4
19	37.5	10	1.0	0.4
20	37.5	12.5	1.0	0.4
24	37.5	12.5	1.0	0.4
31	37.5	20	1.0	0.4
35	37.5	20	1.0	0.4
40	37.5	20	1.0	0.4
35	52.5	20	1.2	0.8
45	52.5	20	1.2	0.8

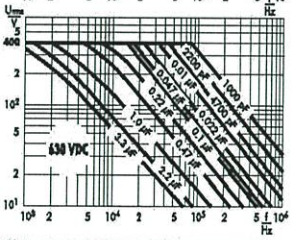
Rights reserved to amend design data without prior notification.

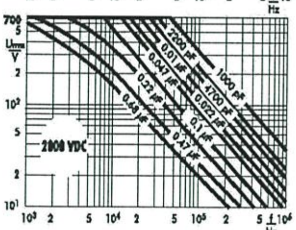
Permissible AC voltage in relation to frequency at 10° C internal temperature rise (general guide).

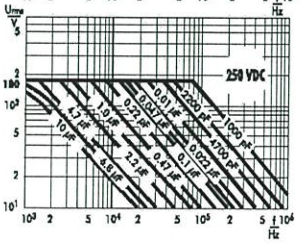


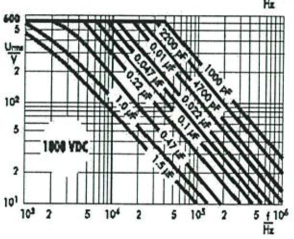


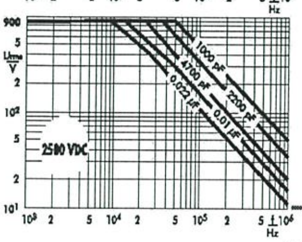












Recommendation for Processing and Application of Through-Hole Capacitors

Soldering Process

Internal temperature of the capacitor must be kept as follows:

Polyester: preheating: $T_{max.} \leq 125°C$
soldering: $T_{max.} \leq 135°C$

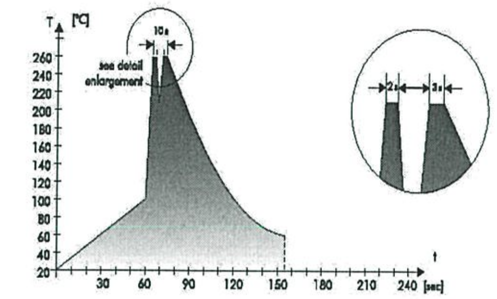
Polypropylene: preheating: $T_{max.} \leq 100°C$
soldering: $T_{max.} \leq 110°C$

Single wave soldering
Soldering bath temperature: $T < 260°C$
Dwell time: $t < 5$ sec

Double wave soldering
Soldering bath temperature: $T < 260°C$
Dwell time: $\Sigma t < 5$ sec

Due to different soldering processes and heat requirements the graphs are to be regarded as a recommendation only.

Wave soldering



Typical temperature/time graph for double wave soldering

WIMA Quality and Environmental Philosophy

ISO 9001:2008 Certification

ISO 9001:2008 is an international basic standard of quality assurance systems for all branches of industry. The approval according to ISO 9001:2008 of our factories by the infaz (Institut für Auditierung und Zertifizierung) certifies that organisation, equipment and monitoring of quality assurance in our factories correspond to internationally recognized standards.

WIMA WPCS

The WIMA Process Control System (WPCS) is a quality surveillance and optimization system developed by WIMA. WPCS is a major part of the quality-oriented WIMA production. Points of application of WPCS during production process:

- **incoming material inspection**
- **metallization**
- **film inspection**
- **schoopage**
- **pre-healing**
- **pin attachment**
- **cast resin preparation/ encapsulation**
- **100% final inspection**
- **Testing as per customer requirements**

WIMA Environmental Policy

All WIMA capacitors, irrespective of whether through-hole devices or SMD, are made of environmentally friendly materials. Neither during manufacture nor in the product itself any toxic substances are used, e.g.

- **Lead**
- **PCB**
- **CFC**
- **Hydrocarbon chloride**
- **Chromium 6+**
- **PBB/PBDE**
- **Arsenic**
- **Cadmium**
- **Mercury**
- **etc.**

We merely use pure, recyclable materials for packing our components, such as:

- **carton**
- **cardboard**
- **adhesive tape made of paper**
- **polystyrene**

We almost completely refrain from using packing materials such as:

- **foamed polystyrene (Styropor®)**
- **adhesive tapes made of plastic**
- **metal clips**

RoHS Compliance

According to the RoHS Directive 2011/65/EU certain hazardous substances like e.g. lead, cadmium, mercury must not be used any longer in electronic equipment as of July 1st, 2006. For the sake of the environment WIMA has refraind from using such substances since years already.

Tape for lead-free WIMA capacitors

DIN EN ISO 14001:2004

WIMA's environmental management has been established in accordance with the guidelines of DIN EN ISO 14001:2004 to optimize the production processes with regard to energy and resources.

01.16

Typical Dimensions for Taping Configuration

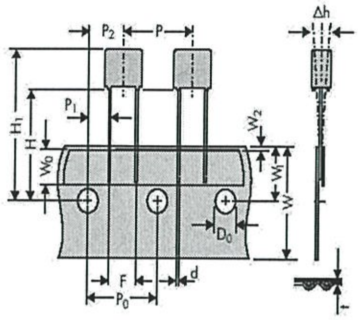
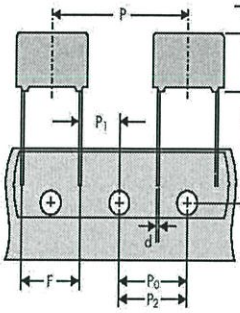


Diagram 1: PCM 2.5/5/7.5mm



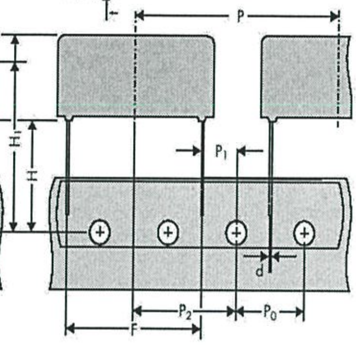


Diagram 2: PCM 10/15 mm

Diagram 3: PCM 22.5 and 27.5*mm
*PCM 27.5 taping possible with two feed holes between components

Designation	Symbol	Dimensions for Radial Taping PCM 2.5 taping	PCM 5 taping	PCM 7.5 taping	PCM 10 taping*	PCM 15 taping*	PCM 22.5 taping	PCM 27.5 taping
Carrier tape width	W	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5
Hold-down tape width	W_0	6.0 for hot-sealing adhesive tape	6.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape
Hole position	W_1	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5
Hold-down tape position	W_2	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.
Feed hole diameter	D_0	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2
Pitch of component	P	12.7 ±1.0	12.7 ±1.0	12.7 ±1.0	25.4 ±1.0	25.4 ±1.0	38.1 ±1.5	*38.1 ±1.5 or 50.8 ±1.5
Feed hole pitch	P_0	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch
Feed hole centre to pin	P_1	5.1 ±0.5	3.85 ±0.7	2.6 ±0.7	7.7 ±0.7	5.2 ±0.7	7.8 ±0.7	5.3 ±0.7
Hole centre to component centre	P_2	6.35 ±1.3	6.35 ±1.3	6.35 ±1.3	12.7 ±1.3	12.7 ±1.3	19.05 ±1.3	19.05 ±1.3
Feed hole centre to bottom edge of the component	H	16.5 ±0.3 18.5 ±0.5	16.5 ±0.3 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5
Feed hole centre to top edge of the component	H_1	$H+H_{component} < H_1$ 32.25 max.	$H+H_{component} < H_1$ 32.25 max.	$H+H_{component} < H_1$ 24.5 to 31.5	$H+H_{component} < H_1$ 25.0 to 31.5	$H+H_{component} < H_1$ 26.0 to 37.0	$H+H_{component} < H_1$ 30.0 to 43.0	$H+H_{component} < H_1$ 35.0 to 45.0
Pin spacing at upper edge of carrier tape	F	2.5 ±0.5	$5.0^{+0.8}_{-0.2}$	7.5 ±0.8	10.0 ±0.8	15 ±0.8	22.5 ±0.8	27.5 ±0.8
Pin diameter	d	0.4 ±0.05	0.5 ±0.05	*0.5 ±0.05 or $0.6^{+0.06}_{-0.05}$	*0.5 ±0.05 or $0.6^{+0.06}_{-0.05}$	$0.8^{+0.08}_{-0.05}$	$0.8^{+0.08}_{-0.05}$	$0.8^{+0.08}_{-0.05}$
Component alignment	Δh	± 2.0 max.	± 2.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.
Total tape thickness	t	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2
Package (see also page 144)		ROLL/AMMO REEL ⌀ 360 max. ⌀ 30 ±1 B 52 ±2, 58 ±2 } depending on comp. dimensions		AMMO REEL ⌀ 360 max. ⌀ 30 ±1 B 52 ±2, 58 ±2, 66 ±2 or REEL ⌀ 500 max. ⌀ 25 ±1 B 54 ±2, 60 ±2, 68 ±2 } depending on PCM and component dimensions				
Unit		see details page 145.						

Dims in mm.

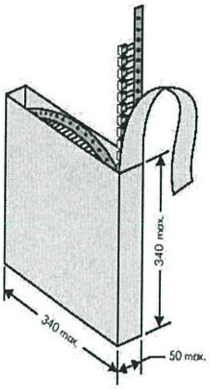
* Diameter of pins see General Data.
* PCM 10 and PCM 15 can be crimped to PCM 7.5.
  Position of components according to PCM 7.5 (sketch 1). P_0 = 12.7 or 15.0 is possible

Please clarify customer-specific deviations with the manufacturer.

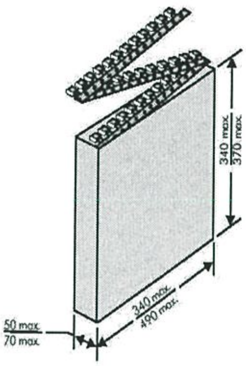
01.16

Types of Tape Packaging of Capacitors for Automatic Radial Insertion

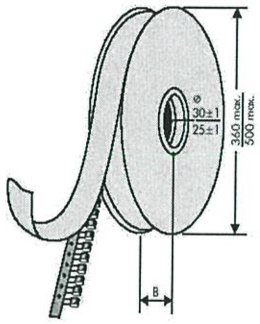
■ **ROLL Packaging**



■ **AMMO Packaging**



■ **REEL Packaging**



BAR CODE (Labelling)

Labelling of package units in plain text and with alphanumerical Bar Code

Scanner decoding of

- WIMA supplier number
- Customer's P/O number
- Customer's part number
- WIMA confirmation number
- WIMA part number
- Lot number
- Date code
- Quantity

In addition part description of

- article
- capacitance value
- rated voltage
- dimensions
- capacitance tolerance
- packing

as well as gross weight and customer's name are indicated in plain text.

BARCODE „Code 39"

Packing Quantities for Capacitors with Radial Pins in PCM 2.5 mm to 22.5 mm

WIMA®

PCM	Size W	Size H	Size L	Size Codes	bulk S	pcs. per packing unit: ROLL H16.5 (N) / H18.5 (O)	REEL ø 360 H16.5 (F) / H18.5 (I)	REEL ø 500 H16.5 (H) / H18.5 (J)	AMMO 340 × 340 H16.5 (A) / H18.5 (C)	AMMO 490 × 370 H16.5 (B) / H18.5 (D)
2.5 mm	2.5	7	4.6	**0B**	5000	2200	2500	–	2800	–
	3	7.5	4.6	**0C**	5000	2000	2300	–	2300	–
	3.8	8.5	4.6	**0D**	5000	1500	1800	–	1800	–
	4.6	9	4.6	**0E**	5000	1200	1500	–	1500	–
	5.5	10	4.6	**0F**	5000	900	1200	–	1200	–
5 mm	2.5	6.5	7.2	**1A**	5000	2200	2500	–	2800	–
	3	7.5	7.2	**1B**	5000	2000	2300	–	2300	–
	3.5	8.5	7.2	**1C**	5000	1600	2000	–	2000	–
	4.5	6	7.2	**1D**	6000	1300	1500	–	1500	–
	4.5	9.5	7.2	**1E**	4000	1300	1500	–	1500	–
	5	10	7.2	**1F**	3500	1100	1400	–	1400	–
	5.5	7	7.2	**1G**	4000	1000	1200	–	1200	–
	5.5	11.5	7.2	**1H**	2500	1000	1200	–	1200	–
	6.5	8	7.2	**1I**	2500	800	1000	–	1000	–
	7.2	8.5	7.2	**1J**	2500	700	1000	–	1000	–
	7.2	13	7.2	**1K**	2000	700	950	–	1000	–
	8.5	10	7.2	**1L**	2000	600	800	–	800	–
	8.5	14	7.2	**1M**	1500	600	800	–	800	–
	11	16	7.2	**1N**	1000	500	600	–	400	–
7.5 mm	2.5	7	10	**2A**	5000	–	2500	4400	2500	–
	3	8.5	10	**2B**	5000	–	2200	4300	2300	4150
	4	9	10	**2C**	4000	–	1700	3200	1700	3100
	4.5	9.5	10.3	**2D**	3500	–	1500	2900	1400	2700
	5	10.5	10.3	**2E**	3000	–	1300	2500	1300	–
	5.7	12.5	10.3	**2F**	2000	–	1000	2200	1100	–
	7.2	12.5	10.3	**2G**	1500	–	900	1800	1000	–
10 mm	3	9	13	**3A**	3000	–	1100	2200	–	1900
	4	8.5	13.5	**FA**	3000	–	900	1600	–	1450
	4	9	13	**3C**	3000	–	900	1600	–	1450
	4	9.5	13	**3D**	3000	–	900	1600	–	1400
	5	10	13.5	**FB**	2000	–	700	1300	–	1200
	5	11	13	**3F**	3000	–	700	1300	–	1200
	6	12	13	**3G**	2400	–	550	1100	–	1000
	6	12.5	13	**3H**	2400	–	550	1100	–	1000
	8	12	13	**3I**	2000	–	400	800	–	740
15 mm	5	11	18	**4B**	2400	–	600	1200	–	1150
	5	13	19	**FC**	1000	–	600	1200	–	1200
	6	12.5	18	**4C**	2000	–	500	1000	–	1000
	6	14	19	**FD**	1000	–	500	1000	–	1000
	7	14	18	**4D**	1600	–	450	900	–	850
	7	15	19	**FE**	1000	–	450	900	–	850
	8	15	18	**4F**	1200	–	400	800	–	740
	8	17	19	**FF**	500	–	400	800	–	740
	9	14	18	**4H**	1200	–	350	700	–	650
	9	16	18	**4J**	900	–	350	700	–	650
	10	18	19	**FG**	500	–	300	650	–	590
	11	14	18	**4M**	1000	–	300	600	–	540
22.5 mm	5	14	26.5	**5A**	1200	–	–	800	–	770
	6	15	26.5	**5B**	1000	–	–	700	–	640
	7	16.5	26.5	**5D**	760	–	–	600	–	550
	8	20	28	**FH**	500	–	–	500	–	480
	8.5	18.5	26.5	**5F**	500	–	–	480	–	450
	10	22	28	**FI**	570*	–	–	420	–	380
	10.5	19	26.5	**5G**	594*	–	–	400	–	360
	10.5	20.5	26.5	**5H**	594*	–	–	400	–	360
	11	21	26.5	**5I**	561*	–	–	380	–	350
	12	24	28	**FJ**	480*	–	–	350	–	310

* TPS (Tray-Packing-System). Plate versions may have different packing units. Samples and pre-production needs on request.

▒ Moulded versions.

Rights reserved to amend design data without prior notification.

01.16

Packing Quantities for Capacitors with Radial Pins in PCM 27.5 mm to 52.5 mm

PCM	Size				bulk	pcs. per packing unit: ROLL H16.5 / H18.5	REEL ø 360 H16.5 / H18.5	REEL ø 500 H16.5 / H18.5	AMMO 340 × 340 H16.5 / H18.5	AMMO 490 × 370 H16.5 / H18.5
	W	H	L	Codes	S	N / O	F / I	H / J	A / C	B / D
27.5 mm	9	19	31.5	**6A**	567*	–	–	460/340*	–	420
	11	21	31.5	**6B**	459*	–	–	380/280*	–	350
	13	24	31.5	**6D**	378*	–	–	300	–	290
	13	25	33	**FK**	405*	–	–	–	–	–
	15	26	31.5	**6F**	324*	–	–	270	–	250
	15	26	33	**FL**	324*	–	–	–	–	–
	17	29	31.5	**6G**	198*	–	–	–	–	–
	17	34.5	31.5	**6I**	198*	–	–	–	–	–
	20	32	33	**FM**	162*	–	–	–	–	–
	20	39.5	31.5	**6J**	162*	–	–	–	–	–
37.5 mm	9	19	41.5	**7A**	441*	–	–	–	–	–
	11	22	41.5	**7B**	357*	–	–	–	–	–
	13	24	41.5	**7C**	294*	–	–	–	–	–
	15	26	41.5	**7D**	252*	–	–	–	–	–
	17	29	41.5	**7E**	154*	–	–	–	–	–
	19	32	41.5	**7F**	140*	–	–	–	–	–
	20	39.5	41.5	**7G**	126*	–	–	–	–	–
	24	45.5	41.5	**7H**	112*	–	–	–	–	–
	31	46	41.5	**7I**	84*	–	–	–	–	–
	35	50	41.5	**7J**	35*	–	–	–	–	–
	40	55	41.5	**7K**	28*	–	–	–	–	–
48.5 mm	19	31	56	**8D**	120*	–	–	–	–	–
	23	34	56	**8E**	80*	–	–	–	–	–
	27	37.5	56	**8H**	84*	–	–	–	–	–
	33	48	56	**8J**	25*	–	–	–	–	–
	37	54	56	**8L**	25*	–	–	–	–	–
52.5 mm	25	45	57	**9D**	70*	–	–	–	–	–
	30	45	57	**9E**	60*					
	35	50	57	**9F**	25*					
	45	55	57	**9H**	20*	–	–	–	–	–
	45	65	57	**9J**	20*	–	–	–	–	–

* for 2-inch transport pitches.
* TPS (Tray-Packing-System). Plate versions may have different packing units.
Samples and pre-production needs on request.

Moulded versions.

Rights reserved to amend design data without prior notification.

Updated data on www.wima.com

WIMA Part Number System

A WIMA part number consists of 18 digits and is composed as follows:

Field 1 - 4: Type description
Field 5 - 6: Rated voltage
Field 7 - 10: Capacitance
Field 11 - 12: Size and PCM
Field 13 - 14: Version code (e.g. Snubber versions)
Field 15: Capacitance tolerance
Field 16: Packing
Field 17 - 18: Pin length (untaped)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
M	K	S	2	C	0	2	1	0	0	1	A	0	0	M	S	S	D
MKS 2				63 VDC		0.01 µF				2.5x6.5x7.2		-		20%	bulk	6 -2	

Type description:

SMD-PET	= SMDT
SMD-PEN	= SMDN
SMD-PPS	= SMDI
FKP 02	= FKP0
MKS 02	= MKS0
FKS 2	= FKS2
FKP 2	= FKP2
FKS 3	= FKS3
FKP 3	= FKP 3
MKS 2	= MKS2
MKP 2	= MKP2
MKS 4	= MKS4
MKP 4C	= MKPC
MKP 4	= MKP4
MKP 10	= MKP1
FKP 1	= FKP1
MKP-X2	= MKX2
MKP-X1 R	= MKX1
MKP-Y2	= MKY2
MP 3-X2	= MPX2
MP 3-X1	= MPX1
MP 3-Y2	= MPY2
MP 3R-Y2	= MPRY
MKP 4F	= MKPF
Snubber MKP	= SNMP
Snubber FKP	= SNFP
GTO MKP	= GTOM
DC-LINK MKP 3	= DCP3
DC-LINK MKP 4	= DCP4
DC-LINKMKP4S	= DCPS
DC-LINK MKP 5	= DCP5
DC-LINK MKP 6	= DCP6
DC-LINK HC	= DCHC
DC-LINK HY	= DCHY

Rated voltage:

50 VDC	= B0
63 VDC	= C0
100 VDC	= D0
250 VDC	= F0
400 VDC	= G0
450 VDC	= H0
520 VDC	= H2
600 VDC	= I0
630 VDC	= J0
700 VDC	= K0
800 VDC	= L0
850 VDC	= M0
900 VDC	= N0
1000 VDC	= O1
1100 VDC	= P0
1200 VDC	= Q0
1250 VDC	= R0
1500 VDC	= S0
1600 VDC	= T0
2000 VDC	= U0
2500 VDC	= V0
3000 VDC	= W0
4000 VDC	= X0
6000 VDC	= Y0
250 VAC	= 0W
275 VAC	= 1W
300 VAC	= 2W
305 VAC	= AW
350 VAC	= BW
440 VAC	= 4W
500 VAC	= 5W
...	

Capacitance:

22 pF	= 0022
47 pF	= 0047
100 pF	= 0100
150 pF	= 0150
220 pF	= 0220
330 pF	= 0330
470 pF	= 0470
680 pF	= 0680
1000 pF	= 1100
1500 pF	= 1150
2200 pF	= 1220
3300 pF	= 1330
4700 pF	= 1470
6800 pF	= 1680
0.01 µF	= 2100
0.022 µF	= 2220
0.047 µF	= 2470
0.1 µF	= 3100
0.22 µF	= 3220
0.47 µF	= 3470
1 µF	= 4100
2.2 µF	= 4220
4.7 µF	= 4470
10 µF	= 5100
22 µF	= 5220
47 µF	= 5470
100 µF	= 6100
220 µF	= 6220
1000 µF	= 7100
1500 µF	= 7150
...	

Size:

4.8x3.3x3 Size 1812	= KA
4.8x3.3x4 Size 1812	= KB
5.7x5.1x3.5 Size 2220	= QA
5.7x5.1x4.5 Size 2220	= QB
7.2x6.1x3 Size 2824	= TA
7.2x6.1x5 Size 2824	= TB
10.2x7.6x5 Size 4030	= VA
12.7x10.2x6 Size 5040	= XA
15.3x13.7x7 Size 6054	= YA
2.5x7x4.6 PCM 2.5	= 0B
3x7.5x4.6 PCM 2.5	= 0C
2.5x6.5x7.2 PCM 5	= 1A
3x7.5x7.2 PCM 5	= 1B
2.5x7x10 PCM 7.5	= 2A
3x8.5x10 PCM 7.5	= 2B
3x9x 13 PCM 10	= 3A
4x9x 13 PCM 10	= 3C
5x 11x 18 PCM 15	= 4B
6x 12.5x 18 PCM 15	= 4C
5x 14x 26.5 PCM 22.5	= 5A
6x 15x 26.5 PCM 22.5	= 5B
9x 19x 31.5 PCM 27.5	= 6A
11x21x31.5 PCM 27.5	= 6B
9x 19x41.5 PCM 37.5	= 7A
11x22x41.5 PCM 37.5	= 7B
19x31x56 PCM 48.5	= 8D
25x45x57 PCM 52.5	= 9D
...	

Version code:

Standard	= 00
Version A1	= 1A
Version A1.1.1	= 1B
Version A2	= 2A
...	

Tolerance:

±20%	= M
±10%	= K
±5%	= J
±2.5%	= H
±1 %	= E
...	

Packing:

AMMO H16.5 340x340	= A
AMMO H16.5 490x370	= B
AMMO H18.5 340x340	= C
AMMO H18.5 490x370	= D
REEL H16.5 360	= F
REEL H16.5 500	= H
REEL H18.5 360	= I
REEL H18.5 500	= J
ROLL H16.5	= N
ROLL H18.5	= O
BLISTER W12 180	= P
BLISTER W12 330	= Q
BLISTER W16 330	= R
BLISTER W24 330	= T
Bulk/TPS Standard	= S
...	

Pin length (untaped)

3.5 ±0.5	= C9
6 -2	= SD
16 ±1	= P1
...	

Pin length (taped)

none	= 00

The data on this page is not complete and serves only to explain the part number system. Part number information is listed on the pages of the respective WIMA range.

01.16

ภาคผนวก จ

บทความความวิชาการ

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

High Frequency Half-Bridge Generator for Electrical Surgery

ไพบูลย์ วีระโพธิ์ประสิทธิ [1] ภัทรพล วัฒนสุขสกุล [2] ภาสพงศ์ พรพัชรพันธ์ [3]

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 02-329-8341 E-Mail: Paiboonw90@gmail.com, Phattharaphol.w@hotmail.com,

Passapong_golf@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำสนอผลการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า โดยใช้วงจรทางอิเลกทรอนิกส์กำลัง ได้แก่ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบเฟสเดียวและวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ โดยหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าคือการใช้ความถี่สูงในการตัดเนื้อเยื่อตัวอย่างต้องใช้ความถี่สูงเพื่อไม่ให้กล้ามเนื้อเกิดการกระตุกและเพื่อไม่ให้เนื้อเยื่อเกิดการไหม้ โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต แล้วแปลงสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าให้มีความถี่สูงขึ้นถึง 300 กิโลเฮิร์ต ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังบริเวณใบมีดเพื่อนำความร้อนไปผ่าตัดเนื้อเยื่อตัวอย่าง

คำสำคัญ: ความถี่สูง, วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์, การผ่าตัดด้วยไฟฟ้า, เรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์, แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

Abstract

A paper presents design and construction of a High Frequency Half Bridge Generator in Electrical Surgery which uses power electronic circuit including a single phase full wave rectifier and a half bridge inverter. It works by using a high frequency signal passes through the knife to cut the sample with no burnt and electric shock. So we use 300 kHz as a switching frequency in the High-Frequency Half Bridge Generator in Electrical Surgery which supply by AC single phase 220 V 50 Hz from Metropolitan Electricity Authority (MEA).

Keyword: High Frequency, Half Bridge Inverter, Electrical Surgery, Resonant Converter, Electrosurgical Generator

1.บทนำ

การผ่าตัดด้วยไฟฟ้า เป็นการประยุกต์ใช้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงในการผ่าตัดเนื้อเยื่อ โดยหลักการที่สำคัญของการผ่าตัดด้วยไฟฟ้านั้นคือ กระแสไฟฟ้า โดยที่ปลายของมีดผ่าตัดจะมีความหนาแน่นกระแสสูง (Active Electrode) เมื่อกระแสไหลผ่านเนื้อเยื่อของมนุษย์กระแสจะกระจายผ่านไปในทันทีในร่างกายลงไปที่แผ่นกราวด์ (Return Electrode) ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นต่อเซลล์มีค่าลดลง และในการผ่าตัดด้วยกระแสไฟฟ้านั้นอุปกรณ์จะมีการประยุกต์ใช้ Isolate transformer เพื่อแยกกราวด์ของระบบออกจากกันเพื่อเพิ่มความปลอดภัย โดยหลักการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าเนื้อเยื่อจะได้รับความร้อนโดยกระแสไฟฟ้า บริเวณที่จุดสัมผัสจะเกิดความร้อนสูงทำให้เนื้อเยื่อสุกและแห้งเป็นผลทำให้เส้นเลือดฝอยและท่อน้ำเหลืองหดตัว ทำให้ไม่มีน้ำเหลืองและเลือดไหลออกมาจากบริเวณที่ได้รับการผ่าตัด กระแสไฟฟ้าจะทำให้เซลล์เนื้อเยื่อแยกออกจากกันทำให้เกิดลักษณะเหมือนเนื้อเยื่อที่ถูกตัดด้วยมีด ซึ่งลักษณะของการผ่าตัดและห้ามเลือดจะขึ้นอยู่กับการการควบคุมปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงที่จ่ายให้กับเครื่องมือผ่าตัดจึงมีความสำคัญมาก

2. หลักการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า [1]

การผ่าตัดด้วยเครื่องจี้ตัดด้วยไฟฟ้า โดยทั่วไปอาศัยหลักการทางไฟฟ้าของเครื่องเชื่อมไฟฟ้า ที่ทำให้เกิดการสปาร์คหรือการอาร์คของกระแสไฟฟ้า เพื่อให้เกิดความร้อนสูง (ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส) เมื่อเนื้อเยื่อมีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ของเหลวภายในเซลล์ (น้ำ) จะเดือดกลายเป็นไอ แห้งจนปริแตกแยกออกจากกันหรือหากมีการควบคุมอุณหภูมิให้พอเหมาะ (ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส) ก็สามารถทำให้ของเหลวในเซลล์หรือเม็ดเลือดแห้งแข็งจับตัวกันเป็นก้อนปิดหลอดเลือด ซึ่งเป็นการห้ามเลือด (Hemostatic effect) ปรากฏการณ์ที่เกิดจากการใช้เครื่องจี้ตัดด้วยไฟฟ้าจะมีอยู่ 2 ช่วง ดังนี้

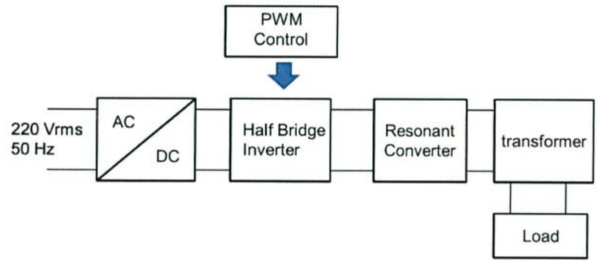
1. ความต้านทานของเนื้อเยื่อจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเป็นศูนย์

2. ความต้านทานของเนื้อเยื่อจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากที่น้ำหรือของเหลวภายในเนื้อเยื่อแห้งไปอย่างรวดเร็วจนเนื้อเยื่อเกิดระเบิดแยกแตกออกจากกัน

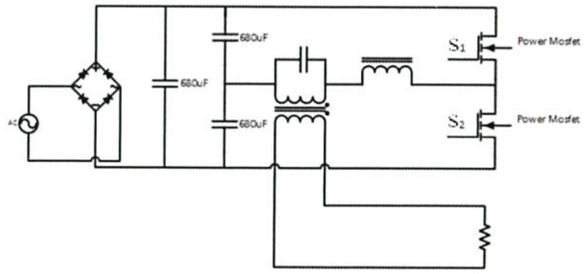
3. วงจรแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า [2]

เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าประกอบด้วย

1. วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Single Phase Full Bridge Rectifier)
2. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟสลับแบบกึ่งบริดจ์ (Half-Bridge Inverter)
3. วงจรขับอุปกรณ์สวิทชิ่ง (Drive Circuit)
4. วงจรเรโซแนนซ์คอนเวอเตอร์ (Resonant Converter)
5. หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง (High Frequency Transformer)
6. มีดหรือตัวนำไฟฟ้า (Blade)



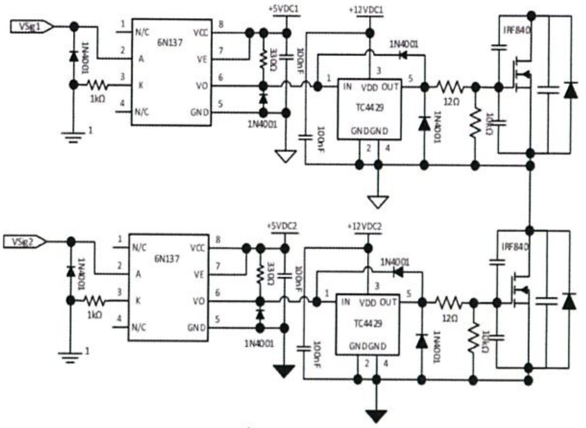
รูปที่ 1 ส่วนประกอบของวงจรแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2 วงจรสมูลของแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการ-ผ่าตัดด้วยไฟฟ้า

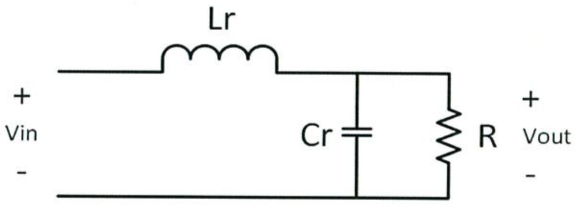
3.2 วงจรขับเกตมอสเฟต

วงจรขับมอสเฟตออกแบบโดยใช้ Opto Isolator 6N137 เพื่อแยกกราวด์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้ TC4429 เพื่อขับมอสเฟตที่ขาเกต-ซอร์ส (V_{GS})



รูปที่ 3 วงจรขับมอสเฟต

3.3 เรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ [3]

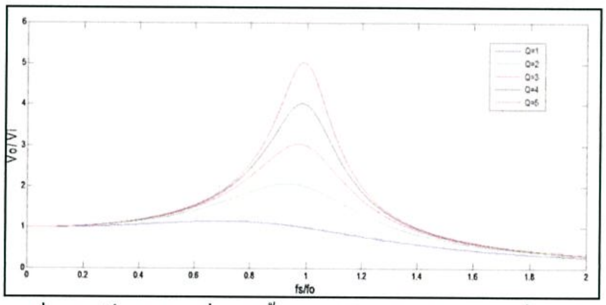


รูปที่ 4 วงจรสมมูลเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์

ฟังก์ชั่นก์ภ่ายโอน $\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| = \frac{1}{\sqrt{\left(1-\left(\frac{f_s}{f_0}\right)^2\right)^2+\left(\frac{f_s}{Qf_0}\right)^2}}$ (1)

ความถี่เรโซแนนท์ $f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_rC_r}}$ (2)

ควอลิตี้แฟคเตอร์ $Q=\frac{R}{\omega_0 L_r}$ (3)



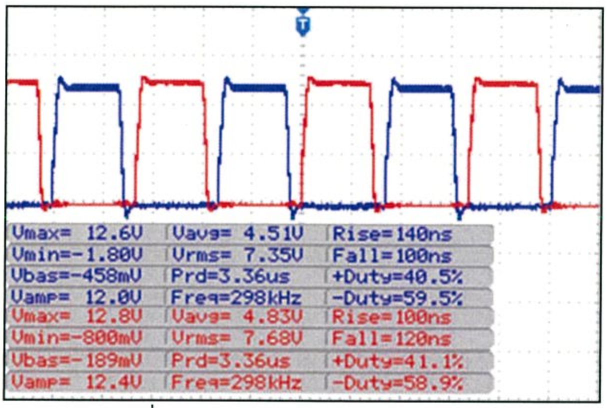
รูปที่ 5 ฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่ควอลิตี้แฟคเตอร์และอัตราส่วนความถี่สวิตซ์-ต่อความถี่เรโซแนนท์ต่างๆ

ออกแบบ f_0 ที่ 230 kHz และ Q ขณะมีโหลดที่ 1.74

4. ผลการจำลองและผลการทดสอบ

การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ใช้โปรแกรม MATLAB Simulink และทดสอบวงจรด้วยตัวต้านทาน 300 โอห์มเทียบกับเมื่อใช้มีดผ่าเนื้อตัวอย่าง (อกไก่)

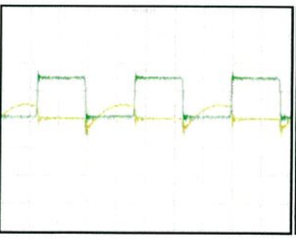
4.1 แรงดันขับเกตมอสเฟต



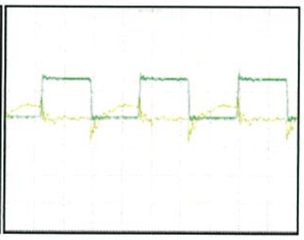
รูปที่ 6 สัญญาณขับเกตมอสเฟต S_1 และ S_2

4.2 แรงดันคร่อมมอสเฟตและกระแสที่ผ่านมอสเฟตในสภาวะการสวิตซ์แบบแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switching)

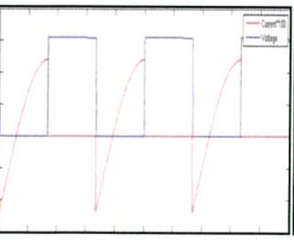
จากการใช้วงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์โดยออกแบบที่ความถี่รีโซแนนท์น้อยกว่าความถี่สวิตซ์ ทำให้กระแสมีเฟสตามหลังแรงดัน จุดที่แรงดันเป็นศูนย์ก่อนมอสเฟตเริ่มนำกระแสนี้เรียกว่าการสวิตซ์แบบแรงดันศูนย์



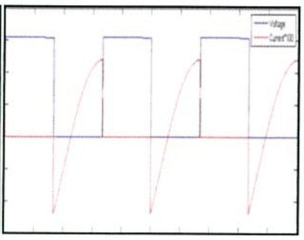
(7)



(8)



(9)



(10)

รูปที่ 7 รูปคลื่น V_{DS} และ I_d ของมอสเฟตของ S_1 (ทดสอบ)

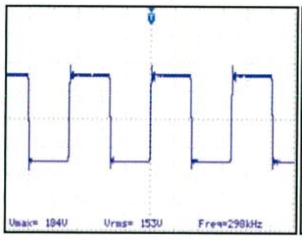
รูปที่ 8 รูปคลื่น V_{DS} และ I_d ของมอสเฟตของ S_2 (ทดสอบ)

รูปที่ 9 รูปคลื่น V_{DS} และ I_d ของมอสเฟตของ S_1 (จำลอง)

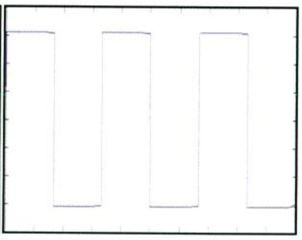
รูปที่ 10 รูปคลื่น V_{DS} และ I_d ของมอสเฟตของ S_2 (จำลอง)

จากผลการทดลองนั้นมอสเฟต S_1 และ S_2 จะทำการสวิตซ์ภายใต้แรงดันเป็นศูนย์ โดยจะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมสวิตซ์นั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ก่อนที่มอสเฟตจะเริ่มนำกระแส

4.3 แรงดันเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์



(11)



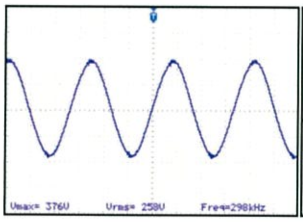
(12)

รูปที่ 11 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ (ทดสอบ)

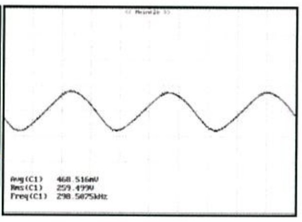
รูปที่ 12 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ (จำลอง)

4.4 แรงดันเอาท์พุทขณะมีโหลด

เนื่องจากวงจรแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าได้ใช้วงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ แรงดันเอาท์พุทมีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์และมีค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการออกแบบไว้



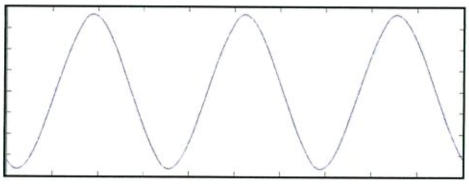
(13)



(14)

รูปที่ 13 รูปคลื่นแรงดันเอท์พุทที่โหลด 300 โอห์ม (ทดสอบ)

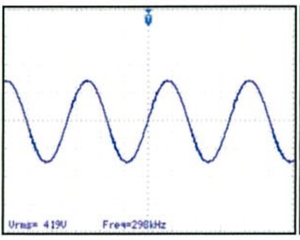
รูปที่ 14 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทขณะที่ใช้ผ่าอกไก่ (ทดสอบ)

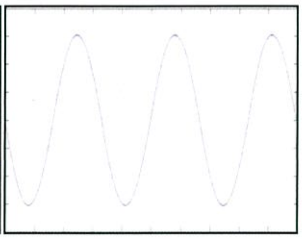


รูปที่ 15 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทที่โหลด 300 โอห์ม (จำลอง)

4.5 แรงดันเอาท์พุทขณะไร้โหลด

ในขณะไร้โหลดจากฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ ทำให้แรงดันเอาท์พุทมีค่าเพิ่มขึ้นตามฟังก์ชั่นถ่ายโอนและควอลิตี้แฟคเตอร์ (Quality Factor: Q)



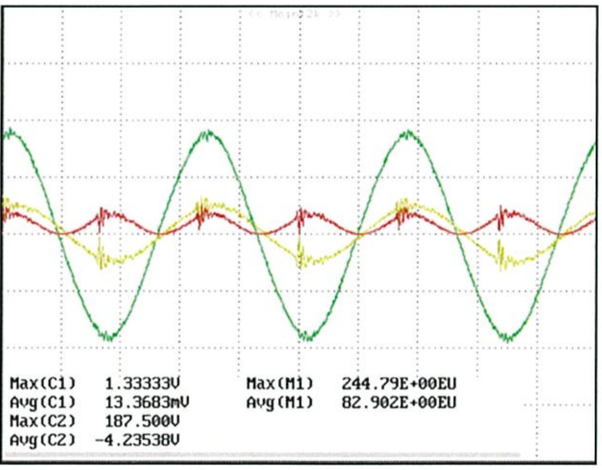


(16) (17)

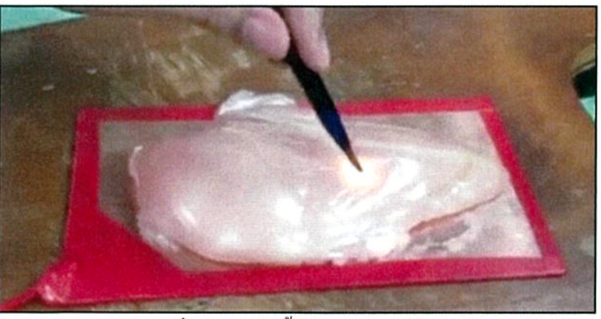
รูปที่ 16 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทขณะไร้โหลด (ทดสอบ)

รูปที่ 17 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทขณะไร้โหลด (จำลอง)

4.6ประสิทธิภาพของวงจร



รูปที่ 18 การวัดแรงดันเอาท์พุท



รูปที่ 19 การผ่าเนื้อตัวอย่าง (อกไก่)

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของวงจรที่

ความต้านทาน	Pin	Pout	η
300	205.9W	165.804W	80.526%

5. สรุป

จากการวัดค่าแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆของวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการผ่าตัดด้วยไฟฟ้าที่โหลด 300 โอห์ม แรงดันอินพุท 220V/50Hz พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จำลองด้วยคอมพิวเตอร์และมีประสิทธิภาพ 80 % จากการทดลองด้วยตัวต้านทานขนาด 300 โอห์ม พบว่ามีสภาพใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อตัวอย่าง (อกไก่) ซึ่งที่แรงดันอินพุท220V/50Hz เมื่อผ่าเนื้อเยื่อตัวอย่างคาดว่ามีกำลังไฟฟ้ามากเกินไปทำให้เนื้อเยื่อฉีกขาดได้อย่างรวดเร็วแต่เนื้อเยื่อบริเวณที่เกิดการฉีกขาดนั้นเกิดอาการไหม้และมีควันเกิดขึ้น เมื่อลดแรงดันอินพุทให้เหลือประมาณ 150V/50Hz พบว่าสามารถผ่าเนื้อเยื่อตัวอย่างได้แต่ไม่แรงเท่าที่แรงดันพิกัด บริเวณที่เนื้อเยื่อฉีกขาดไม่เกิดอาการไหม้และไม่มีควัน

เอกสารอ้างอิง

[1] A Surgeon's Electric Knife: Surgery with High Frequency Currents from : :http://h2g2.com/edited_entry/A762644

[2] Bo Yang, "LLC Resonant Converter" Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System, Blacksburg Virginia, September 12, 2003

[3] วีระเชษฐ์ ขันเงิน และ วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2553. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง กรุงเทพฯ: วี.เจ. พรินติ้ง

นายไพบูลย์ วีระโพธิ์ประสิทธิ์

ที่อยู่ 91 หมู่ 2 ถนน ชลบุรี-แกลง อ.บ้านบึง จ.ชลบุรี 20220

นายภัทรพล วัฒนสุขสกุล

ที่อยู่ 43/36 หมู่ 8 ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120

นายภาสพงศ์ พรพัชรพันธ์

ที่อยู่ 18 หมู่ 5 ต.บ้านสวน อ.เมือง จ.ชลบุรี 20000

ประวัติผู้เขียน

นายไพบูลย์ วีระโพธิ์ประสิทธิ์
จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนชลราษฎรอำรุง แผนการเรียนวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ ปีการศึกษา 2555
เคยเข้ารับการฝึกงานที่ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต2 แผนกควบคุมศูนย์สั่งการ ในปี 2558

นายภัทรพล วัฒนสุขสกุล
จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย นนทบุรี แผนการเรียน วิทยศาสตร์-คณิตศาสตร์ ปีการศึกษา 2555
เคยเข้ารับการฝึกงานที่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ฝ่ายควบคุมระบบ-กำลังไฟฟ้า ในปี 2558

นายภาสพงศ์ พรพัชรพันธ์
จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสาธิตพิบูลบำเพ็ญ แผนการเรียน วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์
เคยเข้ารับการฝึกงานที่ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต2 แผนกซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้า-ย่อย ในปี 2558