

เครื่องต้นแบบสำหรับ การทดสอบแรงดันสูงความถี่สูง  
โดยใช้อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

A NEW PROTOTYPE FOR HIGH VOLTAGE HIGH FREQUENCY  
TESTING USING POWER ELECTRONIC DEVICE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาด้านหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-548-2

50\*

เครื่องต้นแบบสำหรับ การทดสอบแรงดันสูงความถี่สูง  
โดยใช้อุปกรณ์ อิเลคทรอนิกส์กำลัง

A NEW PROTOTYPE FOR HIGH VOLTAGE HIGH FREQUENCY  
TESTING USING POWER ELECTRONIC DEVICE



ศักดิ์ชัย ตรรัตน์พิจารณ์  
SAKCHAI TRERUTPICHARN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 42558  
วัน, เดือน, ปี 3 1 พ.ศ. 2545

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2544  
ISBN 974-648-548-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A NEW PROTOTYPE FOR HIGH VOLTAGE HIGH FREQUENCY  
TESTING USING POWER ELECTRONIC DEVICE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2001**

**ISBN 974-648-548-2**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2001**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องต้นแบบสำหรับการทดสอบแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

A NEW PROTOTYPE FOR HIGH VOLTAGE HIGH FREQUENCY TESTING USING POWER ELECTRONIC DEVICE

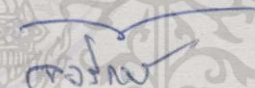
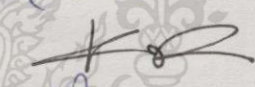
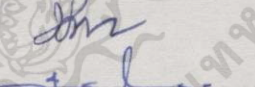
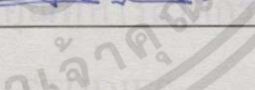

ชื่อนักศึกษา นายศักดิ์ชัย ศรีรัตนพิจารณ์

รหัสประจำตัว 40061050

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.นิทัศน์	กฤษณจินดา	
ผศ.จงรักษ์	บุญเส็ง	
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	นิตร์อุทัย	
ผศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	
รศ.ศิริวัฒน์	โทธิเวชกุล	

วัน/เดือนปี ที่สอบ 18 ธันวาคม 2544 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)



คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... 4 .....เดือน..... ธันวาคม..... พ.ศ..... 2545

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องต้นแบบสำหรับ การทดสอบแรงดันสูงความถี่สูง
	โดยใช้อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
นักศึกษา	นายศักดิ์ชัย ศรีรัตนพิจารณ์
รหัสประจำตัว	40061050
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

### บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ นำเสนอหลักการใหม่ เพื่อใช้ในการพัฒนาการทดสอบความบกพร่องของ ฉนวน โดยชี้แหล่งจ่ายสวิตซ์ความถี่สูง แรงดันสูง เป็นการออกแบบ และสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อ อนาคตอาจจะมาทดแทนหม้อแปลงเตสตา ซึ่งใช้หลักการของ แอลซี เรโซแนนซ์ มีข้อจำกัดของ ขนาดที่ใหญ่ น้ำหนักมาก มีการหน่วงของสัญญาณ ทำให้แรงดันไม่คงที่ และควบคุมยาก แหล่งจ่าย ความถี่สูง แรงดันสูงที่นำเสนอนี้ เทคนิคที่นำเสนอให้ประโยชน์บางอย่างที่ดีกว่าเดิม ซึ่งเครื่องต้น แบบนี้ ประกอบด้วยส่วนการแปลงไฟกระแสสลับ เป็นกระแสตรงโดยใช้ วงจรเรกติไฟด์ กับร่วม วงจรกรองแอลซี และ ส่วนการแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับความถี่สูง โดยใช้วงจร ฟูลบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้อุปกรณ์ MOSFETเป็นตัวสวิตซ์ แล้วไปผ่านหม้อแปลงความถี่สูง แหล่งจ่าย ความถี่สูง นี้จะสามารถสร้าง สัญญาณความถี่ระหว่าง 150 กิโลเฮิรต์ -200 กิโลเฮิรต์ 3 กิโลโวลต์ 2 กิโลวัตต์ ซึ่งการใช้ความถี่ได้สูงก็น่าจะเป็นการลดระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบได้ ทำให้ปลอดภัยแก่ผู้ใช้งาน

<b>Thesis Title</b>	A new prototype for high voltage high frequency testing using power electronic device
<b>Student</b>	Mr.Sakchai Trerutpicharn
<b>Student ID</b>	40061050
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2001
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul

### ABSTRACT

This thesis presents a new principle for developing defective insulation testing, using a high frequency, high voltage switching source. The design and construction of the prototype has been made such that in the future it may replace the conventional tesla transformer method based on L-C resonance which has some limitations such as large size, heavy weight, damping signal, unstable voltage and control difficulties. The proposed technique offers some advantages over the conventional one. The prototype consists of a AC/DC rectifier with a L-C low pass filter, a high frequency DC/AC full bridge MOSFET inverter, and a high Frequency Transformer. The proposed high frequency source is capable of generating high frequency source between 150 kHz-200 kHz, 3kV 2kW. Using high frequency may reduce high voltage level for defective insulator testing. By this way, the safety factor may be reached.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ท่านรองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล ซึ่งเป็นผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร กิณเรศ ผู้วิจัยรัฐศึกษาซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณแสนศักดิ์ ดีอ่อน, คุณวสันต์ อุ้ยยา โสม, คุณพงษ์เทพ เกิดดอนแฝก, คุณจักรพงษ์ จารุมิศรี, คุณเปรมศักดิ์ ปรีชา, ศิริโรตม์ เกตุแก้ว, คุณนภสร กุศล รวมทั้งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ช่วยเหลือด้านเครื่องมือทดสอบที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดีตลอดจนทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์บางประการแก่ผู้เขียน ซึ่งถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้แล้ว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเช่นนี้

กราบขอบพระคุณ คุณพ่อเดวี ศรีรัตนพิจารณ์ คุณแม่นันทมัย พलगม น้องชาย และ เพื่อนๆ ที่คอยให้การสนับสนุน กำลังใจ ตั้งแต่เริ่มต้น จนสำเร็จสมความตั้งใจ

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศักดิ์ชัย ศรีรัตนพิจารณ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญภาพ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไป.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 สนามไฟฟ้า.....	4
2.2.1 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า(Dielectric Strength).....	4
2.2.2 อีเลคโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	5
2.2.3 อีเลคโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	6
2.3 การทดสอบแรงดันสูง.....	8
2.4 ผลของความถี่.....	9
2.5 ความถี่ของผิว หรือความถี่การแผ่กระจาย.....	9
2.6 การใช้ประโยชน์ของแรงดันสูง ความถี่สูง.....	10
2.7 ไดอิเล็กตริกแข็งและการเบรคดาวน์ในไดอิเล็กตริกแข็ง.....	12
2.7.1 ความต้านทานไดอิเล็กตริก.....	12
2.7.2 เพอร์มิตติวิตี (permittivity).....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.3 แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก.....	13
2.7.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก.....	13
2.8 จำนวนของแข็ง.....	14
2.8.1 กระดาษ.....	14
2.8.2 แก้ว.....	15
2.8.3 เซรามิกส์.....	15
2.8.4 ไมก้า.....	17
2.8.5 ยาง.....	17
2.8.6 พลาสติก.....	18
2.8.7 โพลีเอทีลีน.....	19
2.8.8 โพลีเอสเตอร์.....	19
2.8.9 โพลิสทีรีน.....	19
2.8.10 โพลีวินิลคลอไรด์.....	20
2.8.11 ไนลอน.....	20
2.8.12 ฟลูออโรคาร์บอนพลาสติก.....	20
2.8.13 อีพ็อกซี-เรซิน.....	21
2.9 กลไกการเบรคความชื้นของฉนวนแข็ง.....	21
2.9.1 การเบรคความชื้นเนื่องจากผลเคมีและเคมีไฟฟ้า.....	21
2.9.2 การเบรคความชื้นเนื่องจากคิสซาร์จภายใน.....	24
2.9.3 การเบรคความชื้นแบบเทอร์มัล.....	25
2.10 หม้อแปลงความถี่สูง.....	26
2.11 ลักษณะของเนื้อสารที่ทำแกนเฟอร์ไรต์.....	27
2.11.1 เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส.....	27
2.11.2 ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์.....	28
2.11.3 การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนหม้อแปลง.....	28
2.11.4 การเลือกเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม.....	29
2.11.5 ช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรต์.....	29

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขดลวดไพรมารีและเซคันดารีของหม้อแปลง.....	30
2.13 การพันขดลวดทองแดงและการกำหนดขนาดของขดลวด.....	30
2.13.1 ผลจากการเรียงซ้อนกันของขดลวด.....	30
2.13.2 การพันขดลวดโดยใช้ขดลวดทองแดงขนานกัน.....	32
2.13.3 เทคนิคการพันขดลวดทองแดงสำหรับหม้อแปลง.....	32
2.14 การเลือกความหนาแน่น ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสม.....	33
2.15 การคำนวณหม้อแปลงไฟฟ้า.....	34
2.15.1 การหาขนาดของฉนวน.....	35
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องต้นแบบ.....	36
3.1 บทนำ.....	36
3.2 ภาครกติไฟล์ และฟิวเตอร์.....	36
3.3 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์.....	37
3.4 การออกแบบวงจรสับเบอร์.....	38
3.5 การออกแบบภาคควบคุม.....	39
3.6 วงจรขับมอเตอร์.....	39
3.7 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง.....	41
3.8 การสร้างหม้อแปลงความถี่สูง.....	43
บทที่ 4 การทดสอบคอนเวอร์เตอร์.....	45
4.1 บทนำ.....	45
4.2 การทดลองที่ 1 การทดสอบภาคควบคุม.....	60
4.2.1 วัตถุประสงค์.....	45
4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	45
4.2.3 ผลการทดสอบ.....	45
4.2.4 สรุปผลการทดสอบ.....	50
4.3 การทดลองที่ 2 การทดสอบการทดลองชุดอินเวอร์เตอร์.....	50

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 วัตถุประสงค์.....	50
4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	50
4.3.3 ผลการทดสอบ.....	51
4.3.4 สรุปผลการทดสอบ.....	88
<b>บทที่ 5 การทดสอบหม้อแปลง.....</b>	<b>89</b>
5.1 บทนำ.....	89
5.2 การทดสอบหม้อแปลงโดยใช้แหล่งจ่ายสวิตซ์.....	90
5.2.1 วัตถุประสงค์.....	90
5.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	90
5.2.3 ผลการทดสอบ.....	90
5.2.4 สรุปผลการทดสอบ.....	96
5.3 การทดสอบเบรคดาวน์ที่ความถี่สูง.....	96
5.3.1 วัตถุประสงค์.....	96
5.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	96
5.3.3 ผลการทดสอบ.....	97
5.3.4 สรุปผลการทดสอบ.....	98
<b>บทที่ 6 การประยุกต์นำเครื่องต้นแบบไปใช้งาน.....</b>	<b>99</b>
6.1 บทนำ.....	99
6.1.1 แบบจำลองหม้อแปลง.....	99
6.2 เงื่อนไขในการเกิดการสูญเสีย.....	100
6.3 คุณสมบัติของการสูญเสียที่อุณหภูมิสูง.....	101
6.4 แหล่งกำเนิดค่าการสูญเสียแบบสเตรลอส.....	102
6.5 การทดสอบหาค่าสูญเสียที่แกนเหล็กและขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง.....	103
6.5.1 วัตถุประสงค์.....	103
6.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	104
6.5.3 ผลการทดสอบ.....	105

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.5.4 สรุปผลการทดสอบ.....	105
6.6 วัตถุประสงค์ของหม้อแปลงความถี่สูง case A และ case B โดยการปรับความถี่.....	105
6.6.1 วัตถุประสงค์.....	105
6.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	106
6.6.3 ผลการทดสอบ.....	107
6.6.4 สรุปผลการทดสอบ.....	111
6.7 วัตถุประสงค์ของหม้อแปลงความถี่สูง Case A และ Case B โดยการปรับแรงดัน.....	111
6.7.1 วัตถุประสงค์.....	111
6.7.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	111
6.7.3 ผลการทดสอบ.....	112
6.7.4 สรุปผลการทดสอบ.....	117
6.8 ตัวอย่างการคำนวณการเพิ่มของอุณหภูมิ ของหม้อแปลง CASE A.....	117
บทที่ 7 สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	119
7.1 การทดสอบคอนเวอร์เตอร์.....	119
7.2 การทดสอบหม้อแปลง.....	119
7.3 การประยุกต์ใช้งาน.....	120
7.4 ข้อสรุปและวิจารณ์.....	121
7.5 ข้อเสนอแนะ.....	121
7.6 การพัฒนาโครงการต่อไป.....	122
เอกสารอ้างอิง.....	123
ผนวก ก เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ.....	125
ผนวก ข ตารางการทดสอบวัตถุประสงค์หม้อแปลงทดสอบ.....	132
ผนวก ค เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	147
ผนวก ง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	177
ประวัติผู้เขียน.....	196

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าเปอร์มิตติวิตซ์ของกระดาษชุบน้ำมันที่ 20 องศา.....	15
2.2 เซรามิกส์แสดงค่าเปอร์มิตติวิตซ์ต่ำ.....	16
2.3 เซรามิกส์แสดงค่าเปอร์มิตติวิตซ์สูง.....	16
2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของ Muscorite และ phlogopite.....	17
2.5 คุณสมบัติและการใช้ประโยชน์ของยาง.....	18
2.6 คุณสมบัติของฟลูออโรคาร์บอนพลาสติก.....	21
4.1 ผลการทดลองความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด.....	64
4.2 ผลการทดลองความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด.....	65
4.3 ผลการทดลองความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด.....	66
4.4 ผลการทดลองความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด.....	67
4.5 ผลการทดลองความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด.....	68
4.6 ผลการทดลองความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด.....	69
4.7 ผลการทดลองความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด.....	70
4.8 ผลการทดลองความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด.....	71
4.9 ผลการทดลองความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด.....	72
4.10 ผลการทดลองความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด.....	73
4.11 ผลการทดลองความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด.....	74
4.12 ผลการทดลองความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด.....	75
5.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงโดยใช้ คอนเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ 200 kHz.....	90
5.2 ผลการทดสอบหม้อแปลงโดยใช้ คอนเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ 150 kHz.....	95
5.3 ผลการทดลองแบบวาวไฟ.....	97
6.1 ค่าวัสดุชนิดต่างๆที่ใช้ในหม้อแปลง.....	100
6.2 บันทึกผลการทดลองโดยการปรับความถี่ ณ เวลาทดสอบ.....	110
6.3 บันทึกผลการทดลอง โดยการปรับแรงดัน ณ เวลาที่ทดสอบ.....	116
ข-1 ผลการทดลอง case A ที่ความถี่ 160 kHz และแรงดันอินพุท 200V.....	133
ข-2 ผลการทดลอง case A ที่ความถี่ 180 kHz และแรงดันอินพุท 200V.....	134
ข-3 ผลการทดลอง case A ที่ความถี่ 200 kHz และแรงดันอินพุท 200V.....	135

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-4 ผลการทดลอง case A ที่ความถี่ 200 kHz และแรงดันอินพุท 160V.....	136
ข-5 ผลการทดลอง case A ที่ความถี่ 200 kHz และแรงดันอินพุท 120V.....	137
ข-6 ผลการทดลอง case A ที่ความถี่ 200 kHz และแรงดันอินพุท 80V.....	138
ข-7 ผลการทดลอง case A ที่ความถี่ 200 kHz และแรงดันอินพุท 40V.....	139
ข-8 ผลการทดลอง case B ที่ความถี่ 160 kHz และแรงดันอินพุท 200V.....	140
ข-9 ผลการทดลอง case B ที่ความถี่ 180 kHz และแรงดันอินพุท 200V.....	141
ข-10 ผลการทดลอง case B ที่ความถี่ 200 kHz และแรงดันอินพุท 200V.....	142
ข-11 ผลการทดลอง case B ที่ความถี่ 200 kHz และแรงดันอินพุท 160V.....	143
ข-12 ผลการทดลอง case B ที่ความถี่ 200 kHz และแรงดันอินพุท 120V.....	144
ข-13 ผลการทดลอง case B ที่ความถี่ 200 kHz และแรงดันอินพุท 80V.....	155
ข-14 ผลการทดลอง case B ที่ความถี่ 200 kHz และแรงดันอินพุท 40V.....	146

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 หลักการของเครื่องต้นแบบ.....	3
2.1 อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน.....	5
2.2 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า.....	6
2.3 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ.....	7
2.4 การกระจายของความหนาแน่นกระแสที่รอบเส้นตัวนำ.....	10
2.5 (a) วงจรหม้อแปลงเตสลา (b) รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงเตสลา.....	11
2.6 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า $E_b$ แปรไปตามช่วงเวลาที่ย้อนแรงดัน.....	22
2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออายุการใช้งานทางกลของฉนวนกระดาษ.....	23
2.8 ลักษณะที่สมบูรณ์ของเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแกนเฟอร์ไรท์.....	27
2.9 การกำหนดช่วงอากาศ $I_2$ ที่แกนกลางและค้นช่วงอากาศ $I_1$ ระหว่างคู่ประกบแกนเฟอร์ไรท์.....	29
2.10 ความสัมพันธ์พื้นฐานหม้อแปลง.....	30
2.11 การเกิดกระแสไหลวนภายในขดลวดทองแดงเมื่อกระแสสลับไหลผ่าน.....	30
2.12 การเกิดฟลักซ์รั่วภายในหม้อแปลงสวิตซ์.....	31
2.13 ฟลักซ์รั่วและความหนาแน่นฟลักซ์ที่ตำแหน่งต่างๆ.....	31
2.14 ผลของขดลวดทองแดงที่วางในฟลักซ์รั่วทำให้เกิดกระแสไหลวนเกิดขึ้น.....	31
2.15 การพันขดลวดโดยใช้ทองแดงขนานกัน.....	32
2.16 การกำหนดจำนวนชั้นในพอร์ชัน.....	32
2.17 การลดค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดของขดลวดในหนึ่งพอร์ชันลงโดยพันแบ่งครึ่งขดปฐมภูมิ.....	32
2.18 การลดค่าความหนาแน่นสูงสุดของฟลักซ์รั่วได้โดยการลดจำนวนชั้นขดลวดในหนึ่งพอร์ชันลงโดยพันครึ่งขดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ.....	33
2.19 ลักษณะของพอร์ชัน ที่มีจำนวนชั้นเท่ากับครึ่งชั้น.....	33
3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานเครื่องต้นแบบ.....	36
3.2 วงจรขับมอสเฟต.....	40
3.3 ขนาดของแกนเฟอร์ไรท์แบบ UU79.....	43
3.4 ขนาดบ็อบบิ้นที่ใช้พันลวดหม้อแปลง.....	44

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 การพันหม้อแปลงความถี่สูง.....	44
4.1 ส่วนประกอบ eworkงานเครื่องแปลงผันความถี่สูง.....	45
4.2 สัญญาณสร้าง PWM ที่ขา 5 และขา 6ของTL494.....	46
4.3 สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 9 และ ขา 10 ของ TL494.....	46
4.4 สัญญาณเอาต์พุต ของ OPTO ISOLATE HIIL2.....	46
4.5 สัญญาณเอาต์พุต CMOS CD4050.....	47
4.6 สัญญาณเอาต์พุต PUSH PULL TRANSISTOR.....	47
4.7 สัญญาณจากชุดขับเกทขณะไม่ต่อ มอสเฟตที่ความถี่ 150 kHz.....	47
4.8 สัญญาณจากชุดขับเกทขณะไม่ต่อ มอสเฟตที่ความถี่ 170 kHz.....	48
4.9 สัญญาณจากชุดขับเกทขณะไม่ต่อ มอสเฟตที่ความถี่ 200 kHz.....	48
4.10 สัญญาณจากชุดขับเกทขณะต่อ มอสเฟตที่ความถี่ 150 kHz.....	48
4.11 สัญญาณจากชุดขับเกทขณะต่อ มอสเฟตที่ความถี่ 170 kHz.....	49
4.12 สัญญาณจากชุดขับเกทขณะต่อ มอสเฟตที่ความถี่ 200 kHz.....	49
4.13 สัญญาณแรงดัน $V_{DS}$ .....	49
4.14 วงจรคอนเวอร์เตอร์.....	50
4.15 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด.....	51
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V <sub>ac</sub>	
4.16 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด.....	51
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V <sub>ac</sub>	
4.17 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด.....	52
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220 V <sub>ac</sub>	
4.18 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด.....	52
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V <sub>ac</sub>	
4.19 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด.....	52
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V <sub>ac</sub>	
4.20 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด.....	53
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220V <sub>ac</sub>	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด.....	53
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V <sub>ac</sub>	
4.22 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด.....	53
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V <sub>ac</sub>	
4.23 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด.....	54
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220V <sub>ac</sub>	
4.24 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด.....	54
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V <sub>ac</sub>	
4.25 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด.....	54
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V <sub>ac</sub>	
4.26 ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด.....	55
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220V <sub>ac</sub>	
4.27 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5หลอด.....	55
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V <sub>ac</sub>	
4.28 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5หลอด.....	55
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V <sub>ac</sub>	
4.29 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5หลอด.....	56
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220V <sub>ac</sub>	
4.30 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด.....	56
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V <sub>ac</sub>	
4.31 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด.....	56
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V <sub>ac</sub>	
4.32 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด.....	57
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220V <sub>ac</sub>	
4.33 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด.....	57
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V <sub>ac</sub>	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด.....	57
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V <sub>ac</sub>	
4.35 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด.....	58
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220V <sub>ac</sub>	
4.36 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด.....	58
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V <sub>ac</sub>	
4.37 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด.....	58
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V <sub>ac</sub>	
4.38 ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด.....	59
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220V <sub>ac</sub>	
4.39 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5หลอด.....	59
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V <sub>ac</sub>	
4.40 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5หลอด.....	59
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V <sub>ac</sub>	
4.41 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด.....	60
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220V <sub>ac</sub>	
4.42 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด.....	60
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V <sub>ac</sub>	
4.43 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด.....	60
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V <sub>ac</sub>	
4.44 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด.....	61
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220V <sub>ac</sub>	
4.45 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด.....	61
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V <sub>ac</sub>	
4.46 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด.....	61
สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V <sub>ac</sub>	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด.....	62
สัญญาณแรงดันเอาต์พุท ที่แรงดันอินพุท 220V <sub>ac</sub>	
4.48 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด.....	62
สัญญาณแรงดันเอาต์พุท ที่แรงดันอินพุท 60 V <sub>ac</sub>	
4.49 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด.....	62
สัญญาณแรงดันเอาต์พุท ที่แรงดันอินพุท 140 V <sub>ac</sub>	
4.50 ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด.....	63
สัญญาณแรงดันเอาต์พุท ที่แรงดันอินพุท 220V <sub>ac</sub>	
4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz.....	76
ภาวะโหลดหลอดไฟ 100 W 5หลอด	
4.52 5ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz.....	76
ภาวะโหลดหลอดไฟ 100 W 5หลอด	
4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz.....	77
ภาวะโหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด	
4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz.....	77
ภาวะโหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด	
4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz.....	78
ภาวะโหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด	
4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz.....	78
ภาวะโหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด	
4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz.....	79
ภาวะโหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด	
4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz.....	79
ภาวะโหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด	
4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz.....	80
ภาวะโหลดหลอดไฟ 100 W 5หลอด	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz.....	80
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 5หลอด	
4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz.....	81
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด	
4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz.....	81
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด	
4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz.....	82
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด	
4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz.....	82
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด	
4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz.....	83
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด	
4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz.....	83
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด	
4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz.....	84
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 5หลอด	
4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz.....	84
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 5หลอด	
4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 200kHz.....	85
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด	
4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz.....	85
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 10หลอด	
4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz.....	86
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด	
4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz.....	86
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 15หลอด	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz.....	87
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด	
4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz.....	87
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 20หลอด	
5.1 หลักการทำงานของระบบที่นำเสนอ.....	89
5.2 วงจรทดสอบเบรคความถี่สูง.....	90
5.3 สัญญาณอินพุตคร่อมหม้อแปลง 19 V.....	91
5.4 สัญญาณเอาต์พุตคร่อมหม้อแปลง 190 V.....	91
5.5 สัญญาณอินพุตคร่อมหม้อแปลง 50 V.....	92
5.6 สัญญาณเอาต์พุตคร่อมหม้อแปลง 500 V.....	92
5.7 สัญญาณอินพุตคร่อมหม้อแปลง 101.5 V.....	92
5.8 สัญญาณเอาต์พุตคร่อมหม้อแปลง 1015 V.....	93
5.9 สัญญาณอินพุตคร่อมหม้อแปลง 149 V.....	93
5.10 สัญญาณเอาต์พุตคร่อมหม้อแปลง 1490 V.....	93
5.11 สัญญาณอินพุตคร่อมหม้อแปลง 190 V.....	94
5.12 สัญญาณเอาต์พุตคร่อมหม้อแปลง 1900 V.....	94
5.13 สัญญาณเอาต์พุตคร่อมหม้อแปลง 2500 V.....	94
5.14 สัญญาณเอาต์พุตคร่อมหม้อแปลง 3000 V.....	95
5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ที่ความถี่ 200 kHz.....	96
5.16 วงจรทดสอบเบรคความถี่สูง.....	97
5.17 ขณะทำการเกิดเบรคความถี่.....	97
6.1 แบบและโครงสร้างของหม้อแปลง.....	99
6.2 การสูญเสียในหม้อแปลงแบบต่างๆ.....	100
6.3 การเพิ่มขึ้นของค่าการสูญเสียจนถึงช่วงที่เกิดความร้อนสูงสุด.....	100
6.4 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะสังเกตได้ที่จุดที่เกิดความร้อนสูงสุด.....	101
6.5 รูปฉนวนชนิด F จะสังเกตได้จากเสถียรภาพของความร้อน.....	101
6.6 ค่าการสูญเสียแบบสเตอริโอสที่ขึ้นอยู่กับค่าความถี่.....	102

## สารบัญรูป(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.7 ค่าการสูญเสียแบบสเตอริโอสที่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน.....	102
6.8 วงจรทดลองหาค่าการสูญเสียที่แกนเหล็กและ ที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง.....	104
6.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ CORE LOSS ที่ความถี่ 150 kHz.....	105
6.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ CORE LOSS ที่ความถี่ 200 kHz.....	105
6.11 วงจรทดลอง การวัดอุณหภูมิหม้อแปลงความถี่สูง.....	106
<b>CaseA และ CaseB โดยการปรับความถี่</b>	
6.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A ..... ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 200kHz	107
6.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B..... ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 200 kHz	107
6.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A ..... ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 180 kHz	107
6.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B..... ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 180kHz	108
6.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A..... ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 160 kHz	108
6.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B ..... ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 160 kHz	108
6.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A..... ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ตั้งแต่ 160kHz-200kHz	109
6.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B ..... ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ตั้งแต่ 160kHz-200kHz	109
6.20 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของหม้อแปลง case A และ case B ที่แรงดัน 200V และ ..... ความถี่ 200 kHz	109
6.21 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดจริง และคำนวณ ของฉนวน case A โดยปรับความถี่.....	110
6.22 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดจริง และคำนวณ ของฉนวน case A โดยปรับความถี่.....	110

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.23 วงจรทดลอง การวัดอุณหภูมิหมีอแปลงความถี่สูง.....	111
CaseA และ CaseB โดยการปรับแรงดัน	
6.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case A.....	112
ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุท 200V	
6.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case B.....	112
ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุท 200V	
6.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case A.....	113
ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุท 160V	
6.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case B.....	113
ที่ความถี่ 200kHz แรงดันอินพุท 160V	
6.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case A.....	113
ที่ความถี่ 200kHz แรงดันอินพุท 120V	
6.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case B.....	114
ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุท 120V	
6.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case A.....	114
ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุท 80V	
6.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case B.....	114
ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุท 80V	
6.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case A.....	115
ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุท 40V	
6.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case B .....	115
ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุท 40V	
6.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case A.....	115
ที่ความถี่ 200k Hz แรงดันอินพุทตั้งแต่ 40V-200V	
6.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหมีอแปลง case B .....	116
ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุทตั้งแต่ 40V-200V	
6.36 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดจริง และคำนวณ ของจนวน case A โดยปรับแรงดัน.....	116

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.37 กราฟเปรียบเทียบอนุกรมที่วัดจริง และคำนวณ ของฉนวน case A โดยปรับแรงดัน.....	117
ก-1 .ชุดอินเวอร์เตอร์ที่จัดสร้าง.....	126
ก-2 หม้อแปลงความถี่สูงที่จัดสร้าง.....	126
ก-3 สารฉนวน Epoxy Resin และ Sillicone Resin.....	127
ก-4 การฉนวน Epoxy Resin โดยหล่อทับชุด Primary.....	127
ก-5 การพันขดลวดทางด้าน Secondary.....	128
ก-6 หม้อแปลง case A ที่สมบูรณ์.....	128
ก-7 หม้อแปลง case B ที่สมบูรณ์.....	129
ก-8 หม้อแปลงcase A และ case B.....	129
ก-9 Analyzing Recorder และ Oscilloscope.....	130
ก-10 การทดลองหาการสูญเสียของหม้อแปลง.....	130
ก-11 การเซตเครื่องมือต่างๆ.....	131

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมาไปยังโหนดที่ใช้งานต้องใช้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยระบบสายส่ง และส่วนประกอบที่สำคัญสิ่งหนึ่งที่เป็นในระบบสายส่งก็คือ ลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้า จะเป็นอุปกรณ์ที่ฉนวนระหว่างสายส่งกับเสาไฟฟ้า ดังนั้นในการนำลูกถ้วยฉนวนมาใช้งานได้จะต้องผ่านการทดสอบแบบหนึ่ง ที่เรียกว่า Routine test เพื่อรับรองว่าลูกถ้วย สามารถใช้งานได้จริง โดยการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบวาวไฟตามผิวของลูกถ้วย เพื่อดูความบกพร่องของลูกถ้วยฉนวน ว่าเหมาะที่จะนำไปใช้งานต่อไปหรือไม่

ซึ่งการทดสอบวาวไฟตามผิวนั้นปัจจุบันต้องใช้แหล่งจ่ายที่สามารถผลิตแรงดันสูง ความถี่สูงได้ ใช้แหล่งจ่ายที่เรียกว่าหม้อแปลง เทสตา (Tesla Transformer) ซึ่งสามารถผลิตความถี่สูงได้จากหลักการ แอลซี เรโซแนนซ์ (LC Resonant) และการผลิตแรงดันสูงได้จากการใช้หม้อแปลงแกนอากาศยกระดับแรงดัน

ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้หลักการแอลซี เรโซแนนซ์ (LC Resonant) ในการผลิตความถี่สูง ในการเลือกใช้ ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) จะต้องใช้ ตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ และการปรับการควบคุมความถี่ค่อนข้างยากเพราะจะทำให้การปรับจากรอบของตัวเหนี่ยวนำ รวมทั้งในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ที่สามารถรับแรงดันสูงได้ทำให้ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ ส่วนการผลิตแรงดันสูงโดยใช้หม้อแปลงแกนอากาศที่สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง ทำให้ขนาดของหม้อแปลงมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก การเคลื่อนย้ายลำบากอีกทั้งในด้านการติดตั้งต้องใช้พื้นที่มาก และรูปสัญญาณที่เกิดจากการวาวไฟตามผิวที่ได้จะมีการหน่วงของสัญญาณทำให้การวาวไฟตามผิวไม่ต่อเนื่อง และราคาอุปกรณ์ทั้งหมดค่อนข้างแพง

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

จุดมุ่งหมายของการทำวิทยานิพนธ์ นี้เพื่อจัดสร้างเครื่องต้นแบบขึ้นมาใหม่ โดยใช้หลักการของวงจรเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อสร้างความถี่สูง และใช้หม้อแปลงแกน เฟอร์ไรท์ยกระดับให้ได้แรงดันสูง และนำไปทดสอบทางด้านความถี่สูง และแรงดันสูง โดยมีวัตถุประสงค์หลักดังนี้

- 1) เพื่อศึกษาถึงการทำงานของเครื่องต้นแบบที่ได้จัดสร้างขึ้น
- 2) เพื่อศึกษาหลักการออกแบบของ หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์ ที่แรงดันสูง
- 3) เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าแรงสูง ว่า ณ.ที่ความถี่ที่สูงขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

- 4) เพื่อนำไปประยุกต์ในการทดสอบแรงดันสูง ความถี่สูง โดยในวิทยานิพนธ์ นี้ได้นำไปทดสอบฉนวนของหม้อแปลง
- 5) เป็นแนวทางที่จะพัฒนาต่อเพื่อทดแทนหม้อแปลงเทศบาลได้

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- 1) คอนเวอร์เตอร์ที่จัดสร้าง สามารถที่จะปรับแรงดัน และความถี่ได้ตามที่ต้องการ คือแรงดัน 0-300 V และ ความถี่ 150-200 kHz
- 2) หม้อแปลงที่นำมาต่อเข้ากับคอนเวอร์เตอร์สามารถที่จะยกระดับแรงดันได้โดยที่จ่ายความถี่สูงเข้าไปที่หม้อแปลง
- 3) จากหลักการทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และพฤติกรรมของไฟฟ้าแรงสูง ณ.ที่ความถี่สูงขึ้น จะเกิดได้ง่ายขึ้น เช่นการเกิดเบรคดาวน์ การเกิดโคโรน่า โดย แรงดันที่ใช้ก็จะมีค่าน้อยลงกว่าที่ใช้ความถี่ต่ำ
- 4) การทดสอบฉนวนหม้อแปลงความถี่สูง และแรงดันสูง สามารถเลือก ฉนวนที่ดีได้ โดยสามารถดูจากค่ากำลังสูญเสีย และจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงความถี่

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในปัจจุบันการทดสอบ ลูกถ้วยฉนวน และโดยการทดสอบการวางไฟตามผิว ก็ยังใช้หลักการเดิมซึ่งยังไม่มีการพัฒนาในการที่จะหาหลักการใหม่มาทดแทน ในภาคอุตสาหกรรมใช้วงจรหม้อแปลงเทสลา (Tesla Transformer) ที่ขนาดใหญ่ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมากเคลื่อนย้ายลำบาก น้ำหนักมาก การปรับและควบคุมความถี่ลำบาก สัญญาณความถี่ที่เกิดมีการหน่วง

ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอหลักการใหม่ โดยเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น สามารถปรับความถี่ และทำให้สัญญาณขนาดแอมพลิจูดความถี่คงที่ได้ และจะทำให้หาความถี่ที่เหมาะสม สำหรับการทดสอบฉนวนแต่ละชนิดได้และทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของฉนวนดีขึ้น และสามารถลดระดับแรงดันของการทดสอบได้เมื่อ เปลี่ยนแปลงความถี่สูงขึ้นจะเป็นการการปลอดภัยสำหรับผู้ใช้งาน อีกทั้งในอนาคตอาจทำการทดสอบการวางไฟตามผิวที่ใช้สัญญาณการวางไฟตามผิวที่ไม่มีการหน่วงทำให้เวลาในการทดสอบฉนวนลดน้อยลง และขนาดของเครื่องต้นแบบก็มีขนาดเล็กลง ทำให้น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก สามารถใช้งานกับ พื้นที่จำกัดได้

### 1.5 ขอบเขตงานวิจัย

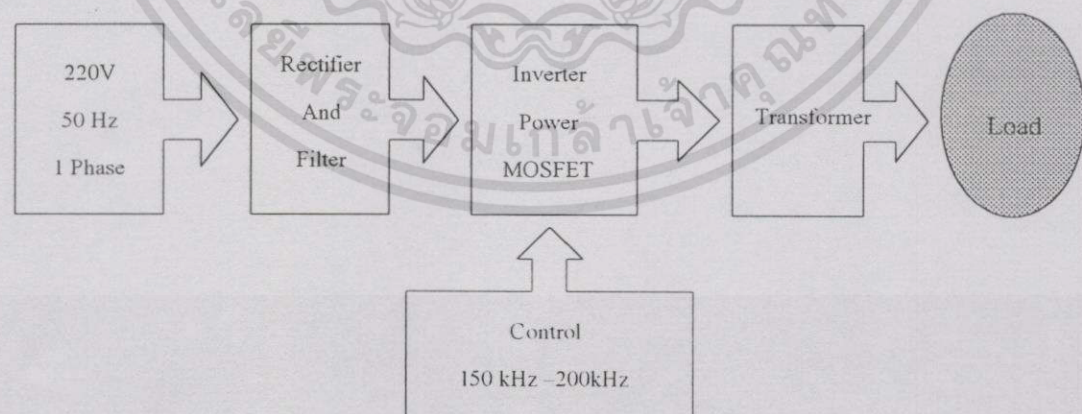
เป็นการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ( Power Electronic) มาใช้งานโดยการนำเอาอุปกรณ์ สวิตชิง เพาเวอร์มอสเฟต (Switching Power MOSFET) มาแทน เมื่อจ่ายไฟกระแสสลับ หนึ่งเฟส

220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ เข้าเครื่องก็จะแปลงไฟโดยผ่านชุดเรกติไฟต์ (Rectifier) แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งเฟส 310 โวลต์ เพื่อผ่านไปยังชุดสวิตชิง เพาเวอร์มอสเฟต (Switching Power MOSFET) แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ - 200 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการวางไฟ ตามคิว ซึ่งได้แรงดันสูงสุด 310 โวลต์ และผ่านไปยังหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อยกระดับแรงดันให้สูงขึ้น

วิทยานิพนธ์ นำเสนอ หลักการออกแบบและการทดสอบแต่ละส่วนวงจร และการทดสอบ หม้อแปลงความถี่สูง การทดสอบเบรคดาวน์ความถี่สูง และการทดสอบจนวนหม้อแปลงความถี่สูง แรงดันสูง

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1) ศึกษาทฤษฎี วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
- 2) ศึกษาทฤษฎี ของชุดคอนเวอร์เตอร์ ที่สร้างควมถี่สูง
- 3) ออกแบบและจัดสร้างชุด คอนเวอร์เตอร์ และทดสอบ
- 4) ศึกษาทฤษฎี ของหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์ เพื่อสร้างแรงดันสูง
- 5) ออกแบบ และจัดสร้างหม้อแปลง และทดสอบ
- 6) ทดสอบด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
- 7) ศึกษาเรื่องจนวน และสร้างหม้อแปลงทดสอบจนวน
- 8) บันทึกผลการทดสอบ
- 9) วิเคราะห์ และสรุปผลการทดสอบ



รูปที่ 1.1 หลักการของเครื่องต้นแบบ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีทั่วไป

### 2.1 บทนำ

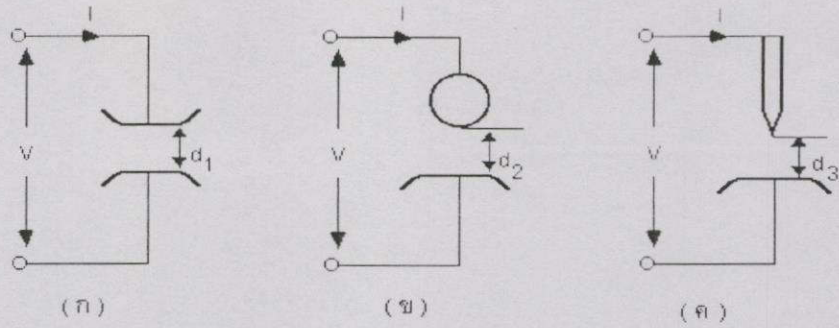
เนื่องจากในโครงการวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการค้นคว้าทดลอง เครื่องต้นแบบแรงดันไฟฟ้าแรงสูงความถี่สูง ซึ่งต้องอาศัยการอ้างอิงทฤษฎีในการออกแบบโครงสร้างชุดวัดแรงดันไฟฟ้าและวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในบทนี้จึงเป็นการอธิบายถึงทฤษฎีที่ใช้ในการอ้างอิงของโครงการวิจัยนี้โดยละเอียด เพื่อให้เข้าใจในวิทยานิพนธ์ได้สะดวกขึ้นจึงได้แบ่งหัวข้อทฤษฎีออกตามลำดับของการอ้างอิงผลตั้งแต่ลักษณะของสนามไฟฟ้า รูปร่างของอิเล็กโทรด การกระจายจันทึก๊าซ (gaseous) ขบวนการ ไอออไนเซชัน (ionization) การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ (electron emission from metallic surface) กลไกการเบรคดาวน์ (breakdown) ผลการเกิดเบรคดาวน์ในสภาวะต่างๆ

### 2.2 สนามไฟฟ้า

ก๊าซเป็นฉนวนอย่างหนึ่งทางไฟฟ้า ในกรณีแรงดันไฟฟ้าสูงๆ และที่มีวงจำกัดการเป็นฉนวนจะแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซ แรงดันไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าสภาพของฉนวนจะเริ่มเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างดี เมื่อเกิดการสปาร์คหรือวบไฟหรือมีการเบรคดาวน์ผ่านฉนวนในก๊าซหรือของเหลวหลังจากสภาพฉนวนเปลี่ยนเป็นสภาพนำไฟฟ้าและจะคงอยู่ถ้าแรงดันนั้นสูงพอ และจะกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนดั้งเดิม หลังจากการเบรคดาวน์หรือสปาร์คได้ผ่านพ้นไปแล้ว ซึ่งแตกต่างไปจากฉนวนที่เป็นของแข็งหลังจากการเกิดเบรคดาวน์แล้วสภาพการเป็นฉนวนจะเสียไปอย่างถาวร

#### 2.2.1 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)

ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดการเบรคดาวน์หรือทำให้การเป็นฉนวนเสื่อมสภาพมีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโทรดเป็นโวลต์ต่อเซนติเมตร ( V / cm ) หรือกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ( kV / cm ) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ ( Uniform Field ) ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_0$  ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ



รูปที่ 2.1 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน

( ก ) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ( Uniform Field )

( ข ) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ( Slightly Nonuniform Field )

( ค ) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง ( Highly Nonuniform Field )

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.1 จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ  $d_1$ ,  $d_2$  และ  $d_3$  เป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ มักจะกำหนดโดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่าง อิเล็กโตรดในขณะที่การเบรคดาวน์เริ่มเกิดขึ้นซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอีกหลายประการ

### 2.2.2 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่วงระหว่าง อิเล็กโตรดสม่ำเสมอเท่ากันตลอด เช่น อิเล็กโตรดในรูปที่ 2.1 ( ก ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E_{av} = \frac{V_b}{d} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $V_b$  : แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด หน่วย โวลท์ หรือกิโลโวลท์

$d$  : ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด หน่วย เซนติเมตร

$E_{av}$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด หน่วย โวลท์ต่อเซนติเมตรหรือ กิโลโวลท์ ต่อ เซนติเมตร

$E_{max}$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรคดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด ซึ่งจะเท่ากันทุกจุดถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแส

จะเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด โดยที่ค่ากระแสก่อนจะเกิดเบรคควาแน่นั้นจะวัดไม่ได้ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรคควาแน่นี้ก็คือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

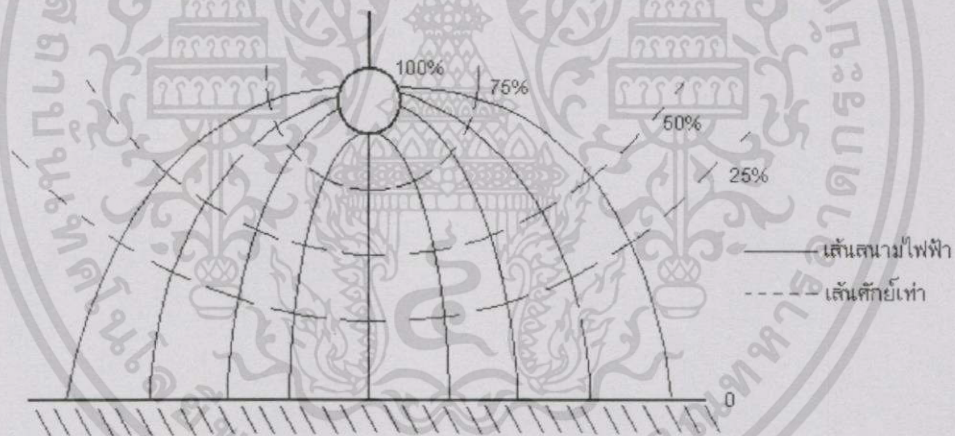
$$E_b = \frac{V_b}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $V_b$  : แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคควาแน่นด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$E_b$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคควาแน่น หรือความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

### 2.2.3 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดแบบที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุด จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นๆ ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย เช่น อิเล็กโตรดในรูปที่ 2.1 (ข) ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลมอาจคำนวณได้จาก

$$E_{\max} = \frac{V}{d \cdot \eta^*} \quad (2.3)$$

$\eta^*$  : แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ( Field Utilization Factor ) นิยามว่า  $\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}}$  ; ซึ่งโดย

ทั่วๆ ไปจะมีค่า  $\leq 1$  ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า  $\eta^*$  คือดัชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใดและโดยอาศัยแฟลคเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงสามารถคำนวณหาความเครียดเบรคดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้คือ

$$E_b = \frac{V_b}{d.17} \quad (2.4)$$

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะในกรณีทีอิล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา(Colona)หรือพรีดิสชาร์จ (Predischarge ) เกิดก่อนเบรคดาวน์ดังอิล็กโตรดในรูปที่ 2.1 ( ข ) กล่าวคือก่อนการเบรคดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิล็กโตรดเลยและลักษณะสนามไฟฟ้าวิกฤติ  $E_c$  จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงและจะเกิดเบรคดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดสูงถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิล็กโตรดลักษณะต่างๆ

ในกรณีที่อิล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิล็กโตรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเช่นปลายแหลมดังรูปที่ 2.1 (ค) ที่ระยะห่างออกจากผิว อิล็กโตรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.3 ซึ่งอิล็กโตรดแบบนี้แม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะยังไม่เกิดการเบรคดาวน์แต่จะเกิดโคโรนาพรีดิสชาร์จขึ้นในบริเวณผิวอิล็กโตรดคือบริเวณที่มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิล็กโตรดจะเกิดการดิสชาร์จ ( Discharge ) ที่ไม่สมบูรณ์ คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิล็กโตรดเรียกว่าการดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิล็กโตรดกระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเบรคดาวน์เรียกว่า กระแสโคโรนา ( Colona Circuit ) หรือกระแสพรีดิสชาร์จการเกิดโคโรนาเป็น

ผลทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไปเพราะมีประจุค้าง ( Space Charge ) แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคงคำนวณได้จากสมการ ( 2.3 ) แต่  $\eta^*$  จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรคดาวน์จะคำนวณจากสมการ ( 2.4 ) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการ ( 2.4 ) นี้เอาไว้ใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรน่าเริ่มเกิดได้เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{V_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $E_i$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิด

$V_i$  : แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนที่โคโรน่าเริ่มเกิด ( Corona Inception Voltage )

โดย  $E_i$  และ  $V_i$  เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรน่าเริ่มเกิดฉะนั้นจึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรดหรือกล่าวได้ว่าสมการที่ (2.5) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting Voltage , Threshold Voltage , Inception Voltage ) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโตรดอาจจะเป็นเบรคดาวน์ในกรณีทีอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและอาจจะเป็นแรงดันที่โคโรน่าเริ่มเกิดในกรณีที่เป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งค่าแรงดันเบรคดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไป

$$V_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.6)$$

เมื่อ  $V_i$  : แรงดันเริ่มต้น

$E_i$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น  $V_i$

### 2.3 การทดสอบแรงดันสูง

ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ดีจะต้องให้ผู้ใช้ไฟฟ้ามีความมั่นใจได้ว่าจะมีไฟใช้ตลอดเวลา และที่ระดับแรงดันคงที่ ฉะนั้นระบบส่งจ่ายจะต้องมีความเชื่อถือได้สูงมีเสถียรภาพมั่นคง มีระบบป้องกันการเกิดผิดปกติทำให้เกิดผลกระทบกระเทือนต่อระบบ วัสดุและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในระบบจะต้องไม่เป็นต้นเหตุทำให้เกิดการผิดพลาด เพื่อให้มั่นใจได้ว่าวัสดุและอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในบบมีสมบัติและคุณภาพดีตามที่ต้องการ ต้องมีการทดสอบตามสภาพการใช้งาน หรือมีโอกาสได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันเกินในขณะใช้งาน รวมทั้งทดสอบอายุการใช้งานด้วย โดยทั่วไปอาจแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ คือ

1 การทดสอบความทนทาน (endurance test) เป็นการทดสอบอายุการใช้งานของการฉนวนอุปกรณ์ ที่จะต้องรับความเครียดสนามไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ ขนาดแรงดันทดสอบเท่ากับแรงดันสูงสุดของระบบใช้งาน

2 การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (withstand voltage test) เป็นการทดสอบดูว่าวัสดุฉนวนหรือการฉนวนของอุปกรณ์ จะสามารถคงทนต่อแรงดันเกินได้หรือไม่

3 การทดสอบแบบแตกสลาย(disruptive test) เป็นการทดสอบดูความแตกสลายหรือเสียหายของฉนวนจากความเครียดสนามไฟฟ้า (electric field stress) รวมทั้งการหลุดตัวของแรงดันที่เกิดขึ้นกับฉนวนที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซในลักษณะวาบไปตามผิว สปาร์ก เจาะผ่านทะลุ ซึ่งจะทำให้ทราบได้ว่าวัสดุหรืออุปกรณ์นั้นสามารถทนได้สูงสุดเท่าใด

## 2.4 ผลของความถี่ (Frequency Effect)

ค่าความต้านทานของตัวนำมีผลกระทบ โดยค่าความถี่ของกระแสที่ไหลผ่านตัวมันเช่นตัวอย่างในการแยกกันไว้ของขดลวด ของหน้าตัดทรงกลม ค่าความเหนี่ยวนำของส่วนตรงกลางของตัวนำจะมีค่ามากกว่าบริเวณรอบ ๆ เพราะว่าผลรวมของฟลักซ์ที่คล้องผ่านในช่วงเวลาหนึ่งภายในเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก ค่าอิมพีแดนซ์ของส่วนตรงกลางจึงมีค่ามากกว่า ด้วยเหตุนี้ค่ากระแสที่ไหลผ่านบริเวณนี้จะมาก และใกล้ ๆ ผิวของตัวนำจะมีค่าอิมพีแดนซ์น้อยที่สุด ทำให้พื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ได้มีค่าน้อยกว่าพื้นที่จริง ๆ ด้วยเหตุนี้จึงมีผลกับค่าความต้านทานเป็นอย่างมาก ในกรณีนี้จะเรียกว่า "Skin Effect" ที่ความถี่สูง และสำหรับค่าในในตัวนำเล็ก ๆ ผลอันนี้สามารถตัดทิ้งและไม่นำมาพิจารณาได้ ในกรณีของตัวนำขนาดใหญ่ จะเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการพิจารณาค่าของ "Skin Effect" การแบ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อยเล็ก ๆ แบ่งแยกโดยระยะทางที่ใช้ พิจารณานำมาจากบางส่วนของทั้งหมด หรือโดยใช้ตัวนำกลวง หรือตัวนำที่เป็นแบบเรียบ ๆ อาจใช้เป็นแบบแผ่นหรือเป็นแถบยาว ๆ เพื่อช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้น

## 2.5 ความลึกของผิว หรือความลึกของการแผ่กระจาย

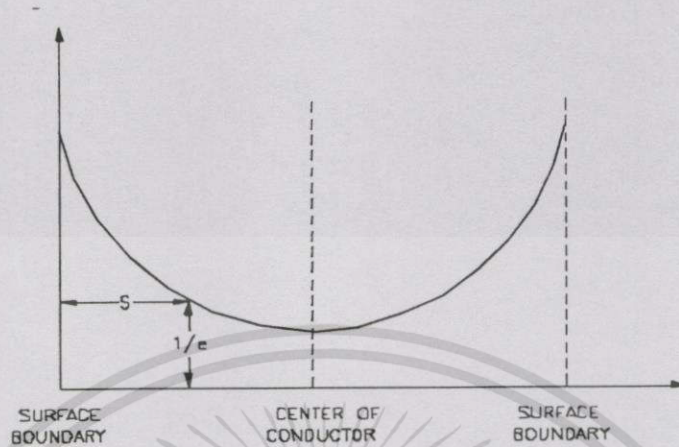
ระยะทางที่ต่ำกว่าพื้นผิวของตัวนำ ที่มีความหนาแน่นกระแสไหลสม่ำเสมอ และทำให้น้อยกว่าค่า  $1/e$  หรือ 36 % ของค่าพื้นที่ผิว ค่าความต้านทานของตัวนำประมาณว่ามีค่าหลายเท่าของความลึกของผิว ค่าความลึกของการแผ่กระจายสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\delta = 5033 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad \text{cm} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\rho$  มีหน่วยเป็น Ohm/cm

$f$  มีหน่วยเป็น Hz

ผลของ Skin Effect และความลึกของผิวของตัวนำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การกระจายของความหนาแน่นกระแสที่รอบเส้นตัวนำ

ผลที่ได้เป็นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการคำนวณค่าความลึกของการกระจายของไฟกระแสกลับ สำหรับความถี่ที่ต่างกัน วัสดุต่างชนิดกัน เพื่อเป็นตัวระบุขนาดของความหนาของตัวนำที่จะใช้ (ปกติความลึกของการแผ่กระจาย ควรมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความหนาแน่นของตัวนำ) ค่าความลึกของผิวก็เช่นกัน ใช้คำนวณผลกระทบหรือค่าความต้านทาน a.c. ของตัวนำ และสามารถแสดงได้ โดยสมการต่อไปนี้

สำหรับบริเวณรอบของเส้นลวดตัวนำ

$$R_{ao} = \left( \frac{8302\sqrt{f}}{d} \right) \times 10^{-9} \quad \Omega/cm \quad (2.8)$$

เมื่อ  $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง ในหน่วย cm

$f$  คือ ความถี่ ในหน่วย Hz

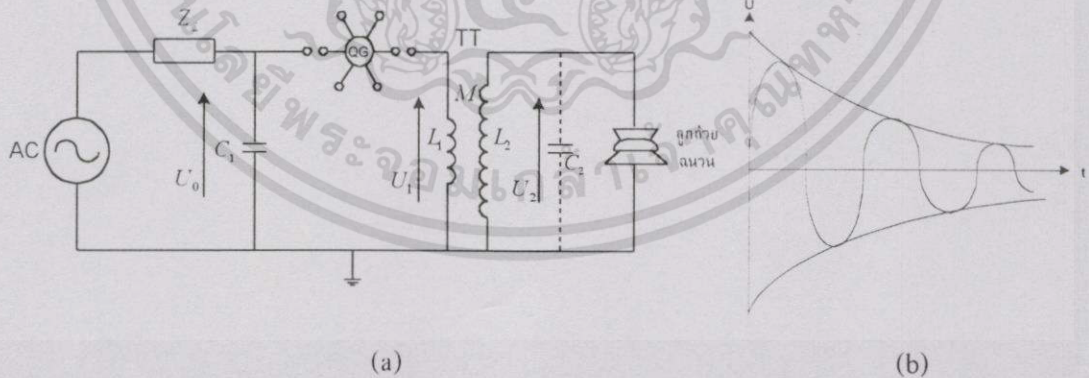
## 2.6 การใช้ประโยชน์ของแรงดันสูงความถี่สูง

โดยปกติแรงดันความถี่สูงมีใช้ในระบบสื่อสาร ฉะนั้นการทดสอบอุปกรณ์สื่อสารนั้นจึง ทดสอบด้วยความถี่สูงเหมือนเมื่อใช้งานปกติ แต่จะเป็นแรงดันต่ำ ทางสาขาไฟฟ้ากำลังนั้นมีที่ใช้น้อยในทางภาคปฏิบัติแรงดันสูงความถี่สูงนี้จะใช้ในการทดสอบลูกถ้วย ปลอกฉนวนนำสาย ใน โรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตลูกถ้วยต้องทำการทดสอบด้วยแรงดันความถี่สูงเป็นการทดสอบประจำ (Routine test) คือ ทำการทดสอบลูกถ้วยทุกลูก เพื่อทำการตรวจสอบความบกพร่องในเนื้อเซรามิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากมีความบกพร่องมากแรงดันความถี่สูงจะทำให้เกิดความร้อน ทำให้เกิดการผ่าทะลุฉนวนด้วย ไม่เกิดวาวไฟตามผิว ลักษณะเช่นนี้ถือว่าฉนวนด้วยบกพร่อง ถ้าเป็นฉนวนด้วยดีมีเนื้อเซรามิกที่ดีก็จะสังเกตเห็นประกายวาวไฟตามผิวภายนอก และโดยที่แรงดันทดสอบมีความถี่สูงจะช่วยให้สายตาคนเราสังเกตเห็นประกายวาวไฟตามผิวได้ง่าย ความถี่ที่ใช้กันอยู่ในช่วง 100-250 kHz

แรงดันความถี่สูงที่ใช้กันอยู่ในทางภาคปฏิบัตินั้นได้จากวงจรหม้อแปลงเทสลา (Tesla transformer) ซึ่งประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดป้อนแรงดันเข้าเป็นด้านแรงดันต่ำกว่าอีกด้านหนึ่งที่เป็นขดลวดจ่ายแรงดันออกเป็นขดลวดแรงสูง ขดลวดทั้งสองถ่ายทอดพลังงานทางสนามแม่เหล็กผ่านแกนอากาศ ซึ่งจะทำให้ความเหนี่ยวนำร่วม  $M$  (mutual inductance) มีค่าต่ำ ขดลวดทางด้านป้อนแรงดันเข้า  $L_1$  จะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทางด้านแรงสูงจะมีขดลวดแรงสูง ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำ  $L_2$  ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ  $C_2$  ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้ารวมของขดลวดแรงสูงของวัสดุทดสอบและของอุปกรณ์วัดแรงดันดังในรูปที่ 2.1(a) ตามรูปวงจร ตัวจ่ายกำลังอาจเป็นกระแสสลับ AC หรือกระแสตรง DC ก็ได้ ป้อนแรงดันประมาณ 20-30 kV ให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  ผ่าน  $Z_L$  ซึ่งทำหน้าที่จำกัดกระแสอัดประจุ (charging current) ให้แก่  $C_1$  เมื่ออัดประจุให้  $C_1$  จนได้แรงดัน  $U_0$  ตามที่ต้องการซึ่งจำกัดด้วยระยะห่างของช่องว่างดับสปาร์ก QG (Quenching Gap) เป็นตัวกำหนดแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดแรงดันต่ำ นอกจากนั้นแล้ว QG ยังทำหน้าที่ตัดอาร์คหรือสปาร์กด้วยเมื่อเกิดสปาร์กที่ QG พลังงานที่เก็บไว้ใน  $C_1$  ในรูปสนามไฟฟ้าก็จะถ่ายเทประจุให้กับขดลวด  $L_1$  และ  $L_1$  จะเก็บพลังงานไว้ในรูปแม่เหล็กเต็มที่แล้ว  $L_1$  ก็จะถ่ายทอดพลังงานกลับไปให้  $C_1$  ใหม่ ถ่ายทอดกลับไปกลับมา ระหว่าง  $C_1$  และ  $L_1$  จึงทำให้เกิดออสซิลเลชันความถี่สูงทางด้านแรงต่ำจะมีรูปคลื่นเป็นคลื่นหน่วง (damped train wave) ดังในรูปที่ 2.1(b)



รูปที่ 2.5 (a) วงจรหม้อแปลงเทสลาและ (b) รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงเทสลา

โดยที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิหรือ  $L_2$  พันรอบบนตัวโครงของวัสดุที่เป็นฉนวนทำจาก PVC ฉนวนระหว่างรอบจะใช้เป็นเอ็นซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับขดลวด ขดลวดทางด้านปฐมภูมิจะพันรอบบนแกนฉนวนที่ใช้เป็นโครงสร้างที่ทำมาจากพีวีซี แหล่งจ่ายไฟจะเป็นไฟกระแสตรงหรือ

กระแสกลับก็ได้  $C_1$  จะเป็นตัวเก็บประจุแบบน้ำมันหรืออากาศ  $C_2$  ปกติเป็นค่า Stray Capacitance ภายในของขดลวดแรงดันสูงของเตสลาคอยล์ QG เป็นแกปดับอาร์คเมื่อมีการอาร์ค เมื่อ  $C_1$  อัดประจุจากแหล่งจ่ายกระแสตรงหรือกระแสสลับ โดยขึ้นอยู่กับระยะของแกป เมื่อ  $C_1$  อัดประจุเต็มแกปจะเบรคความทำให้ วงจรทางด้านปฐมภูมิครบวงจร และ  $C_1$  คายประจุในลักษณะของวงจรออสซิลเลทที่เป็นรูปคลื่นแบบการแกว่งความถี่สูงแบบลดทอน การแกว่งของความถี่มีค่าสูง แต่ปกติอยู่ระหว่าง 100-250 kHz ขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรออสซิลเลท การแกว่งและการเหนี่ยวนำในวงจรทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา โดยกระแสออสซิลเลททางด้านปฐมภูมิและมีค่าความถี่ที่ใกล้เคียง หรือคล้ายกับความถี่ทางด้านวงจรปฐมภูมิ ดังนั้นวงจรทางด้านปฐมภูมิจ่ายพลังงานไปสู่วงจรทางด้านทุติยภูมิ  $L_2 C_2$  โดยขดลวดทางด้านปฐมภูมิ  $L_1$  ด้วยการเชื่อมโยงเข้าด้วยกันหรือเรียกว่า การคัปปลิง เพื่อว่าแรงดันทางด้านปฐมภูมิลดลง และแรงดันทางด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิ  $L_2$  และค่าความจุ  $C_2$  มีการปรับค่าเพื่อให้วงจรทั้งสองอยู่ในสภาวะ “จูล” เช่นถ้า  $L_1 C_1 = L_2 C_2$  เกิดการอนุกรมของลูกคลื่นในลักษณะการแกว่งแบบหน่วงเพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์

## 2.7 ไดอิเล็กตริกแข็งและการเบรคความในไดอิเล็กตริกแข็ง

ไดอิเล็กตริกคือ ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างอิเล็กโตรด เพื่อกันหรือให้ทนแรงดันได้สูงขึ้น เช่น คั่นระหว่างแผ่นโลหะของคาปาซิเตอร์ คั่นระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอกของเคเบิล คั่นระหว่างขดลวดกับแกนเหล็กในหม้อแปลง เป็นต้น ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บอถึงคุณสมบัติและคุณภาพของไดอิเล็กตริกมี 4 ประการคือ

1. ความต้านทานไดอิเล็กตริก
2. เบอรั่มิตติวิตีหรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
3. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก
4. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

### 2.7.1 ความต้านทานไดอิเล็กตริก

ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้วจะต้องไม่นำกระแสเลยทั้งสิ้นถ้าหากได้รับแรงดันกระแสตรง นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สารฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแส แต่มีค่าน้อยมากเมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง นั่นแสดงว่าสารฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทานไม่สูงเป็นอนันต์ หากแต่มีค่าสูงที่วัดได้ ค่าความต้านทานยิ่งสูงก็แสดงว่า ฉนวนนี้มีคุณภาพการฉนวนยิ่งดี ค่าความต้านทานของไดอิเล็กตริกอาจคำนวณหรือวัดได้เช่นเดียวกับความต้านทานของตัวนำ

### 2.7.2 เปรอ์มิตติวิตี (permittivity)

เปรอ์มิตติวิตีนี้บางทีก็เรียกว่า ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (dielectric constant)  $\epsilon$  เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ไม่มีมิติและเป็นตัวชี้บอกลักษณะของไดอิเล็กตริก หรือสารฉนวนไฟฟ้า เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของการสร้างคาปาซิแตนซ์ หรือกล่าวง่ายๆ  $\epsilon$  ก็คือค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าคาปาซิแตนซ์จะเพิ่มขึ้นกี่เท่าของคาปาซิเตอร์สูญญากาศเมื่อใส่ไดอิเล็กตริกมีเปรอ์มิตติวิตี  $\epsilon$  เข้าไปแทนที่ นั่นคือ

$$C = \epsilon C_0 \quad (2.9)$$

ปกติเปรอ์มิตติวิตี  $\epsilon$  จะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  เทียบกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสูญญากาศหรือความว่างเปล่า  $\epsilon_0$  คือ

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.10)$$

### 2.7.3 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ พลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกที่ความต้านทานไม่ถึงค่านันต์ และอีกส่วนหนึ่งเป็นพลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลารีเซชันของไดอิเล็กตริกจัดเป็นพลังงานสูญเสียทางกลไฟฟ้าเพราะโมเลกุลของไดอิเล็กตริกต้องกลับหัวไปมาตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า

### 2.7.4 ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนซึ่งเป็นตัวชี้บอกให้ทราบว่าไดอิเล็กตริกสามารถทนต่อแรงดันได้มากหรือน้อยเพียงใด กำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะทำให้ไดอิเล็กตริกเบรคดาวน์ หาได้โดยป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรคดาวน์ ค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่มีโครงสร้างทางเคมีและทางฟิสิกส์ต่างกัน สารประเภทที่มีโครงสร้างเป็นผลึก จะเกิดเบรคดาวน์ตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งมักจะสังเกตเห็นว่าร่องรอยของการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนจะไม่เป็นแนวเส้นตรง ปกติไดอิเล็กตริกแข็งจะทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ได้สูงกว่าไดอิเล็กตริกเหลว การเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากเบรคดาวน์ผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งเมื่อเกิดการเบรคดาวน์แล้วสภาพการฉนวนจะเสียไป ใช้งานเพื่อการฉนวนอีกไม่ได้

## 2.8 ฉนวนแข็ง

ฉนวนไฟฟ้านอกจากจะทำหน้าที่กั้นหรือแยกส่วนที่มีไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์มิให้สัมผัสหรือลัดวงจรถึงกันแล้ว บางส่วนยังต้องทำหน้าที่ที่ยึดให้มั่นคง หรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างหรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าได้ดีและเพียงพอ บางส่วนยังต้องทำหน้าที่ยึดและรับแรงกล ตัวอย่างง่ายๆ เช่นสายไฟซึ่งในอากาศ ใช้อากาศทำหน้าที่ฉนวน แต่สายไฟจะลอยหรือยึดอยู่ในอากาศได้อย่างไร จำเป็นต้องใช้ฉนวนแข็ง เช่น ถูกด้วยทำหน้าที่ยึดสายไฟไว้ให้มั่นคงห่างจากดินและสายไฟอื่นที่มีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากันหรือ เคเบิลอัดก๊าซ อัดน้ำมันก็ตามต้องใช้ฉนวนแข็งเป็นตัวนำ หรือในหม้อแปลงไฟฟ้าใช้ฉนวนเหลวหรือก๊าซเป็นตัวฉนวนแต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งทำหน้าที่ยึดขดลวดต่างๆ และแกนเหล็กให้มั่นคง ให้มีระยะห่าง ตามที่ออกแบบ ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าฉนวนแข็งเป็นฉนวนที่สำคัญยิ่งในระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า ลักษณะสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็งอาจกำหนดคุณสมบัติที่สำคัญ คือ

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength)
2. เพอร์มิตติวิตี ( $\epsilon$ )
3. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก ( $\tan \delta$ )
4. ความคงทนต่อแรงกล
5. ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี, ความร้อน

ฉนวนแข็งที่ฉนวนนั้นจะต้องมีความคงทนแรงดันไฟฟ้าสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดันมีพลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริกต่ำทนต่อแรงกลได้สูง ปลอดภัยจากฟองก๊าซและความชื้น และไม่ดูดซึมความชื้น ทนต่อความร้อนได้สูงและทนต่อแรงปฏิกิริยาเคมีได้ และไม่เปื่อยเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งที่ใช้กันอยู่ทั่วไปอาจได้มาจากสารอินทรีย์เช่น กระดาษ ผ้า ยาง เป็นต้น หรือสารอนินทรีย์ เช่น ไมก้า แก้ว เซรามิกส์หรือสารสังเคราะห์ เช่น พลาสติก ตัวอย่างสมบัติของฉนวนแข็งที่ใช้กันทั่วไปจะนำมากล่าวในที่นี้คือ

### 2.8.1 กระดาษ

กระดาษปกติที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์การฉนวนรู้จักกันในลักษณะกระดาษบางๆ หรือกระดาษเหนียวความหนาแน่นและความหนาขึ้นอยู่กับการใช้งานความหนาแน่นต่ำ ( $0.8\text{g/cm}^3$ ) เหมาะกับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์ความถี่สูงและเป็นฉนวนของเคเบิล ความหนาแน่นปานกลาง ( $1\text{g/cm}^3$ ) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์ไฟฟ้ากำลัง กระดาษที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในคาปาซิเตอร์กระแสตรงเพื่อเก็บพลังงาน หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากกระดาษมีคุณสมบัติดูดซึมความชื้นได้ ฉะนั้นการใช้กระดาษเป็นฉนวนจำเป็นต้องทำให้แห้งแล้วชุบฉนวนเหลว เช่น น้ำมันฉนวน ค่าเปอร์มิตติวิตีของเซลลูโลสของกระดาษ และของฉนวนเหลวที่

หุบ และความหนาแน่นของกระดาษ ซึ่งค่าเปอร์มิตติวิตี้รวมนี้สามารถคำนวณได้ ดังตัวอย่างค่าเปอร์มิตติวิตี้ของกระดาษหุบน้ำมันต่างกันแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของกระดาษหุบน้ำมันที่ 20°C ( $\epsilon_{res}$ )

ฉนวนเหลวที่ใช้หุบ	เปอร์มิตติวิตี้ของกระดาษหุบนวนเหลว $\epsilon_{res}$ ความหนาแน่นของอากาศ		
	0.8g/cm <sup>2</sup>	1.0g/cm <sup>2</sup>	1.2g/cm <sup>2</sup>
Trichlorodiphenyl $\epsilon_r = 6.1$	6.28	6.30	6.40
Pentachlorodiphenyl	5.71	5.88	6.06
Transformer oil	3.26	3.72	4.3

### 2.8.2 แก้ว

แก้วเป็นสารอนินทรีย์เทอร์โมพลาสติกประกอบด้วย ออกไซด์ SiO<sub>2</sub> ที่ซับซ้อน ค่าเปอร์มิตติวิตี้มีค่าอยู่ในช่วง 3.5 ถึง 9 ความหนาแน่นตั้งแต่ 2.2 ถึง 6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้องค่าความต้านทานจำเพาะมีค่าตั้งแต่ 10<sup>12</sup> ถึง 10<sup>20</sup> โอห์ม-ซม. ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าโคอีเลคตริก 0.005 ถึง 0.01 ค่าพลังงานสูญเสียเปล่านั้นจะมีค่ามากที่สุดที่ความถี่ต่ำ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 3,000V/cm ถึง 500 kV/cm และลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เหลือครึ่งหนึ่งที่ 100°C

### 2.8.3 เซรามิกส์

เซรามิกส์เป็นอนินทรีย์สาร ได้จากส่วนผสมของดินเหนียว หินบด เฟลสปาร์ ฟลิ้นท์ อะลูมิน่า แก้วเผาด้วยอุณหภูมิสูง เซรามิกส์อาจแบ่งตามค่าเปอร์มิตติวิตี้ได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ต่ำ ( $\epsilon_r < 12$ ) ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ส่วนอีกประเภทหนึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี้สูง ( $\epsilon_r > 12$ ) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์ดังตัวอย่างสมบัติของไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ที่ใช้ในทางปฏิบัติ แสดงในตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 เซรามิกค่าเปอร์มิตติวิต่ำ

คุณสมบัติ	ปอร์ซเลน แรงสูง	ปอร์ซเลน แรงต่ำ	สเต็ปท์พลังงาน สูญเปล่งต่ำ	อะลูมินา	ฟอร์สเตไรท์
ส่วนผสม	ดินเหนียว 50%	ดินเหนียว 50%	3MgO	95.7	2MgO
	เฟลสปาร์ 25%	เฟลสปาร์ 25% ฟลิน	4SiO <sub>2</sub>		SiO
	ฟลิน 25%	25%	H <sub>2</sub> O		
ครูดความชื้น (ppm)	0	0.5 - 2	0	0	0
ขีดจำกัด อุณหภูมิ(°C) ที่ปลอดภัย	1000	900	1050	1600	1050
ความคงทน ต่อแรงดันไฟ ฟ้า (kV/mm)	2.5	3	8 - 25	16	8 - 12
$\epsilon_r$	5 - 7	5 - 7	6	9	6
$\text{Tan } \delta \times 10^4$	50 - 100	100 - 200	10	5	3 - 4

ตารางที่ 2.3 เซรามิกแสดงค่าเปอร์มิตติวิต่ำสูง

เซรามิกส์	ส่วนประกอบทางเคมี	$\epsilon_r$	$\text{Tan } \delta \times 10^4$
แมกนีเซียม เมคาติคานา	Mg Ti O <sub>3</sub>	16	2
สเตรนเทียม เซอโคเนท	Sr Zr O <sub>3</sub>	38	3
ติตานิยมออกไซด์	Ti O <sub>3</sub>	90	5
แคลเซียม ติตานิ	Ca Ti O <sub>3</sub>	150	3
แบเรียม ติตานิ	Sr Ti O <sub>3</sub>	200	5
	Ba Ti O <sub>2</sub>	1500	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.4 ไมก้า

ไมก้าเป็นชื่อเรียกรวมทั่วไปของแร่ผลึกซิลิเกตของอลูมินาและโปแตช ซึ่งอาจแบ่งเป็น 4 กลุ่ม คือ (1) muscovite (2) phlogopite (3) fibrolite และ (4) lipidolite โดยที่สองกลุ่มหลังนี้แข็งและเปราะ จึงไม่ค่อยใช้ในงานการฉนวน ไมก้าสามารถแยกเป็นแผ่นบางมากๆ ได้ไมก้าเป็นวัสดุฉนวนที่มีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกน้อย ทนต่อความร้อนสูง ทนต่อแรงกลได้ดี ด้วยเหตุนี้เองไมก้าจึงเหมาะที่จะเป็นฉนวนได้อย่างกว้างขวาง อุปกรณ์แรงดันต่ำใช้ไมก้าเป็นตัวกั้นระหว่างขั้วคอมมิวเตเตอร์ของอาร์เมเจอร์ สวิตช์เกียร์ อุปกรณ์ทำความร้อนและความเย็น ไมก้าที่บริสุทธิ์มากๆเหมาะที่จะใช้กับความถี่สูง ดังในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของ Muscovite และ Phlogopite

คุณสมบัติ	Muscovite	Phlogopite
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ 30°C kV/mm	1000	700
ค่าเปอร์มีตติวิตี $\epsilon_r$ ที่ 1kHz-300kHz	6 - 7.5	6 - 7.5
Tan $\delta$	0.03 (50Hz)	0.03 (50Hz)
	0.001(1MHz)	0.001(1MHz)
ความต้านทานจำเพาะเชิงผิว ความชื้น 60% ( $\Omega$ -cm)	$10^{11} - 10^{12}$	$10^{10} - 10^{11}$
ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตร มีค่าคงที่ถึง 200°C ( $\Omega$ -cm)	$10^{14} - 10^{15}$	$10^{13} - 10^{14}$
ความทนแรงดึงหินา 0.02 - 0.03 mm kgf/mm <sup>2</sup>	17 - 36	16 - 26

2.8.5 ยาง

ยางเป็นสารที่มีทั้งตามธรรมชาติและสารสังเคราะห์ของ โพลิเมอร์มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นได้ดี คุณสมบัติทางไฟฟ้าของยางขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและวิธีการทำให้ยืดหยุ่นได้ (vulcanizing) และยังขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามเวลาที่ผ่านไปและความชื้นภายในตัวอย่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการใช้งานของยางบางชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติและการใช้ประโยชน์ของยาง

ชนิดของยาง	ดูดซึมน้ำ %	$\epsilon_r$ (50 Hz)	Tan $\delta$ (50 Hz)	Eb kV/cm	การใช้ประโยชน์ และขีดจำกัด
ยางธรรมชาติ	0 - 4.8	2.9 - 6.6	0.02-0.1	100-390	ทนต่อโคโรน่า ทนได้ถึง 60°C
Polysar Kryflex Rubber and styrene Butadine rubber	0 - 4.5	3.8 - 6.2	0.02-0.09	80 - 380	ใช้กับระบบแรงดัน ต่ำ ไม่เหมาะกับอากาศ ชื้นหรือน้ำมัน
Butyl rubber and Polysar butyl Rubber	0 - 2	2.2 - 3.2	0.033-0.03	80 - 200	ใช้กลางแจ้ง ทนดิน ฟ้าอากาศดี ใต้น้ำ เคเบิลฝังดิน แต่ทน ความร้อนได้ต่ำ ทน ต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี และเหนียว
ยางซิลิโคน	0 - 3	2.6 - 3.4	0.006-0.02	90 - 390	ใช้งานเกี่ยวกับเรือ เครื่องบิน หม้อแปลง ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 150°C แต่ไม่ทนต่อ กรด ด่างและคลอริ เนท

### 2.8.6 พลาสติก

พลาสติกเป็นฉนวนแข็งที่ใช้กันกว้างขวาง เพราะพลาสติกมีคุณสมบัติทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดีเป็นพิเศษ การพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลายในปัจจุบันต้องอาศัยพลาสติก พลาสติกประกอบด้วยจำนวนโมเลกุลเล็กมากมายเป็นโมเลกุลใหญ่ ฉะนั้นเป็นโครงสร้างแตกต่างกันเป็นผลให้มีชนิดของพลาสติกมากมาย สารสังเคราะห์เทอร์โมเซตติงประกอบด้วยโมเลกุลเป็นทรงลูกบาศก์(สามมิติ)เนื่องจากพลาสติกมีมากมายหลายชนิดจึงขอกล่าวเฉพาะที่มีใช้งานเพื่อเป็นการฉนวนไฟฟ้าเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

### 2.8.7 โพลีเอทีลีน ( polyethylene = PE )

PE เป็นสารเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษทางไฟฟ้า ทนต่อความชื้นและปฏิกิริยาเคมีได้สูง มีความต้านทานจำเพาะและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง แม้ที่มีความถี่สูง กระบวนการทำง่าย ราคาไม่แพง ฉะนั้น PE จึงมีใช้งานได้กว้างขวาง โดยเฉพาะใช้ในการฉนวนของสายเคเบิลแกนร่วม (coaxial cable) ทั้งในงานไฟฟ้ากำลังและงานสื่อสาร โดยเหตุที่กระบวนการผลิต PE แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะทำขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์เพื่อเฉพาะกิจ จึงแบ่งออกเป็นประเภทตามความหนาแน่นมากขึ้นน้อย แบบบาง ปานกลาง และแบบหนัก และอาจใช้กรรมวิธีผ่านกัมมันตภาพรังสีเพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางประการ อย่างไรก็ตามทุกชนิดมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า  $10^{16}$  โอห์ม-ซม. ค่าเปอร์มิตติวิตี (50 Hz-1 MHz) เท่ากับ 2.3 และ  $\tan \delta$  เท่ากับ  $2 \times 10^{-4}$  มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 200 ถึง 400 kV/cm ทนอุณหภูมิได้สูงถึง  $90^{\circ}\text{C}$  ถ้า PE ที่ผ่านรังสีกัมมันตภาพรังสีจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 700- 1000 kV/cm แต่จะมีค่า  $\tan \delta$  เท่ากับ  $5 \times 10^{-4}$

### 2.8.8 โพลีเอสเตอร์ ( Polyesters )

โพลีเอสเตอร์เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง ประกอบด้วยกรด dicarboxylic และ แอลกอฮอล์ dihydric มีคุณสมบัติคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงมาก ผิวแข็งเป็นพิษ และคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีทั้งหมดได้ดี อาจแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ ประเภทอิมดัว และไม่อิมดัว โพลีเอสเตอร์ที่ไม่อิมดัวใช้ในชั้นแผ่นแก้วบางหรือหล่อแก้วไฟเบอร์ ซึ่งใช้มากในรูปขององค์ประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนโพลีเอสเตอร์อิมดัวใช้ทำไฟเบอร์และฟิล์ม โพลีเอสเตอร์ไฟเบอร์ใช้ทำกระดาษ, เสื้อและใยผ้าเพื่อใช้งานไฟฟ้า ส่วนฟิล์มนั้นใช้หุ้มสายไฟและเคเบิลสำหรับมอเตอร์, คาปาซิเตอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า คุณสมบัติการฉนวนของโพลีเอสเตอร์ขึ้นอยู่กับประเภทและความถี่ที่ใช้งานมีเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_r$  3.7 ความต้านทานจำเพาะ  $10^{13}$ - $10^{15} \Omega\text{-cm}$  แฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าในไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 50 Hz เท่ากับ 0.003 - 0.03 และที่ 1 MHz เท่ากับ 0.006 - 0.04 และยังคงต่ำลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 25 - 45 kV /mm

### 2.8.9 โพลิสทีรีน ( Polysterene = PS )

โพลิสทีรีนเป็นสารประกอบเทอร์โมพลาสติกมีคุณสมบัติต่างๆตามสี ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าราว 20-35 kV/mm ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรราว  $10^{19} \Omega\text{-cm}$  เปอร์มิตติวิตีที่  $20^{\circ}\text{C}$  ประมาณ 2.5 มีแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกต่ำและไม่ขึ้นอยู่กับความถี่คือ  $\tan \delta \cong 0.002$  ที่ความถี่พลังงานถึงความถี่ 10,000 MHz ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้โพลิสทีรีนเป็นไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์กันมากเพราะจะทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์คงตัวในช่วงความถี่กว้างและมีความต้านทานสูง

### 2.8.10 โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride = PVC)

โพลีไวนิลคลอไรด์ ใช้กันหลายรูปแบบในเชิงการค้ามีแบบที่ไม่เป็นพลาสติก แต่เหนียวทำเป็นรูปร่างต่างๆตามต้องการ ใ้ได้ง่ายทนต่อปฏิกิริยาเคมีกรดและด่างและไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์และน้ำยาละลายอินทรีย์ ชัดจำกัดในด้านอุณหภูมิใช้ได้ไม่เกิน  $60^{\circ}\text{C}$  มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ความต้านทานจำเพาะเชิงผิวและเชิงปริมาตรมีค่าสูง  $\epsilon_r$  ประมาณ 3.8 - 4.3 ที่ 50 Hz และ  $\tan \delta = 0.012$  ถึง 0.15 ที่ 50 Hz และ 0.006 ถึง 0.1 ที่ 1 MHz ส่วน PVC ที่อ่อนตัวเป็นพลาสติกได้จะใช้สำหรับหุ้มสายไฟ ปลอกฉนวน และเปลือกนอกของเคเบิลนิยมนำใช้นวน PVC มากกว่ายาง เพราะทนต่อแสงแดด ออกซิเจน และไม่ดูดซึมน้ำหรือความชื้น

### 2.8.11 ไนลอน (Nylon)

ไนลอนเป็นสารประกอบเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีกระบวนการทำให้ทนการกระทบแรงดึงและทนต่อแรงบิดม้วนในช่วงอุณหภูมิกว้างตั้งแต่ 3 ถึง  $300^{\circ}\text{C}$  มีความทนต่อแรงดันได้สูง ความต้านทานจำเพาะเชิงผิวและปริมาตรสูงถึงแม้ว่าจะอยู่ในสภาพความชื้นมาเป็นเวลานานแล้วก็ตาม ทนต่อปฏิกิริยาเคมี หล่อหรือเอกซทูด หรือดบแต่งด้วยเครื่องเป็นรูปร่างต่างๆได้ง่ายเหมาะที่จะใช้กับงานความถี่สูงและต้องการพลังงานสูญเสียเปล่าน้อยและในทางวิศวกรรมไฟฟ้ามักใช้ในลอนเป็นที่ผูกมัด ข้อต่อ แหวนรอง สายรัดเคเบิล สวิตช์ไฟฟ้า เป็นต้น ไนลอนมีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 15 ถึง 20 kV/mm ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรประมาณ  $10^{12}$  ถึง  $10^{15} \Omega\text{-cm}$  ค่าเปอร์มิตติวิตีประมาณ 4-14 ที่ 50 Hz และ 3.5-5 ที่ 1 MHz แพลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก 0.014 ถึง 0.1 ที่ความถี่ 50 Hz และ 0.03 ถึง 0.13 ที่ 1 MHz

### 2.8.12 ฟลูออโรคาร์บอนพลาสติก (Fluorocarbon plastics)

ฟลูออโรคาร์บอนพลาสติกแบ่งได้เป็น polytetrafluoroethylene (PTFE), polychlorotrifluoroethylene (PCTFE) polyvinylidene (PVF) ในบรรดาฟลูออโรคาร์บอนพลาสติกนี้ PTFE มีเสถียรภาพทางความร้อนทางเคมีดีที่สุด และจัดเป็นพลาสติกที่มีคุณภาพดีที่สุดในการใช้เป็นฉนวน เพราะมีคุณสมบัติพิเศษทั้งทางไฟฟ้าและทางกล จะไม่มีการแตกตัวถึงแม้จะร้อนถึง  $300^{\circ}\text{C}$  ส่วน PCTFE มีค่าเปอร์มิตติวิตีและพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกสูงกว่าแบบ PTFE หลอมละลายที่  $190^{\circ}\text{C}$  PVF2 เหมาะที่จะใช้กับงานที่อุณหภูมิเปลี่ยนในช่วงกว้าง คือ ใช้งานได้ตั้งแต่  $-30^{\circ}\text{C}$  ถึง  $150^{\circ}\text{C}$  ใช้หุ้มสายควบคุม เป็นปลอกหุ้มคาปาซิเตอร์ ตัวความต้านทาน กล่องขั้วต่อสายไฟมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของฟลูออโรคาร์บอนพลาสติก

คุณสมบัติ	PTFE	PCTFE	PVF <sub>2</sub>
ความต้านทานเฉพาะเชิงปริมาตร ( $\Omega$ -cm)	$> 10^{18}$	$1.2 \times 10^{18}$	$2 \times 10^{14}$
เปอร์มิตติวิตี $\epsilon_r$ 50Hz -1MHz	2	2.3 - 2.8	7 - 8
ความคงทนต่อแรงดัน kV/mm	20	21	10 - 51
แฟกเตอร์ $\tan\delta$ 50Hz -1MHz	$< 0.0002$	0.0012 - 0.0036	0.0491 - 0.15

### 2.8.13 อีพ็อกซี-เรซิน (Epoxy Resin)

อีพ็อกซี-เรซินเป็นสารฉนวนประเภทเทอร์โมเซตติ้งมีคุณสมบัติเยี่ยมในทางไดอิเล็กตริกและทางกล ง่ายต่อการหล่อขึ้นรูปตามที่ต้องการแม้แต่ที่อุณหภูมิห้อง ทำเป็นฉนวนรูปทรงต่างๆที่ต้องการใช้งาน ส่วนมากจะใช้งานในวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เช่น ปลอกฉนวนนำสาย ถูกด้วยหุ้มอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า สวิตช์เกียร์ ขดลวด แม้แต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ใช้ประสานต่อเข้าด้วยกันได้อย่างกว้างขวางเช่น ปอร์ซเลน ไม้ โลหะ พลาสติก เป็นต้น ใช้งานปิดผนึกรอยต่อเพื่อทำสูญญากาศในห้องทดลอง หรือโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ไฟฟ้า สามารถใช้ อีพ็อกซี-เรซิน เพื่อเอนกประสงค์ ประหยัดเวลาและราคาไม่แพง สามารถยึดหยุ่นได้ดี ตัวอย่างทดสอบทนแรงอัดได้ถึง 180,000 psi หรือความดัน 12,000 บรรยากาศ แล้วกลับคืนสู่สภาพเดิมได้หลังจากเอาโหลดออกแล้ว ตัวอย่างจะไม่เสียรูป ทนต่อดินฟ้าอากาศและสารเคมี มีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_r \cong 2.5-3.8$  แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียที่พลังงาน  $\tan\delta = 0.003 - 0.03$  ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 75 kV /mm ที่ตัวอย่างหนา 0.025 mm ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรสูงถึง  $10^{13} \Omega$ -cm

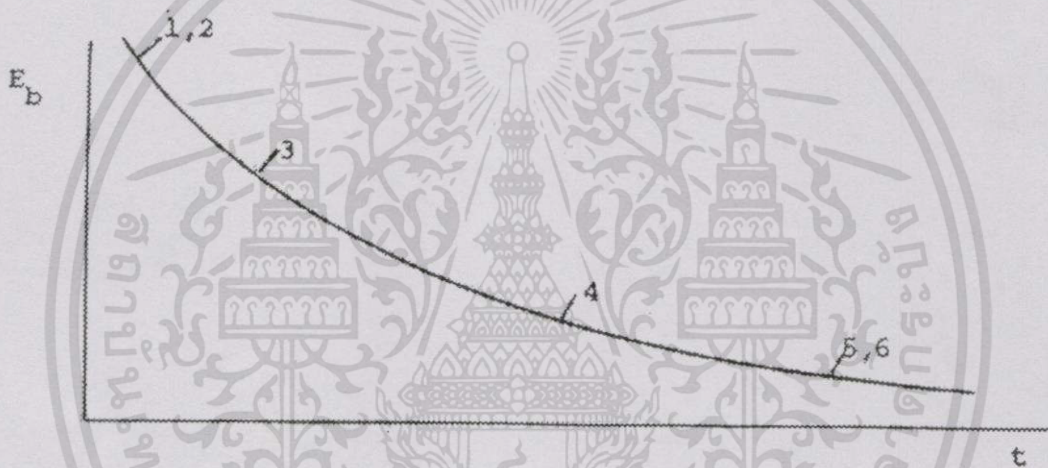
## 2.9 กลไกการเบรคความถี่ของฉนวนแข็ง

ผลของการเกิดเบรคความถี่ในฉนวนแข็งจะแตกต่างไปจากการเกิดเบรคความถี่ในฉนวนก๊าซและฉนวนเหลว คือ ฉนวนก๊าซสามารถกลับสู่สภาพการฉนวนได้ดั้งเดิมภายในเวลาอันรวดเร็วจากการเบรคความถี่ได้ผ่านพ้นไปแล้ว ฉนวนเหลวก็ทำนองเดียวกันสามารถกลับสู่สภาพการฉนวนได้ แต่อาจช้ากว่าก๊าซ แต่ในฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรคความถี่แล้วฉนวนจะเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร ใช้งานอีกไม่ได้ กลไกเบรคความถี่ของฉนวนแข็งค่อนข้างจะซับซ้อนขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและกระบวนการ

การป้อนแรงดันและที่สำคัญคือ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่ป้อน การเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนแข็งอาจแบ่งตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อนและปรากฏการณ์ของการเกิดเบรคดาวน์ได้ คือ

1. การเบรคดาวน์แบบบริสุทธิหรือแบบไอออนิก
2. การเบรคดาวน์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า
3. การเบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์
4. การเบรคดาวน์แบบเทอร์มัล
5. การเบรคดาวน์เนื่องจากผลทางเคมี
6. การเบรคดาวน์เนื่องจากคิสซาร์จภายใน

การเกิดเบรคดาวน์ตามลักษณะหรือสาเหตุต่างๆ เหล่านี้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆตามรูปที่ 2.14

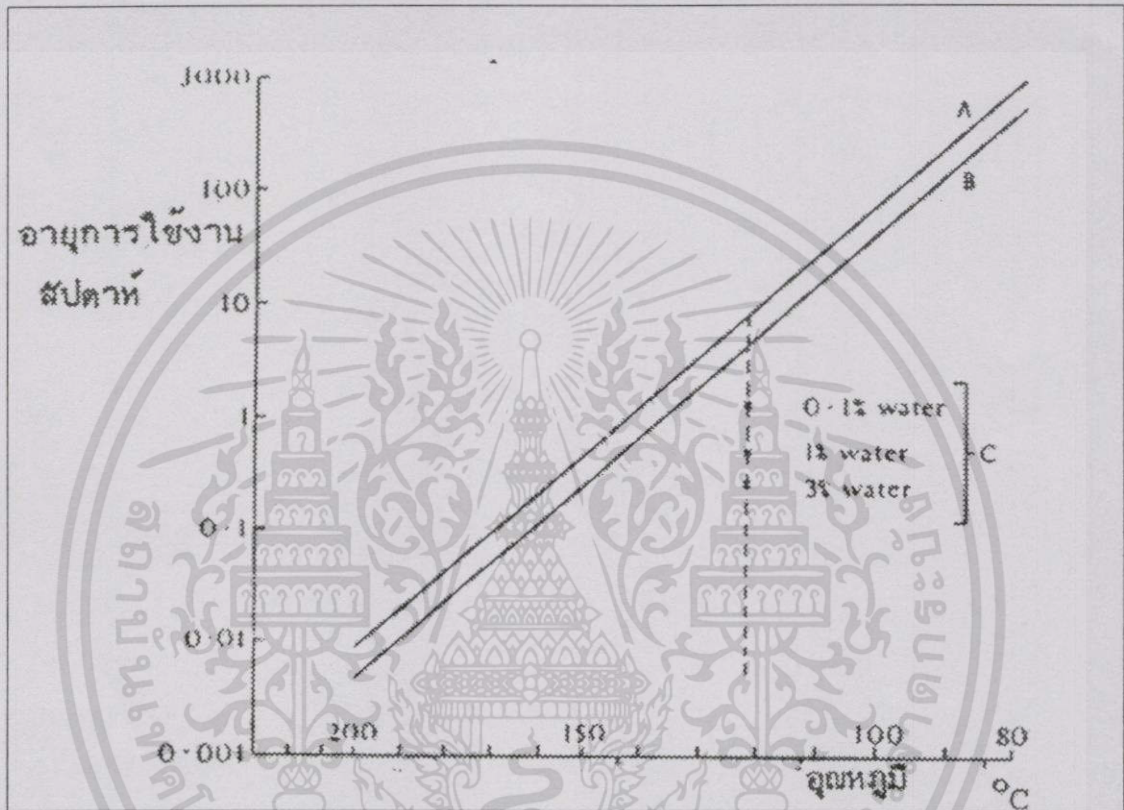


รูปที่ 2.6 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_b$  แปรไปตามช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน

### 2.9.1 การเบรคดาวน์เนื่องจากผลเคมีและเคมีไฟฟ้า

1 ผลเคมี เสถียรภาพทางเคมีเสื่อม ฉนวนเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะทางอินทรีย์สาร สภาพทางเคมีจะเสื่อมช้าลงมากในสภาวะใช้งานปกติ แต่จะขึ้นอยู่อย่างมากกับอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีอาจเป็นผลมาจากการแตกสลายในโครงสร้างของเนื้อสารเช่น คาร์บอนในเซลลูโลส หรือสารสังเคราะห์เช่น กระจกฉนวน จะเสียสภาพทางแรงกลภายในสองสามวันที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ถึงแม้ว่าจะไม่มีอากาศหรือความชื้น กระบวนการเสื่อมสภาพนี้จะเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่ามากถ้าหากมีออกซิเจนและความชื้นดังรูปที่ 2.15 อีกตัวอย่างหนึ่งก็คือไมก้า ที่อุณหภูมิ  $400$  ถึง  $500^{\circ}\text{C}$  จะเริ่มเสียสภาพช้าๆ ทางไฟฟ้าและทางกลฉะนั้นในมาตรฐานทั้งหลายเกี่ยวกับการใช้ฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ไฟฟ้าจะกำหนดแยกประเภทตามอุณหภูมิสูงสุดของการใช้งาน

ออกซิเจน เป็นผลทางเคมีอันหนึ่งที่ทำให้สภาพการฉนวนเสื่อมลง ถ้าสารนั้นมีอากาศหรือไอโซน เช่น ขาง และโปลียเทน จะเกิดออกซิเดชัน ทำให้ผิวแตกกร้าวเมื่อยึดและได้รับแสงแดด ไฮโดรลิซิส สารฉนวนบางชนิดถ้าได้รับทั้งความชื้นและความร้อนจะเกิดไฮโดรลิซิสขึ้น ทำให้เสียสภาพทางกลและทางไฟฟ้า เช่น โพลีทีลีน เทลเพธาตท เซลลูโลสของเอสเตอร์และของโพลิเอสเตอร์



รูปที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออายุการใช้งานทางกลของฉนวนกระดาษ

- เมื่อ
- A คือกระดาษอบแห้งในสูญญากาศจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงสัมผัสกับ  $N_2$
  - B คือกระดาษอบแห้งในสูญญากาศจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงสัมผัสกับ  $O_2$
  - C คือกระดาษชื้นจุ่มในน้ำมันสัมผัส  $N_2$

2 ผลเคมีไฟฟ้าไม่มีสารฉนวนใดที่ปราศจากไอออน หรืออีกนัยหนึ่งคือ ไม่มีสารฉนวนใดที่มีความต้านทานเป็นอนันต์ ฉะนั้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าจึงเป็นผลให้มีกระแสรั่ว(Leakage current) ไอออนเหล่านี้อาจเกิดจากสารเจือปนหรือเกิดไอออนในเซชันภายในฉนวนเองเมื่อไอออนมาถึงอิเล็กโตรดอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาจเกิดก๊าซขึ้น หรือเกิดสารเกาะบนผิวอิเล็กโตรดในลักษณะอิเล็กโตรไลซิสนั่นเอง กระบวนการนี้จะมีผลเร็วขึ้นถ้าหากอุณหภูมิสูง และเป็นผลทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็วขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของสนามไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวโดยสรุปคือ อัตราการเสื่อมสภาพของฉนวนเนื่องจากผลทางเคมีไฟฟ้ากำหนดด้วยกระแสรั่ว ซึ่งขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ ประการแรกคือ ความหนาแน่นของไอออนในฉนวนอันเกิดจากสิ่งเจือปนในฉนวน จึงต้องระมัดระวังหรือป้องกันไม่ให้มีสิ่งเจือปนในกระบวนการผลิตและประกอบ แฟกเตอร์ประการที่สองคือ อุณหภูมิที่ทำให้กระแสรั่วเพิ่มเร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องจากเคมีไฟฟ้าเร็วขึ้น ยกเว้นเสียแต่ฉนวนมีความชื้น อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้แห้งเร็วขึ้น แฟกเตอร์ประการที่สามคือ สารที่เป็นโพลาร์ คือโมเลกุลมีขั้วจะมีกระแสรั่วมากกว่าสารที่ไม่เป็นโพลาร์ ตัวอย่างการฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องจากผลของเคมีไฟฟ้า เช่น สายไฟหุ้มฉนวนและไส้ในที่มีมีความชื้น เมื่อมีความต่างศักย์ระหว่างขดลวดหรือระหว่างชั้นในขดเดียวกัน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ปฏิกิริยากรดร้อนของสายไฟเกิดขึ้นได้ ถ้าฉนวนมีสิ่งเจือปนไอออน(เช่นน้ำมีสารละลาย) เช่น ผ้าฝ้ายหุ้มสายทองแดงในที่ชื้นจะมีสีเขียว การฉนวนจะเสียสภาพถ้าผ้าฝ้ายนั้นดูดความชื้นได้

### 2.9.2 การเบรคดาวนเนื่องจากดีสชาร์จภายใน

ดีสชาร์จภายในโคอิเลคตริกเกิดขึ้นเพราะมีโคอิเลคตริกที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปนอยู่เช่น มีฟองหรือโพรงก๊าซในเนื้อฉนวน หรือเขตต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโตรด สารเจือปนนี้อาจเกิดเบรคดาวนที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเนื้อฉนวนทั้งนี้เพราะว่า ปกติสารเจือปนในฟองหรือโพรงจะมีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าเนื้อฉนวน ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงนั้นจะมีค่าสูงกว่าในฉนวน จึงเกิดเบรคดาวนในโพรงก่อน

1 โพรงฉนวนเป็นก๊าซ ในฉนวนมักจะมีโพรงหรือฟองอากาศเกิดขึ้น เช่น การหล่อพลาสติก การเทหุ้มด้วยสารสังเคราะห์หรือกระบวนการชุบน้ำยาฉนวน ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิดหรือเบรคดาวนของการฉนวน จึงกำหนดด้วยความคงทนต่อแรงดันของก๊าซในโพรงซึ่งในบางกรณีสามารถคำนวณได้ถ้าทราบชนิดของก๊าซ ความดัน และมีติของโพรง

2 โพรงฉนวนเป็นสิ่งเจือปน กระบวนการหล่อหรือหุ้มด้วยฉนวนอาจมีสิ่งเจือปนเช่น ผงฝุ่นกระดาษ เศษใยผ้า หรือเศษวัสดุอื่นใด ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวน หลังจากเกิดเบรคดาวนในโพรงสิ่งเจือปนจะเกิดก๊าซขึ้นภายในโพรงค่าแรงดันเบรคดาวนจะลดต่ำลงหลังจากที่ได้เกิดเบรคดาวนครั้งแรกแล้ว

3 โพรงฉนวนเป็นน้ำมัน โพรงฉนวนเป็นน้ำมันเกิดขึ้นระหว่างชั้นของการฉนวนด้วยกระดาษหุ้มชุบน้ำมัน เช่น ในกรณีของขดลวดหม้อแปลงหรือเคบิต เป็นต้นความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอาจคำนวณได้เช่นเดียวกันกับกรณีของโพรงก๊าซนั่นคือความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงน้ำมัน( $E_p$ )จะเป็น  $E_p/E_1$  เท่าของความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน( $E_1$ )ในกรณีที่โพรงแบนตั้งฉากกับแนวสนามไฟฟ้า ถ้าเกิดเบรคดาวนในโพรงน้ำมันก็จะเกิดก๊าซขึ้นในโพรงและเกิดดีสชาร์จภายในขึ้น

2.9.3 การเบรคดาวนแบบเทอร์มัล

ค่าเบรคดาวนของฉนวนแข็งจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของฉนวน แต่ข้อนี้เป็นจริงจนถึงความหนาหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากฉนวนแข็งหนามากกว่านั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกเนื่องจากกระแสไหลผ่านจะเป็นผลให้เกิดเบรคดาวนได้ง่ายขึ้นนั่นคือค่าแรงดันเบรคดาวนไม่แปรเพิ่มขึ้นตามความหนา

เมื่อป้อนแรงดันให้ฉนวนแข็ง สนามไฟฟ้าทำให้มีกระแสไหลผ่านฉนวนแต่มีค่าน้อยมาก กระแสที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนที่เกิดจะถ่ายเทแผ่กระจายออกไปสู่ตัวกลางรอบๆ โดยการนำผ่านฉนวนและส่วนหนึ่งทำให้ฉนวนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ฉนวนแข็งจะยังคงสภาพอยู่ได้ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถระบายออกไปสู่ในตัวกลางรอบๆ ได้ทันทีโดยไม่ทำให้อุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดของฉนวนนั้น แต่ถ้าอัตราความร้อนเกิดขึ้นสูงกว่าที่ระบายออกไปก็จะทำให้เสียสมดุลย์ และนำไปสู่การเกิดเบรคดาวนแบบเทอร์มัลขึ้นได้ อาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงานความสมดุลย์จะยังคงรักษาอยู่ได้เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันให้กับฉนวนจะเท่ากับความร้อนที่ทำให้ปริมาตรของฉนวนร้อนขึ้นด้วยอุณหภูมิ (T)

ความร้อนที่เกิดขึ้นในกรณีแรงดันกระแสตรง คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$W_g = \sigma E^2 \quad W/cm^3 \quad (2.11)$$

- เมื่อ  $\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้าของฉนวน  
 $E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า

ในกรณีของแรงดันกระแสสลับความร้อนที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$W_g = \omega \epsilon \tan \delta E^2 \quad W/cm^3 \quad (2.12)$$

- เมื่อ  $f$  คือ ความถี่เป็น Hz  
 $E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า  
 $\tan \delta$  คือ แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริก

$$W_d = C_v \frac{dT}{dt} + \text{div}(k \text{ grad } T) \quad W \quad (2.13)$$

เมื่อ	$C_v$	คือ ความร้อนจำเพาะต่อปริมาตรของฉนวน
	$T$	คือ อุณหภูมิฉนวน
	$k$	คือ สภาพนำความร้อนของฉนวน

ฉะนั้นเทอร์มิสเตอร์ความต้านทานจะไม่เกิดขึ้น ณ.ที่  $1 \text{ cm}^3 \quad W_g \leq W_d$

เนื่องจากพลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดคริกในสนามไฟฟ้ากระแสสลับมีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้ากระแสตรงเพราะในสนามไฟฟ้ากระแสสลับมีพลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากโพลาริเซชันซึ่งโมเลกุลของไดโอดคริกจะกลับหัวไปตามอัตราเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ดังนั้นค่าแรงดันเทอร์มิสเตอร์ความต้านทานของกระแสสลับจึงมีค่าต่ำกว่า และจะยิ่งลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น

## 2.10 หม้อแปลงความถี่สูง

ในการออกแบบให้ได้กำลังเอาต์พุตสูงนั้น มีขอบเขตจำกัดที่ทำได้ระดับกำลังไม่ได้ความต้องการอันเนื่องมาจาก การอิ่มตัวของแกน (saturation) ความร้อนที่เกิดขึ้นในแกนหรือในขดลวดแกนที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นแกนที่ทำมาจากวัสดุเฟอร์ไรท์ ซึ่งใช้งานที่ความถี่สูงได้ดี ซึ่งคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรท์ มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ทั้งยังเป็นส่วนที่แยกทางไฟฟ้าระหว่างอินพุตและเอาต์พุตออกจากกันด้วย แรงดันเหนี่ยวนำจะเป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นฟลักซ์ ถ้าเรากำหนดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ให้อยู่ในช่วงเส้นตรงจะได้การหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังสมการ[1]

$$N_p = \frac{V_{in(\max)}}{A_e \times \Delta B_{\max}} \times \tau_m \times 10^3 \quad (2.14)$$

โดย

$\tau_m$	คือ	Maximum pulse width ( $\mu\text{sec}$ )
$B_{\max}$	คือ	ความหนาแน่นของฟลักซ์สูงสุด เป็นเกาส์
$V_p$	คือ	แรงดันด้านปฐมภูมิ เป็น โวลต์
$f$	คือ	ความถี่สวิตซิ่ง เป็น เฮิรตซ์
$N_p$	คือ	จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ เป็น รอบ
$A_e$	คือ	พื้นที่หน้าตัด เป็น ตารางเซนติเมตร
$K$	คือ	ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 4.44 สำหรับแรงดันสัญญาณรูป sine และเท่ากับ 4 สำหรับแรงดันรูปสี่เหลี่ยม

หม้อแปลงเพิ่มแรงดัน (step - up transformer) จะมีความสัมพันธ์ของขดลวดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิเป็นไปตามทฤษฎีของหม้อแปลงโดยทั่วไปดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.15)$$

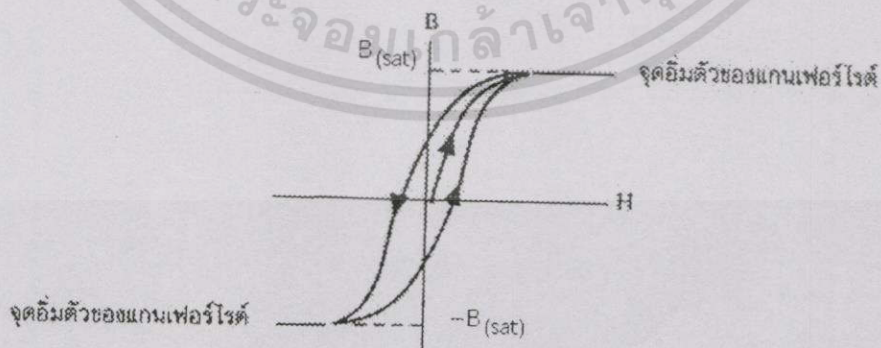
โดย	$V_p$	คือ	แรงดันด้านปฐมภูมิ เป็น โวลท์
	$N_p$	คือ	จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ เป็น รอบ
	$I_p$	คือ	กระแสด้านปฐมภูมิ เป็น แอมป์
	$V_s$	คือ	แรงดันด้านทุติยภูมิ เป็น โวลท์
	$N_s$	คือ	จำนวนรอบด้านทุติยภูมิ เป็น รอบ
	$I_s$	คือ	กระแสด้านทุติยภูมิ เป็น แอมป์

## 2.11 ลักษณะของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์

ชนิดของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้กันแตกต่างกัน จะทำให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์แตกต่างกันด้วยถึงแม้ขนาดเท่ากันทุกประการก็ตาม ในแผ่นข้อมูลเนื้อสารที่ให้มากับแกนเฟอร์ไรต์นั้นจะมีรายละเอียดคุณสมบัติเนื้อสารแสดงไว้เสมอ โดยที่สมบัติที่สำคัญได้แก่เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Curve) และค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss)

### 2.11.1 เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส

แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดที่พันบนแกนตามรูปที่ 2.8 ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  ก็ตามซึ่งจากจุดนี้เรียกว่ามีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (Saturation)



รูปที่ 2.8 ลักษณะที่สมบูรณ์ของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของแกนเฟอร์ไรต์

### 2.11.2 ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์

การสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์จะทำให้แกนเฟอร์ไรท์ร้อน ซึ่งมีสาเหตุหลัก 2 ประการคือการสูญเสียที่เกิดจากลักษณะฮิสเตอร์รีซิสของแกน (Hysteresis Loss) และการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) ที่ความถี่ต่ำกว่า 100 kHz การสูญเสียเกิดจาก ฮิสเตอร์รีซิสของแกนเพียงอย่างเดียว

### 2.11.3 การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนหม้อแปลง

ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแกนหม้อแปลงขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดไพรมารีกับขนาดของแกน จากกฎของ ฟาราเดย์ ได้ว่า

$$\Delta B = \left( \frac{V_p}{N_p A_c} \right) \times 10^8 \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\Delta B$  = ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนหน่วยเป็นเกาส์  
 $V$  = ค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดไพรมารี หน่วยเป็นโวลต์  
 $N_p$  = ค่าจำนวนรอบของขดไพรมารี  
 $A_c$  = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกน หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร  
 $T$  = ช่วงเวลาที่มี การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์เกิดขึ้น เป็นวินาที

จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนรอบของขดลวดมีค่าน้อยลง ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะยังมีค่ามาก ซึ่งการลดจำนวนรอบของขดไพรมารีจะทำให้สามารถใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ขึ้นได้ และสามารถทนกระแสได้สูงทำให้หม้อแปลงจ่ายกำลังได้สูงขึ้น หากค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว จะทำให้แรงดันตกคร่อมขดไพรมารีมีค่าตกลงอย่างรวดเร็ว แรงดันอินพุทจะไปตกคร่อมที่เพาเวอร์ มอสเฟตแทนในขณะที่กำลังนำกระแสสูง ทำให้เกิดการเสียหายได้ และค่าความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงนี้จะทำให้การสูญเสียในแกนสูงด้วย ดังนั้นการกำหนดค่าความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดทำยอมให้เกิดขึ้นในแกนหม้อแปลงควรมีข้อคำนึงถึง 2 ประการคือ

1. แกนเฟอร์ไรท์ต้องไม่อิ่มตัว
2. ที่ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นในแกนขณะทำงานจะต้องมีการสูญเสียในแกนต่ำที่สุด

### 2.11.4 การเลือกแกนเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสม

การใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่มีขนาดใหญ่เกินไปสำหรับหม้อแปลงสวิตช์ซึ่งจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็นส่วนถ้าใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่มีขนาดเล็กเกินไปขดลวดและแกนเฟอร์ไรท์จะร้อนการหาแกนที่เหมาะสมที่ค่าดังต่าง ๆ พิจารณาได้จากขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนหลักและขนาดช่องสำหรับพันขดลวดของบอบบินโดยคำนวณจากสมการ[1]

$$P = \frac{(1.47 f B_{\max} A_e A_c) 10^{-3}}{D} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $D$  = ค่าความหนาแน่นกระแสในขดไพรมารี เป็นเซอร์คูลาร์มิลต่อแอมแปร์

$P$  = กำลังสูงสุดที่ได้จากแกนเฟอร์ไรท์ เป็นวัตต์

$f$  = ความถี่ทำงานของแกนเฟอร์ไรท์ เป็นเฮิร์ตซ์

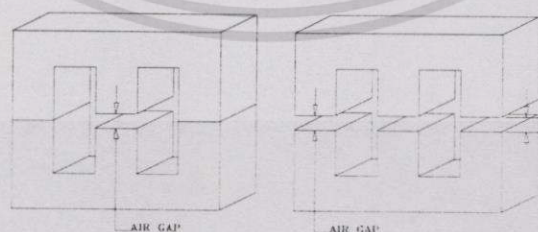
$A_e$  = Core effective area (cm<sup>2</sup>)

$A_c$  = Bobin winding area (cm<sup>2</sup>)

ค่าของ  $\Delta B_{\max}$  ที่เหมาะสมหาได้จากกราฟส่วนค่าของ  $A_e$  และ  $A_c$  เป็นมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรท์ที่ใช้ โดยดูจากข้อมูลจากผู้ผลิตแกนเฟอร์ไรท์ ค่าของ  $D$  กำหนดได้จากขนาดลวดทองแดงที่ใช้พัน อย่างไรก็ตามขนาดแกนเฟอร์ไรท์และความถี่ที่ต้องการจะขึ้นอยู่กับกำลังเอาต์พุต

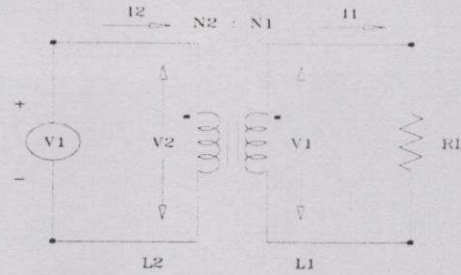
### 2.11.5 ช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรท์

การกำหนดช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็ก (Air Gap) ในแกนเฟอร์ไรท์เป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่ใช้ป้องกันการอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรท์ และช่วยการสะสมพลังงานของลวดในหม้อแปลงสวิตช์ซึ่งมีค่ามากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม ช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรท์จะทำให้เกิดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวน EMI (electromagnetic Interference) ออกมา



รูปที่ 2.9 การกำหนดช่องอากาศ  $I_x$  ที่แกนกลางและการคั่นช่องอากาศ  $I_y$  ระหว่างคู่ประกบแกนเฟอร์ไรท์

## 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขดไฟรมารีและขดเซคันดารีของหม้อแปลง



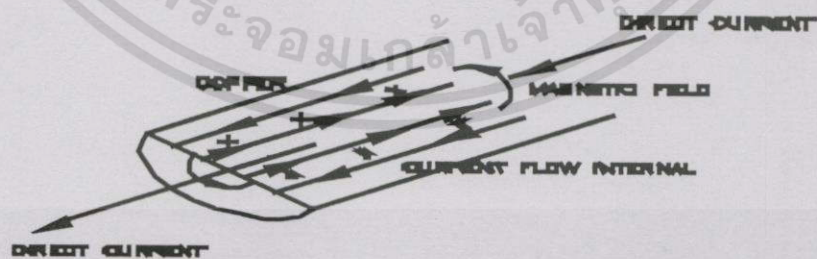
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์พื้นฐานของหม้อแปลง

หม้อแปลงสวิตช์ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างขดไฟรมารีและขดเซคันดารีเป็นไปตามทฤษฎีของหม้อแปลง เป็นไปตามสมการดังนี้ โดยที่  $V_p$  เป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดไฟรมารีซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนหม้อแปลงเมื่อมีกระแสไหลผ่าน ตามสมการ

$$V_p = N_p A_c \left( \frac{dB}{dt} \right) \times 10^{-8} \quad (2.18)$$

## 2.13 การพันขดลวดทองแดงและการกำหนดขนาดของขดลวด

ปกติการพันขดลวดในหม้อแปลงสวิตช์ซึ่งจะใช้ลวดทองแดงอาบยา (Enameled Copperwire) ในการพันสำหรับหม้อแปลงสวิตช์ซึ่งกระแสสลับที่ไหลผ่านขดลวดนั้นมีความถี่สูง ทำให้ขดลวดทองแดงนำกระแสได้เพียงที่ผิวเท่านั้น ทำให้พื้นที่หน้าตัดในการนำกระแสลดลง มีการสูญเสียมากขึ้น ลวดทองแดงเมื่อมีกระแสสลับไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กไหลวนที่ภายในและรอบ ๆ ตัวมัน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ขึ้นภายในตัวลวดทองแดงอีกทอดหนึ่งของการไหลวนนี้กระแสสลับปกติไหลได้เพียงที่ผิวเท่านั้น เป็นการจำกัดพื้นที่นำกระแสของลวดทองแดง



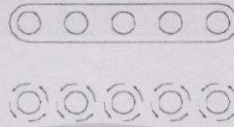
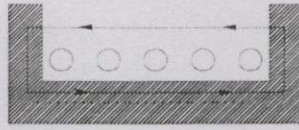
รูปที่ 2.11 การเกิดกระแสไหลวนภายในขดลวดทองแดงเมื่อมีกระแสสลับไหลผ่าน

### 2.13.1 ผลจากการเรียงซ้อนกันของขดลวด (Proximity effect)

ปกติค่าความซึมซาบแม่เหล็ก  $\mu$  (Permeability) ของแกนเฟอร์ไรท์จะมีค่าสูงมาก แกนจะจับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดในหม้อแปลงไว้ทั้งอยู่ในแกนเฟอร์ไรต์

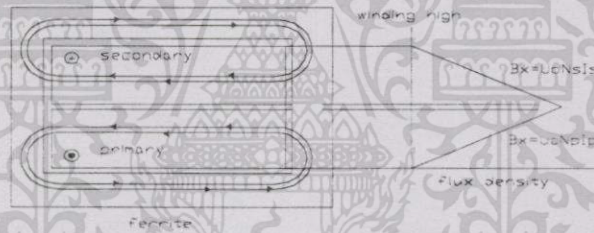
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่านั้นแต่ความจริงยังมีฟลักซ์บางส่วนที่ ว่างตัดแกนขดลวดได้เรียกว่า ฟลักซ์รั่ว (Leakage Flux) ซึ่งได้เกิดจากการพันขดลวด

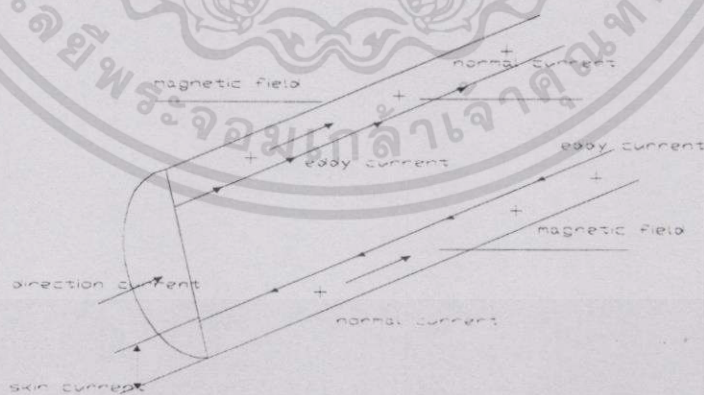


รูปที่ 2.12 การเกิด ฟลักซ์รั่ว ภายในหม้อแปลงสวิตชิง

จากรูปที่ 2.12 แสดงภาพตัดขวางชั้นของลวดทองแดงในหม้อแปลงและเส้นวงฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนที่เกิดขึ้นขณะกระแสไหลผ่านขดลวด การหักล้างของฟลักซ์ระหว่างขดลวดทำให้เกิดเส้นฟลักซ์ขนานไปกับชั้นของขดลวด ดังรูปที่ 2.12 เส้นฟลักซ์ตัดแกนจะบังคับให้ฟลักซ์รั่วอยู่ภายใน และในรูปที่ 2.13 เป็นการแสดงเส้นแรงฟลักซ์ที่เกิดจากชั้นของขดลวดทองแดงหลาย ๆ ชั้น



รูปที่ 2.13 ฟลักซ์รั่วและค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ



รูปที่ 2.14 ผลของขดลวดทองแดงที่วางในฟลักซ์รั่วทำให้มีกระแสไหลวนเกิดขึ้น

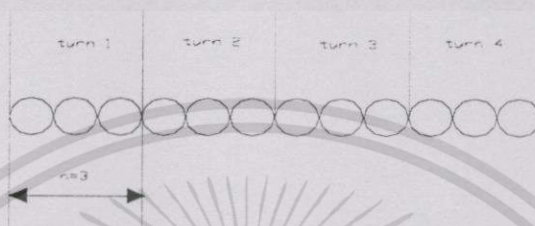
จากรูปที่ 2.14 ค่าความหนาแน่นฟลักซ์รั่ว  $B_x$  จะเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนชั้นของขดลวดเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่า มีค่าสูงสุดที่ระยะชั้น สูงสุดของลวดทองแดงจากแกนและมีค่าลดลงตามลำดับเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลักซ์รั่ววางตัวขนานไปกับชั้นของขดลวดทองแดง โดยตัดผ่านและตั้งฉากกับเส้นลวดทองแดงชั้นใน ทำให้เกิดกระแสไหลวน

2.13.2 การพันขดลวดโดยใช้ลวดทองแดงขนานกัน

เป็นเทคนิคในการลดความต้านทานของลวดทองแดงโดยการใช้ลวดทองแดงขนานกันแล้วพันให้ครบตามจำนวนรอบ ดังรูปที่ 2.15

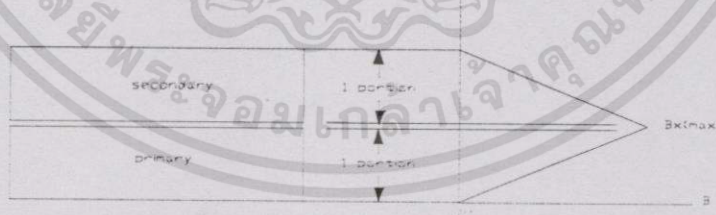


รูปที่ 2.15 การพันขดลวดโดยการใช้ลวดทองแดงขนานกัน

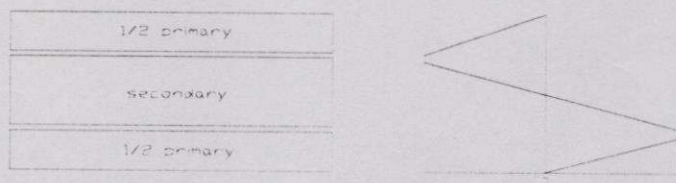
การใช้ลวดทองแดงขนานกันนั้นทำให้ค่าความต้านทานกระแสสลับและเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดลดลง  $n^{-1/3}$  แต่ความสูงเพิ่มขึ้นประมาณ  $n^{1/3}$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนเส้นลวดทองแดงที่ขนานกันโดยทั่วไปการขนานเส้นลวดทองแดง 2 เส้นจะลดความต้านทานได้ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ แต่ความสูงขดลวดเพิ่มประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์

2.13.3 เทคนิคการพันขดลวดทองแดงสำหรับหม้อแปลง

การกำหนดชั้นที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่น้อยที่สุดไปหามากที่สุดเรียกว่าหนึ่งพอร์ชันและจำนวนชั้นในหนึ่ง พอร์ชันเรียกว่าเลเยอร์ (layer)

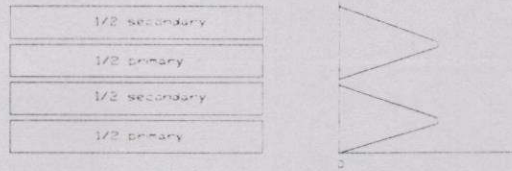


รูปที่ 2.16 การกำหนดจำนวนชั้นในพอร์ชัน

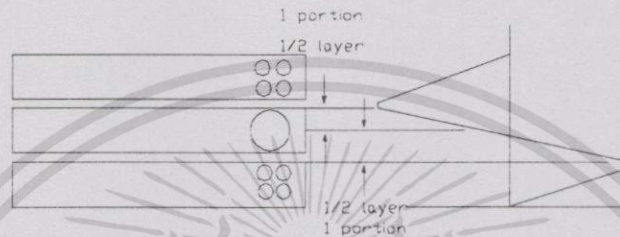


รูปที่ 2.17 การลดค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดของขดลวดในหนึ่งพอร์ชันลงโดยพื้นแบ่งครึ่งขดลวดไพรมารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 การลดค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดของฟลักซ์รั่วได้โดยการลดจำนวนชั้นขดลวดในหนึ่งพอร์ชั้นลงโดยพันครึ่งขดลวดไพรมารีและเซคันดารี



รูปที่ 2.19 ลักษณะของพอร์ชั้นที่มีจำนวนชั้นเท่ากับครึ่งชั้น

- การจัดขดลวดแบบธรรมดา (Simple Winding) การจัดขดลวดใน หม้อแปลงแบบธรรมดา คือพันขดลวดทองแดงให้ครบจำนวนรอบที่ต้องการทับซ้อนกันไปที่ละชุดไปเรื่อยๆดังรูปที่ 2.16

- การจัดขดลวดแบบแบ่งครึ่งพัน (Split Winding) การจัดขดลวดแบบแบ่งครึ่งพัน คือ การพันขดลวดทองแดงให้ครบจำนวนรอบที่ต้องการโดยแบ่งขดลวดออกเป็น 2 ส่วน และนำขดลวดชุดอื่นมาแทรกคั่นกลางเป็นลักษณะการแบ่งในรูปที่ 2.17 และ 2.18 เป็นการลดค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดของฟลักซ์รั่วในแต่ละพอร์ชั้นลงได้ หลักการสำคัญของการจัด ขดลวดแบบแบ่งครึ่งพันคือจำนวนรอบที่ต้องการแบ่งพันต้องเป็นคู่และจำนวนทั้งหมดก่อนแบ่งพันต้องเป็นจำนวนคู่ด้วย เพื่อความสมมาตรหลังการพัน

- การจัดขดลวดแบบแทรกกลาง (Sandwiched Winding) เป็น การพันขดลวดทองแดงให้ ครบจำนวนรอบที่ต้องการ โดยการพันแทรกเข้าไประหว่างกลางขดลวดที่พันแบบแบ่งครึ่งพัน การจัดขดลวดแบบแทรกกลางนี้ถึงแม้จะมีขดลวดแค่เพียงชั้นเดียวก็อาจเกิดพอร์ชั้นได้ถึงสองพอร์ชั้น ดังรูปที่ 2.19

## 2.14 การเลือกความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสม ( $B_{max}$ )

ค่า  $B_{max}$  ซึ่งเราเลือกใช้นี้เราเลือกได้จากกราฟคุณสมบัติของแกนเหล็กที่เราเลือกใช้ ในการพิจารณาเลือกใช้นี้ค่า  $B_{max}$  มากๆจะทำให้ประหยัดราคาแกนเหล็กและเป็นการลดจำนวนรอบของขดลวดลงไปด้วย แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นที่ค่า  $B_{max}$  สูงๆก็จะมีผลทำให้อุณหภูมิของแกนเหล็กสูงและในแกนเหล็กจะมีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมาก ซึ่งจะเกิด harmonic มาก ดังนั้นในการเลือกค่า  $B_{max}$  ควรจะเลือกให้ได้ค่าที่เหมาะสม ไม่ควรจะต่ำหรือสูงจนเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การเลือกค่า  $B_{max}$  ยังขึ้นอยู่กับภาวะที่นำหม้อแปลงไปใช้งาน เช่น distribution transformer ต้องออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงในการใช้งานตลอดวัน ค่า  $B_{max}$  จึงควรมีค่าต่ำ เพื่อให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กลดลง และมีความร้อนเกิดขึ้นน้อยที่สุด

## 2.15 การฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า

ฉนวนหม้อแปลงจะต้องทนได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันใช้งานสูงสุดของระบบความถี่พลังงาน และที่เกิดอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจรในระบบ

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงเป็นเพียงแฟคเตอร์หนึ่งในหลายๆ ลักษณะสมบัติที่ต้องพิจารณาในการออกแบบฉนวน ประการอื่นๆ เช่น พลังงานสูญเสียในหม้อแปลงทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น การระบายความร้อน รีแอกแตนซ์ และแรงกลไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดขณะลัดวงจร ดังนั้นสารฉนวนของหม้อแปลงต้องทนต่อความร้อน แรงกล และสภาพแวดล้อม และมีความประหยัด หากใช้ระยะแก่มากจะทำให้ขนาดโต เปลืองการฉนวน เส้นลวดและแกนเหล็ก และยิ่งกว่านั้นหากฉนวนมากเกินไปจะเกิดปัญหาการระบายความร้อน ฉนวนตัวนำ ขดลวดที่ต้องมีการฉนวนอย่างดี ควรจะลดความหนาแน่นของกระแสให้น้อยลง อีกประการหนึ่งการฉนวนดีเกินไปก็ย่อมทำให้ราคาแพง การเลือกใช้ฉนวนจึงให้พอเหมาะแต่มีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพสูง

ความบกพร่องในฉนวนหม้อแปลงที่เกิดขึ้นได้ประการหนึ่งคือเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าความคงทนของฉนวน จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ในฉนวนของแข็ง หรือวาวไฟผ่านน้ำมัน หรือเกิดดีซาร์จบางส่วนซึ่งจะทำให้สภาพฉนวนเสื่อม อายุการใช้งานของอุปกรณ์จะสั้นลง ความคงทนของฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันใช้งาน หรือแรงดันเกินอาจทดสอบได้ด้วยการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ และความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (BIL) ทั้งรูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัด และวัดดีซาร์จบางส่วน (PD)

การฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอาจแบ่งออกเป็นการฉนวนระหว่างรอบของตัวนำขดลวดแรงต่ำ และระหว่างขดลวดแรงสูงกับส่วนที่เป็นดินหรือต่อลงดิน การฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับดิน และระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ โดยทั่วไปประกอบด้วยฉนวนแข็งทรงกระบอกร่วมกับฉนวนเหลวหรือก๊าซ ซึ่งฉนวนเหลวหรือก๊าซระหว่างชั้นฉนวนของแข็งหรือในช่องว่างนี้ทำหน้าที่เพิ่มฉนวน โดยเฉพาะในช่องแกบหรือตามซอกของฉนวนแข็ง และทำหน้าที่ช่วยระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในขดลวดและแกนเหล็ก การฉนวนระหว่างรอบของขดลวดจะใช้ฉนวนหุ้มตัวนำโดยตรง ถ้าเป็นหม้อแปลงขนาดเล็กฉนวนเส้นลวดจะเป็นแบบอาบน้ำยาฉนวน หม้อแปลงขนาดใหญ่จะใช้แถบกระดาษหรือเทปแก้วพันหุ้มเส้นลวดตัวนำ ซึ่งส่วนมากเป็นสีเหลือง การฉนวนระหว่างชั้นขดลวด ขดลวดกับขดลวด ระหว่างขดลวดกับดินจะใช้ฉนวนกระดาษเหนียวสำหรับหม้อแปลงเล็ก ถ้าเป็นหม้อแปลงขนาดใหญ่จะคั่นด้วยกระดาษอัดแรง หรือใยแก้ว หรือปอร์ซเลน

หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมันการฉนวนส่วนมากจะใช้กระดาษชุบน้ำมัน และกระดาษอัดแรง เนื่องจากขีดจำกัดอุณหภูมิใช้งานฉนวนประเภทนี้จะใช้กับอุณหภูมิถึง 105 องศาเซลเซียส และเนื่องจากกระดาษสามารถดูดซึมความชื้นได้ง่ายจากบรรยากาศฉะนั้นการฉนวนประเภทนี้จะต้องปลอดภัยจากความชื้นในขณะที่ใช้งานน้ำมันหม้อแปลงทำหน้าที่เป็นฉนวนระบายความร้อนโดยวนเวียนผ่านแกนเหล็กและขดลวด อุณหภูมิใช้งานอยู่ในช่วง -40 – 50 องศาเซลเซียส ออกซิเจนชั้นอาจเกิดขึ้นในน้ำมันได้ถ้าหากน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดหยดน้ำ กรด และตะกอน เกิดผลทางปฏิกิริยาเคมีกัดกร่อนฉนวนกระดาษและโลหะ ตะกอนทำให้การระบายความร้อนของขดลวดเลวลง ปัญหานี้อาจแก้ไขได้โดยการสัมผัสของน้ำมันกับอากาศโดยปิดผนึก หรือบรรจุในโตรเจนในช่องว่างแทน หรือใช้สารดูดความชื้นการเกิดอาร์คดิสชาร์จในหม้อแปลง น้ำมันจะแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจน และก๊าซไฮโดรคาร์บอน ซึ่งนำไปสู่การระเบิดได้ ด้วยเหตุนี้เองหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมันจึงไม่นิยมใช้ในอาคาร หรือสถานที่ที่เกิดอันตรายร้ายแรงได้ เช่น ในเหมืองแร่ ในกรณีแบบที่ได้อีกส่วนมากหันไปใช้หม้อแปลงแบบแห้ง (Dry type transformer)

### 2.15.1 การหาขนาดของฉนวน (Insulator)

กรณีที่ขดลวดแรงต่ำและแรงสูงอยู่ในแกนเหล็กเดียวกัน โดยมากแล้วขดลวดแรงต่ำมักจะอยู่ด้านติดกับแกนเหล็ก ทั้งนี้เพราะความต่างศักย์ระหว่างขดลวดและแกนเหล็กเมื่อเทียบกับดินโอกาสที่จะเกิดลัดวงจรมีน้อย ฉนวนระหว่างขดลวดและแกนเหล็กจะบางกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่เราให้ขดลวดแรงสูงอยู่ติดกับแกนเหล็กฉนวนจะมีความหนากว่าราคาของฉนวนก็จะมากกว่า

ฉนวนที่อยู่ระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำและระหว่างแรงต่ำกับแกนเหล็กจะทำด้วย Bakelite, Paper, Elephantide wrap ก็ได้แล้วแต่ความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

สูตรปฏิบัติสำหรับหาฉนวนระหว่างขดลวดกับดินและระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำคือ

$$\text{Voltage between layer} = \frac{(\text{รอบระหว่างชั้นแรงสูง} \times 2) \times \text{แรงดันด้านแรงต่ำ}}{\text{จำนวนรอบแรงต่ำ}} \quad (2.19)$$

$$\text{หา Tension (V/mm.)} = \frac{\text{Voltage between layer (V)}}{\text{Paper thickness}} \quad (2.20)$$

โดยที่ Tension ในการออกแบบนั้นจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

High volt พัน 1 section tensions ห้ามเกิน 5000 V/mm.

High volt พัน 2 section tensions ห้ามเกิน 4000 V/mm.

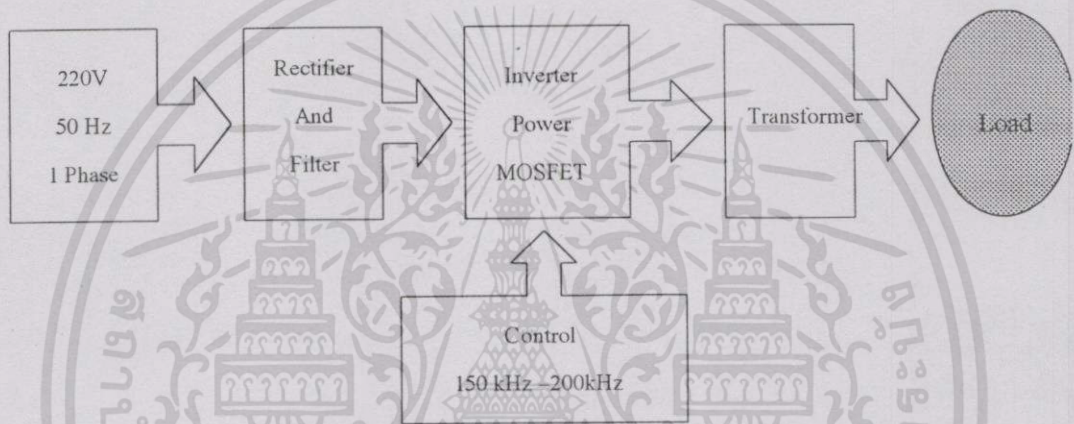
High volt พัน 4 section tensions ห้ามเกิน 3000 V/mm.

## บทที่ 3

# การออกแบบเครื่องต้นแบบ

### 3.1 บทนำ

โครงสร้างและการออกแบบแหล่งจ่ายกำลังความถี่สูงและการควบคุมนั้น จำเป็นจะต้องกำหนด หรือทราบข้อกำหนดของแหล่งจ่ายกำลังความถี่สูงที่จะสร้าง เพื่อเป็นการพิจารณาเลือกวงจร และส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ได้อย่างเหมาะสม ขอบเขตการทำงานและการออกแบบวงจรแสดงจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของเครื่องต้นแบบ

การทำงานของเครื่องต้นแบบ เริ่มจากไฟฟ้ากระแสสลับเฟส ปรับค่าแรงดันได้จาก 0-220 Volt ความถี่ 50 Hz จ่ายให้กับวงจรเรกติไฟล์และฟิลเตอร์ เพื่อเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นจะทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรง เป็นพัลส์ที่ถี่โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ ความถี่ที่ได้จะถูกกำหนดโดยวงจรควบคุม ซึ่งจะทำการควบคุมเพาเวอร์มอสเฟตให้ทำงานเป็นสวิทช์ความถี่สูง ในช่วง 150 kHz - 200 kHz พิกัด Input  $V_{AC}$  1 $\Phi$  , 220 Volt ,50 Hz Output  $V_o$  3 kVA ,150 kHz - 200 kHz

### 3.2 ภาคเรกติไฟล์และฟิลเตอร์

การหาขนาดของตัวเก็บประจุฟิลเตอร์เพื่อลดแรงดันกระเพื่อม โดยปกติแรงดันกระเพื่อมที่ยอมรับจะไม่เกิน 10% แต่กำหนดให้ค่าแรงดันกระเพื่อมเท่ากับ 5% จากสูตร [3]

$$C = \frac{I_{in(rms)} \times \Delta t}{\Delta V_{ripple}} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta V_{\text{ripple}} = 0.05 \times 300 = 15 \text{ V}$$

$$I_{\text{out}} = \frac{P_{\text{out}}}{V_{\text{DC}}} = \frac{3000}{300} = 10 \text{ A}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\Delta t = \frac{1}{50} = 20 \times 10^{-3} \text{ Sec}$$

คำนวณเฉพาะครึ่งไซเคิลจะได้  $\Delta t = 0.01 \text{ Sec}$

หาขนาด C ฟิลเตอร์ สมการ 3.1 ได้

$$C = \frac{I_{\text{in(rms)}} \times \Delta t}{\Delta V_{\text{ripple}}} = \frac{10 \times 10 \times 10^{-3}}{15} = 6,410 \mu\text{F}$$

ซึ่งตัวเก็บประจุที่มีอยู่จะเป็นแบบอิเล็กโทรไลต์ขนาดเท่ากับ 6,800  $\mu\text{F}$  ทนแรงดัน  $V_{\text{dc}}$  ได้ 450 V ขนาดของ RFI filter เป็นอุปกรณ์สำเร็จรูปเลือกที่อัตราทนกระแสเท่ากับ 20 A แทน

### 3.3 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

การออกแบบหาขนาดของเพาเวอร์มอสเฟต จากวงจรฟูลบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ มีแรงดันตกคร่อมมอสเฟตเพียงค่าแรงดันไฟตรงอินพุต ดังนั้น ที่แรงดันสูงสุด 20% ของแรงดันอินพุต มอสเฟตจะต้องทนแรงดันตกคร่อมสูงสุดเท่ากับ 370 V การคำนวณหาค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสมอสเฟต โดยกำหนดให้ค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80%

การคำนวณ

$$I_{\text{p(pk)}} = \frac{P_{\text{out}} \times T}{2\eta \times V_{\text{in(min)}} \times t_{\text{on(max)}}} \quad (3.2)$$

เมื่อใช้งานที่ความถี่ 200 kHz

$$\begin{aligned} T &= 5 \mu\text{Sec} \\ &= 0.4 \times 5 \times 10^{-6} = 2 \mu\text{Sec} \end{aligned}$$

กระแสสูงสุดของเพาเวอร์มอสเฟตคือ

$$I_{\text{p(pk)}} = \frac{3000 \times 5 \times 10^{-6}}{2 \times 0.8 \times 300 \times 2 \times 10^{-6}} = 15.12 \text{ A}$$

ดังนั้น เลือกมอสเฟตที่สามารถทนแรงดันได้ไม่ต่ำกว่า 500 V และทนกระแสได้ไม่ต่ำกว่า 15.12 A เลือกใช้เพาเวอร์มอสเฟตเบอร์ IRFP 460 โดยคุณสมบัติของมอสเฟตดังกล่าวจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบวงจรสแน็บเบอร์

วงจรสแน็บเบอร์เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อลดการเกิดกำลังสูญเสีย และป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับมอสเฟต ในโครงงานนี้เลือกใช้วงจรสแน็บเบอร์แบบป้องกันกระแสเกิน (RCD Snubber) ค่าอุปกรณ์คำนวณได้ โดยใช้ค่า  $C_1$  จากข้อมูลของเพาเวอร์มอสเฟต IRF460 ในภาคผนวก ค

$$C_1 = \frac{I_D(t_r + t_f)}{V_{DS}} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $I_D$  คือ กระแสเดรนสูงสุด = 15.12 A

เลือก  $V_{DS}$  ที่ความปลอดภัยเท่ากับ 20% ของแรงดันใช้งาน เท่ากับ 370 Volt

$t_r$  คือ เวลาขอบขาขึ้น 59 nS

$t_f$  คือ เวลาขอบขาลง 58 nS

$$C_1 = \frac{15.2(59 + 58) \times 10^{-9}}{370} = 4.78 \text{ nF}$$

หาค่า  $R_1$  Snubber จากสมการที่

$$R_1 = \frac{t_{on}}{3C_1} \quad (3.4)$$

$$t_{on} = 0.4(5 \times 10^{-6}) = 2 \mu\text{Sec}$$

$$R_1 = \frac{2 \times 10^{-6}}{3(4.7 \times 10^{-9})} = 141 \Omega$$

เพราะฉะนั้นเลือกขนาด  $R_1$  เท่ากับ 140  $\Omega$

ตรวจสอบกระแสขณะคายประจุ

$$I_{dis} = \frac{V_{DS}}{R} = \frac{370}{140} = 2.64 \text{ A}$$

ค่า  $I_{dis}$  ไม่มากกว่า 0.25  $I_D$  หรือไม่เกิน 3.78 A จึงสามารถใช้ R เท่ากับ 140  $\Omega$  ได้

หาค่ากำลังสูญเสียในตัวต้านทาน  $R_1$

$$P_k = \frac{CV_{DS}^2 f}{2} = \frac{370^2(4.7 \times 10^{-9})(200 \times 10^3)}{2} = 64 \text{ W}$$

### 3.5 การออกแบบภาคควบคุม

IC เบอร์ TL 494 เป็น IC ที่สร้างสัญญาณพัลส์ ซึ่งสัญญาณที่ได้จาก TL 494 สามารถกำหนดค่าเวลาเพื่อได้ ( $t_d$ ) จึงจะนำสัญญาณพัลส์ดังกล่าวต่อเข้ากับออปโตคัปเปิลอร์เพื่อทำการแยกภาคควบคุมและภาคกำลังออกจากกันเป็นการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวน และต่อเข้ากับน็อทเกตทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อแบบ emitter-followerที่จะนำไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ที่ทำงานเป็นอุปกรณ์ Switching โดยกำหนดความถี่แบบปรับค่าได้อยู่ในช่วง 150-200 kHz

$$\text{ที่ } f_{osc} = 400 \text{ kHz}$$

ทำการคงค่า  $C = 0.001 \mu F$  จาก

$$f_{osc} = \frac{1.1}{C_T R_T} \quad (3.5)$$

จะได้

$$R_T = \frac{1.1}{0.001 \times 10^{-6} \times 400 \times 10^3}$$

ทำการเลือกค่า  $R_T$  ได้  $R_T$  เท่ากับ 2.75 k $\Omega$

$$\text{ที่ } f_{osc} = 300 \text{ kHz}$$

ทำการคงค่า  $C = 0.001 \mu F$

จะได้

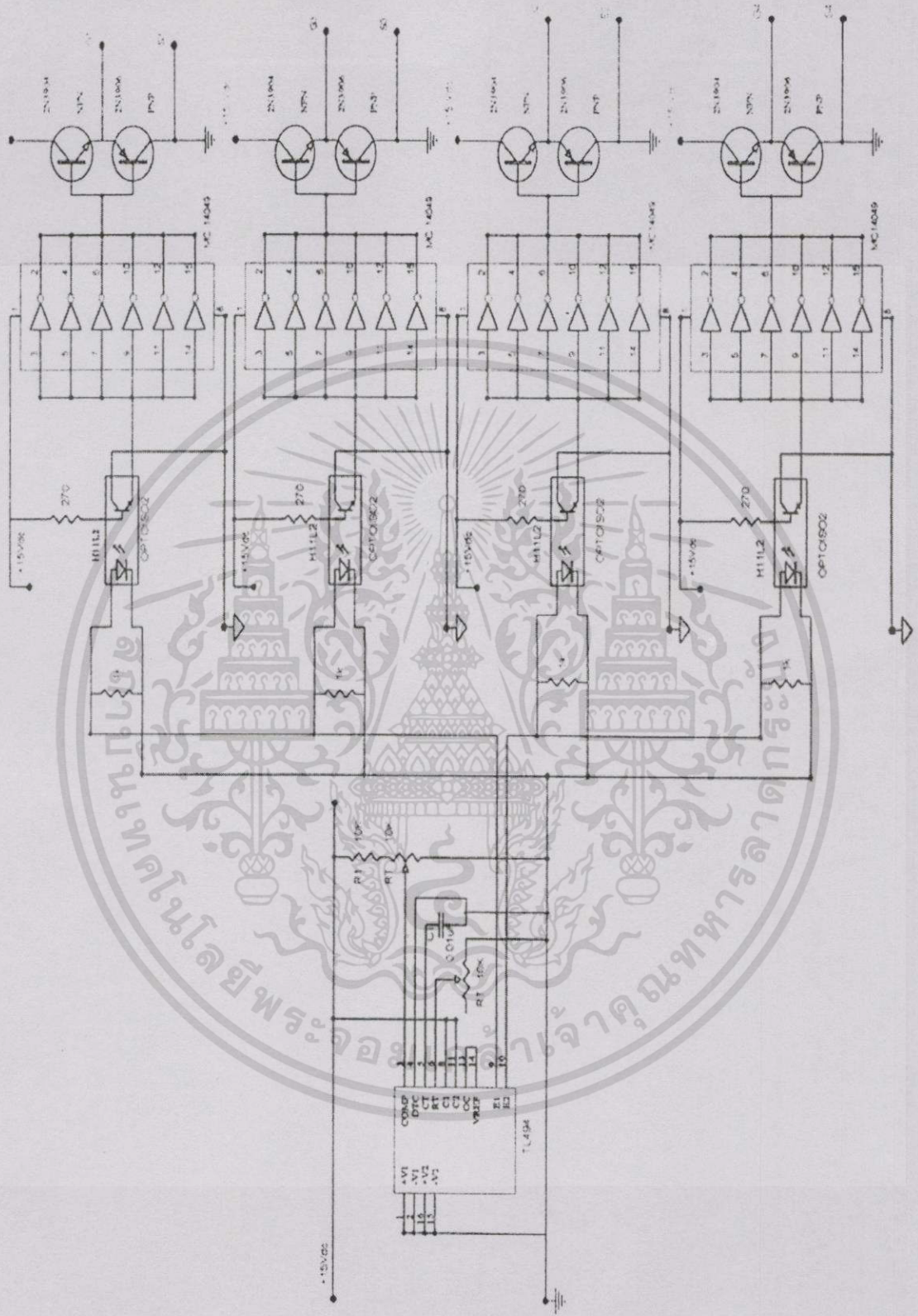
$$R_T = \frac{1.1}{0.001 \times 10^{-6} \times 300 \times 10^3}$$

ทำการเลือกค่า  $R_T$  ได้  $R_T$  เท่ากับ 3.66 k $\Omega$

ดังนั้น ได้  $R_T$  เป็นความต้านทานปรับค่าได้ตั้งแต่ 20 k $\Omega$

### 3.6 วงจรขับมอเตอร์

ในวงจรขับมอเตอร์นี้ จะมีชุดแยกกราวด์ คือ ใช้ออปโตคัปเปิลอร์เป็นตัวแยกเพราะเป็นอุปกรณ์ที่ให้ความปลอดภัยค่อนข้างสูง แล้วต่อเข้ากับ NOT Gate เพื่อทำการกลับรูปสัญญาณที่กลับเฟส ให้กลับมาเหมือนก่อนที่จะผ่านออปโตคัปเปิลอร์ จากนั้นต่อเข้ากับชุดขับ ซึ่งใช้ BJT เป็นบัฟเฟอร์ในการจ่ายกระแสขับ มีผลคือ ทำให้ความเร็วในขณะเริ่มนำกระแสและการหยุดนำกระแสของมอเตอร์เป็นไปได้อย่างรวดเร็วขึ้น ดังภาคผนวก ค



รูปที่ 3.2 วงจรขับมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง

การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงสำหรับวงจรพ्लูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ จะต้องคำนึงถึงค่าองค์ประกอบต่างๆของ INPUT และ OUTPUT เช่น ค่าแรงดัน ค่ากระแส รวมทั้งประสิทธิภาพจากวงจรพ्लูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้ได้กำหนดให้ออกแบบหม้อแปลงดังนี้

กำหนด	$V_{in}$	= 310 V	DC input voltage (V)
	$V_{out}$	= 3 kV	DC output voltage (V)
	$I_{out}$	= 1 A	DC output current (A)
	$\pm \Delta V_{in}$	= $\pm 20$ V	AC input voltage variation
	$P_{out}$	= 3 kW	Output power (w)
	$f$	= 200 kHz	Switching frequency (kHz)
	$T_m / T$	= 40 %	Maximum duty (%)

#### 1 เลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรท์

ในการเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรท์เพื่อให้ความเหมาะสมกับกำลังไฟฟ้าขาออกสามารถหาได้จากสมการ (2.17) จาก Data sheet ของแกนเฟอร์ไรท์ UB 79 / 129 ได้ค่า

$$A_e = 7.07 \text{ cm}^2$$

$$A_c = 29.75 \text{ cm}^2$$

$$B_{sat} = 5200 \text{ Gauss}$$

$$\text{แทนค่า } P_{out} = \frac{(1.47 \times 200 \times 10^3 \times 2600 \times 7.07 \times 29.75) 10^{-3}}{400} = 401 \text{ kW}$$

เมื่อพิจารณาจากค่า  $P_{out}$  ของแกนเฟอร์ไรท์ UB 79 / 129 สามารถใช้ในการออกแบบได้

#### 2 คำนวณค่า $\Delta B_{max}$ (Changing width of magnetic flux density)

โดยปกติในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงจะเลือกค่า  $B_{max} = B_{sat} / 2$  โดยค่าสูงสุดของ  $B_{max}$  จะต้องมีค่าไม่เกิน 80% ของค่า  $B_{sat}$  สามารถคำนวณค่า  $\Delta B_{max}$  ได้จากสมการ

$$\Delta B_{max} = B_{max} - B_r \quad (3.6)$$

เมื่อ  $\Delta B_{max}$  = Changing width of magnetic flux density (mT)

$B_r$  = Residual magnetic flux density (mT)

$$\text{แทนค่า } \Delta B_{max} = 260 - 120 = 140 \text{ mT}$$

#### 3 ค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Maximum DC input voltage)

$$\text{จากสูตร } V_{m(max)} = \sqrt{2} \times (V_m + \Delta V) \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แทนค่า } V_{\text{in(max)}} = \sqrt{2} \times (220 + 20) = 339 \text{ V}$$

#### 4 หาจำนวนรอบขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

จากสมการ (2.14) หาคาบเวลาการทำงาน

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{200 \times 10^3} = 5 \mu\text{sec}$$

$$\text{จากสูตร } T_m = 0.4 T = 0.4 \times 5 \times 10^{-6} = 2 \mu\text{sec}$$

$$\text{แทนค่า } N_p = \frac{339 \times 2 \times 10^3}{707 \times 140} = 6.8 \approx 7 \text{ รอบ}$$

#### 5 หาจำนวนรอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

จากสูตรสมการ(2.22)  $V_s = 3000 \text{ V}$  และ  $V_p = 300 \text{ V}$

$$N_s = \frac{3000 \times 7}{300} = 70 \text{ รอบ}$$

#### 6 หาค่ากระแสเฉลี่ยทางด้านปฐมภูมิและเฉลี่ยทางด้านทุติยภูมิ

จากสมการ (2.22) ได้

$$I_p = \frac{N_s \times I_s}{N_p} \quad \text{โดย } I_s = \frac{S}{V_s}$$

เมื่อ S คือพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง = 3 kVA

$$\text{แทนค่า } I_p = \frac{3 \times 10^3}{300} = 10 \text{ A} \text{ และ ได้ } I_s = 1 \text{ A}$$

#### 7 หางขนาดลวดด้านทุติยภูมิ

แทนความหนาแน่นของกระแส  $D = 500 \text{ Cmil/A}$

ดังนั้นความหนาแน่นที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ =  $1 \times 500 = 500 \text{ Cmil/A}$

เนื่องด้วย  $\text{Cmil/A} = 5.067 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$       แทนค่า =  $500 \times 5.067 \times 10^{-4} = 0.25 \text{ mm}^2$

จะได้ลวดเบอร์ 23

#### 8 หางขนาดลวดด้านปฐมภูมิ

เนื่องด้วยหม้อแปลงที่ทำการออกแบบนี้เป็นหม้อแปลงความถี่สูงจึงมีผลกระทบจากปรากฏการณ์บนพื้นผิวของตัวนำ (skin effect) ดังนั้นจึงเลือกที่จะใช้การนำลวดตัวนำมาตีเกลียว โดยใช้ลวดเบอร์ 23 จำนวน 10 เส้นมาตีเกลียวกันเพื่อลดผลกระทบบนพื้นผิวของตัวนำ อีกทั้งยังเป็นการรักษาอัตราส่วนของกระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิให้สมมาตรกันได้อีกทางด้วย

#### 9 หาคความหนาของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า

-กำหนดชนิดของฉนวน ในการสร้างหม้อแปลงความถี่สูงนั้นฉนวนที่เหมาะสมคือไมลาร์ ซึ่งมีค่าความสามารถในการทนแรงดันได้ประมาณ 7.5kV - 10kV ต่อความหนา 1 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-หาความหนาของฉนวน โดยแทนค่าลงในสมการที่ (2.19) และ (2.20) จะได้

$$\text{แรงดันระหว่างชั้น} = \frac{((35 \times 2) \times 300)}{7} = 3000 \text{ V}$$

$$\text{ความหนาของฉนวน} = 3000/7.5 = 0.4 \text{ mm.}$$

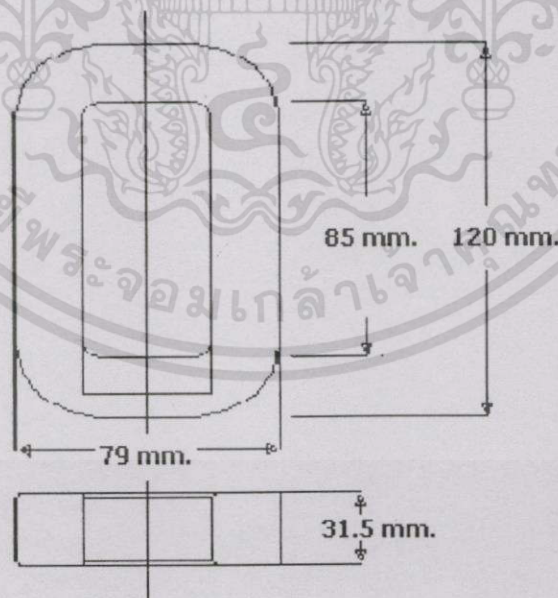
เนื่องจากเป็นหม้อแปลงความถี่สูงควรเผื่อค่าความปลอดภัย (SAFETY FACTOR) = 300% จะได้ ความหนาของฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับแกนเหล็ก ขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำและระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูงเอง ซึ่งในที่นี้เท่ากับ  $3 \times 0.4 = 1.2 \text{ mm.}$

### 3.7 การสร้างหม้อแปลงความถี่สูง

ในการสร้างหม้อแปลงความถี่สูงแรงดันสูงนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงมากที่สุดคือการฉนวนและเทคนิคในการพันเพื่อให้ได้รูปสัญญาณแรงดันขาออกเหมือนแรงดันขาเข้าทุกประการจะเปลี่ยนแปลงเพียงขนาดของแรงดันตามอัตราส่วนของหม้อแปลงเท่านั้น

#### I การสร้างบ๊อบบิ้น

ในโครงการนี้ผู้จัดทำเลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์แบบ UU79 ซึ่งจะไม่มียอบบิ้นมาให้ จึงต้องทำการออกแบบและสร้างขึ้นมาใช้เอง โดยใช้แบกกาไลต์เป็นวัสดุในการทำเนื่องจากคุณสมบัติความเป็นฉนวนและคุณสมบัติทางกลอีกหลายประการ ที่เอื้อต่อการสร้าง



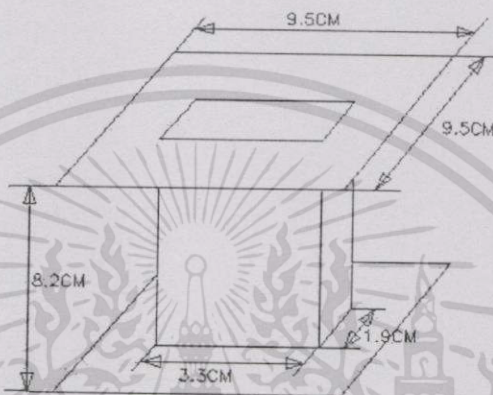
รูปที่ 3.3 ขนาดของแกนเฟอร์ไรท์แบบ UU79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากแกนเหล็กดังรูป สามารถเลือกวิธีการพันได้สองแบบคือ

- พันแบบขดทับขดบนแกนข้างเดียวของแกน
- พันแบบแยกขด(พันขดปฐมภูมิและทุติยภูมิอยู่บนแกนขดละข้างของแกนเหล็ก)

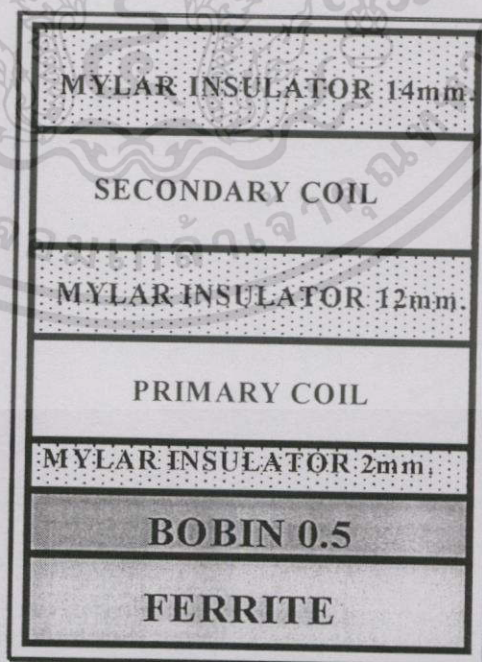
ในวิทยานิพนธ์ นี้เป็นหม้อแปลงแรงดันสูงด้วยการพันแยกขดนั้นจะค่อนข้างเป็นการยากในการออกแบบและการคำนวณจึงเลือกการพันแบบขดทับขดบนแกนข้างเดียวกันดังนั้นจะได้บ๊อบบินเป็นดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขนาดบ๊อบบินที่ใช้พันขดลวดของหม้อแปลง

## 2 การพันหม้อแปลง

เมื่อเราทราบองค์ประกอบทุกค่าในการสร้างหม้อแปลงจากการออกแบบหม้อแปลงแล้วเราสามารถจะเริ่มพันหม้อแปลงได้เลยดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.5 การพันหม้อแปลงความถี่สูง

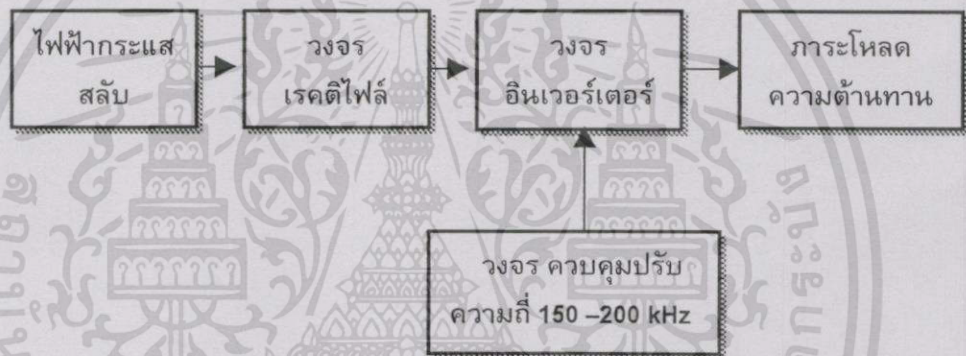
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การทดลองคอนเวอร์เตอร์

### 4.1 บทนำ

ผลการทดลองคอนเวอร์เตอร์ทำการทดลอง 2 ลำดับขั้นการทดลอง โดยการทดลองที่ 1 จะเป็นการทดลองของส่วนภาควงจรสร้างความถี่หรือสวิตชิงที่สามารถปรับความถี่ได้ ตั้งแต่ 150 kHz – 200 kHz จากนั้นเป็นการทดลองที่ 2 โดยเอาที่พู่ที่ได้จากภาควงจรสวิตชิงจะต่อเข้าวงจรของภาคอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้จ่ายให้กับภาระโหลดความต้านทานที่พิกัด 2 kW โดยการทดลองแสดงตามลำดับตามบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของเครื่องต้นแบบ

### 4.2 การทดลองที่ 1 การทดลองภาคควบคุม (วงจรสวิตชิง)

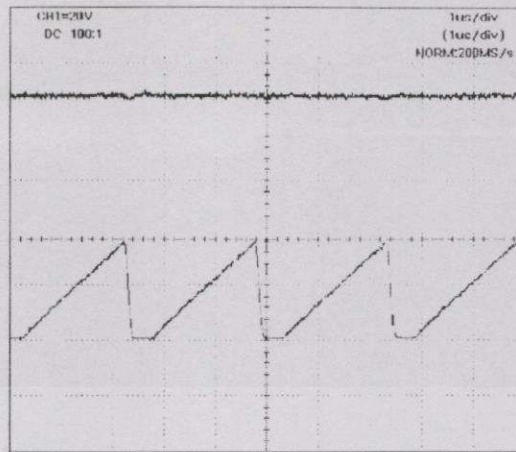
#### 4.2.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทำการทดลอง โดยในการปรับความถี่ว่าสามารถทำงานได้ ณ. ที่สภาวะต่างๆ และวัดสัญญาณ แต่ละจุด จะกำหนดโดยการปรับที่ RT ในการทดลองจะแสดงที่ระดับความถี่ต่าง ๆ โดยแบ่งผลการทดลองเป็นความถี่ที่ 150 kHz, 170 kHz, 200 kHz โดยผลการทดลองดังต่อไปนี้

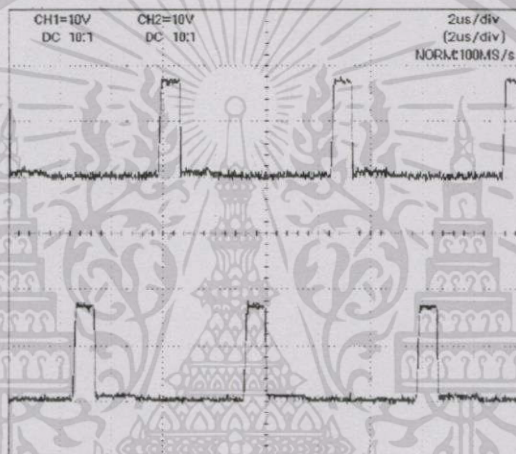
#### 4.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

ต่อวงจรตามรูป 3.2 และวัดสัญญาณแต่ละจุด

#### 4.2.3 ผลการทดลอง



รูปที่ 4.2 สัญญาณสร้าง PWM ที่ขา 5 และ ขา 6 ของ TL 494

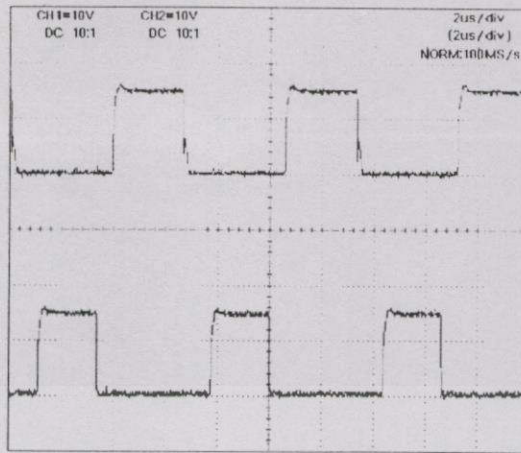


รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 9 และ ขา 10 ของ TL 494

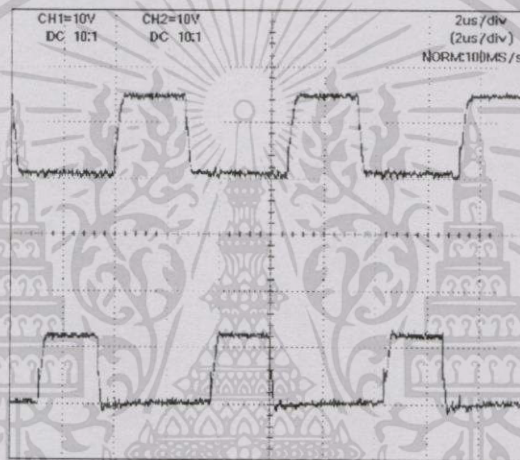


รูปที่ 4.4 สัญญาณเอาต์พุตของ OPTO ISOLATOR H11 L2

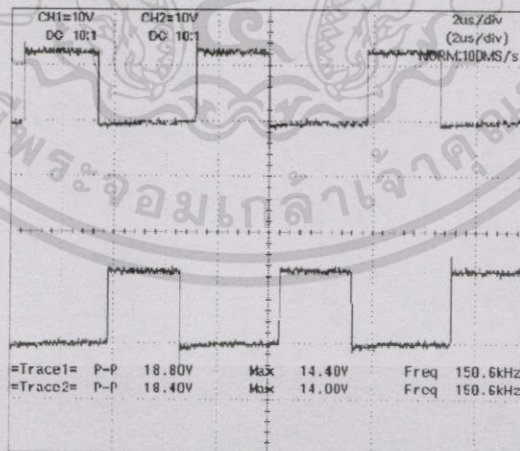
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 สัญญาณเอาต์พุตจาก CMOS CD4050

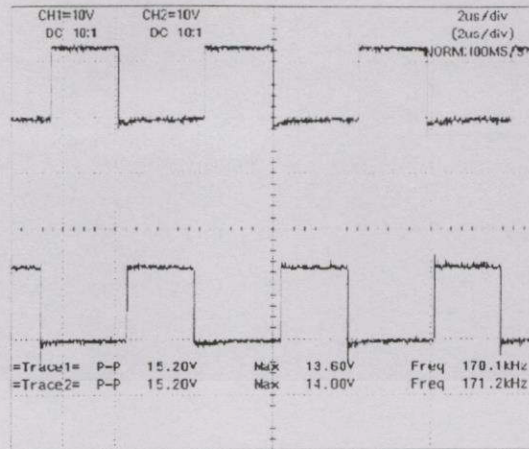


รูปที่ 4.6 สัญญาณเอาต์พุตจาก PUSH - PULL TRANSISTOR

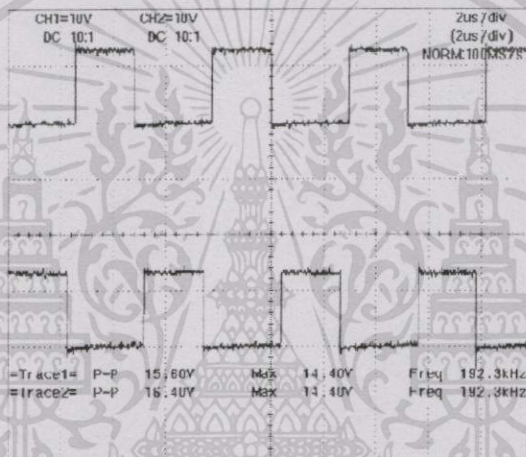


รูปที่ 4.7 สัญญาณจากชุดขับเบทขณะไม่ต่อมอสเฟตที่ความถี่ 150 kHz

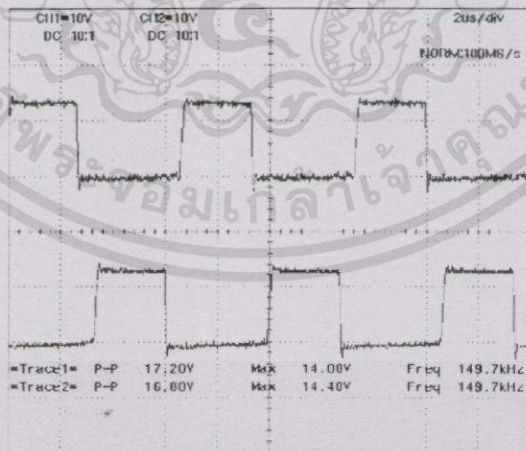
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้



รูปที่ 4.8 สัญญาณจากชุดขับเกทขณะไม่ต่อมอสเฟตที่ความถี่ 170 kHz

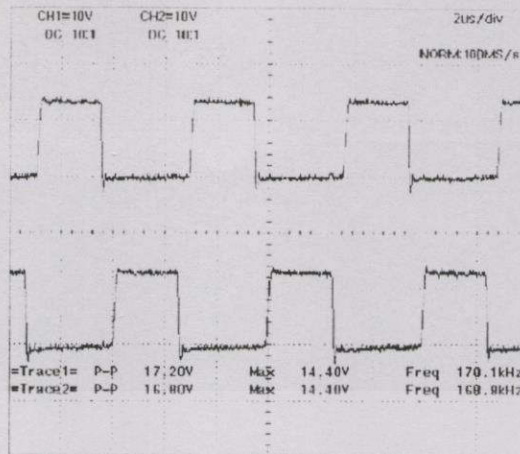


รูปที่ 4.9 สัญญาณจากชุดขับเกทขณะไม่ต่อมอสเฟตที่ความถี่ 200 kHz

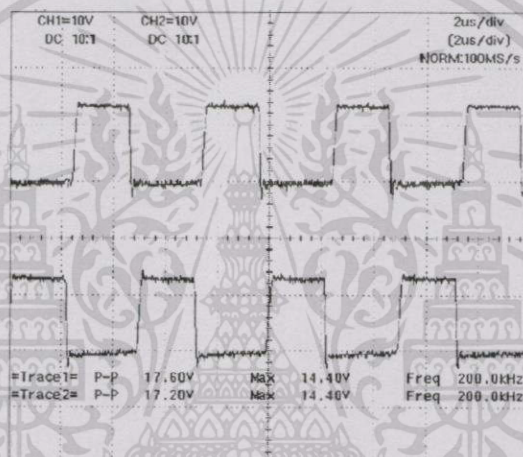


รูปที่ 4.10 สัญญาณจากชุดขับเกทขณะต่อมอสเฟตที่ความถี่ 150 kHz

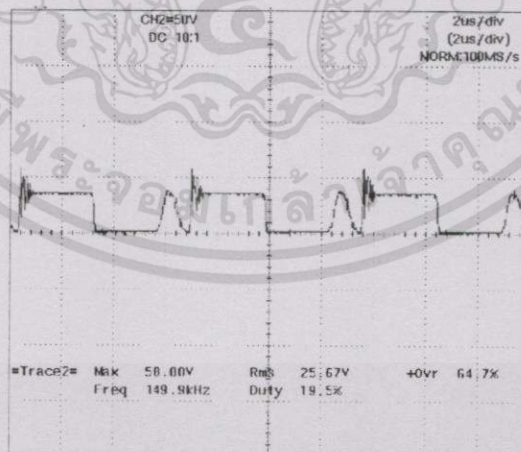
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 สัญญาณจากชุดขับเกทขณะต่อมอสเฟตที่ความถี่ 170 kHz



รูปที่ 4.12 สัญญาณจากชุดขับเกทขณะต่อมอสเฟตที่ความถี่ 200 kHz



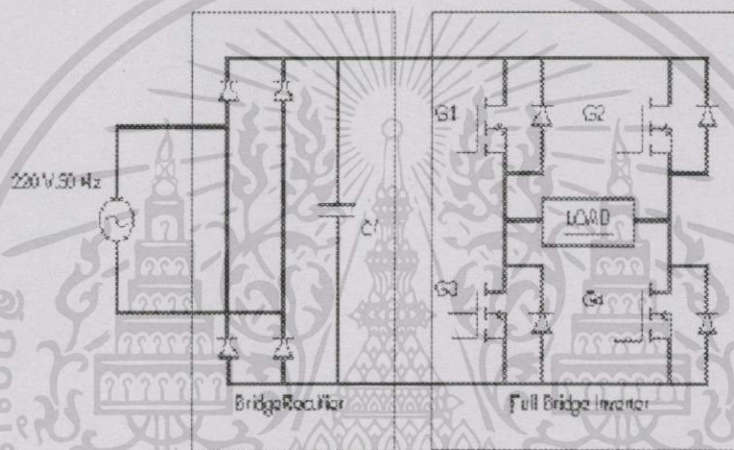
รูปที่ 4.13 สัญญาณแรงดัน  $V_{DS}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ชุด ควบคุมสามารถทำงานได้จริง โดยปรับความถี่ ได้ตั้งแต่ 150kHz-200 kHz โดยมี Dead time 0.5  $\mu$  Sec และมี Duty Cycle 50 % แรงดันที่ใช้ในการ ขับมอเตอร์ จะอยู่ที่ประมาณ 15 V

วงจรภาคควบคุมและภาคเรกติไฟล์จะถูกต่อเข้ากับวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะใช้วง จจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ และใช้เพาเวอร์มอสเฟตในการสวิตชิง โดยวงจรที่ใช้งานแสดงดัง รูป 4.14 โดยมีเครื่องมือวัดในภาคผนวก ก.



รูปที่ 4.14 วงจรคอนเวอร์เตอร์

การทดลองของภาคสวิตชิงนี้จะทำการทดลองที่ความถี่ 150 kHz ถึง 200 kHz และ ปรับแรงดันอินพุตตั้งแต่ 20 Volt ถึงระดับแรงดันประมาณ 220 Volt มีผลการทดลองดังนี้

### 4.3 การทดลองตอนที่ 2 ทดลองชุดอินเวอร์เตอร์ ขณะต่อโหลดความต้านทาน

#### 4.3.1 วัดอุประสงค์

เพื่อการทดลองดูผลของเครื่องต้นแบบ ว่าพิกัด และประสิทธิภาพของเครื่องเป็นอย่างไร ที่ความถี่ 150 kHz ถึง 200 kHz และ สามารถที่ปรับแรงดันอินพุตตั้งแต่ 20 Volt ถึงระดับแรงดัน ประมาณ 220 Volt ได้หรือไม่ โดยจะจ่ายโหลดความต้านทาน 500W – 2000W

#### 4.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

ต้องจรรยาตามรูปที่4.14 โดยให้โหลดคงที่ ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ กัน

1. ทำการตั้งความถี่ 150 kHz ต่อโหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 5 หลอด ทำการเพิ่ม ระดับแรงดันอินพุตขึ้นครั้งละ 20 V จนถึง 220 V ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการวัดค่าของแรงดันอินพุท ,กระแสอินพุท ,กำลังไฟฟ้าอินพุท ใช้ Power meter วัดแรงดันเอาต์พุท ,กระแสเอาต์พุท ,กำลังไฟฟ้าเอาต์พุท และใช้สโคปวัดสัญญาณแรงดันเอาต์พุท และทำการบันทึกค่าต่างๆที่ได้ลงในตาราง

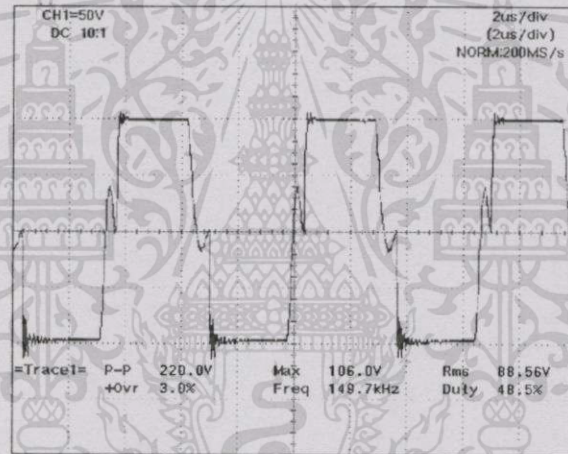
3. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 1 และ 2 โดยทำการเพิ่มโหลดหลอดไฟครั้งละ 5 หลอด จนถึง 20 หลอดตามลำดับ

4. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 1 และ 2 โดยปรับเปลี่ยนความถี่ไปเป็น 175 kHz และ 200 kHz ตามลำดับ

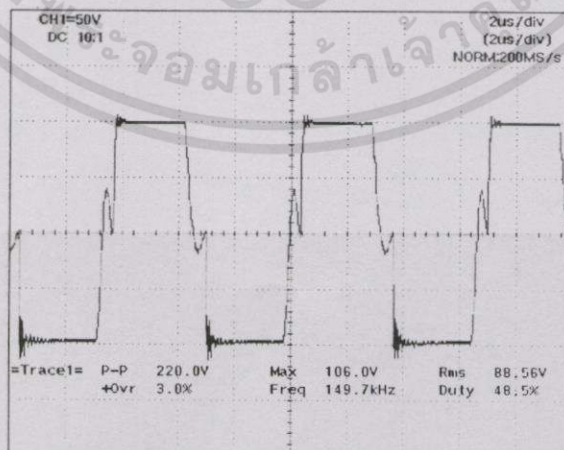
5. นำค่าที่ได้จากการทดลอง มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง

#### 4.3.3 ผลการทดลอง

1. ที่ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 5 หลอด

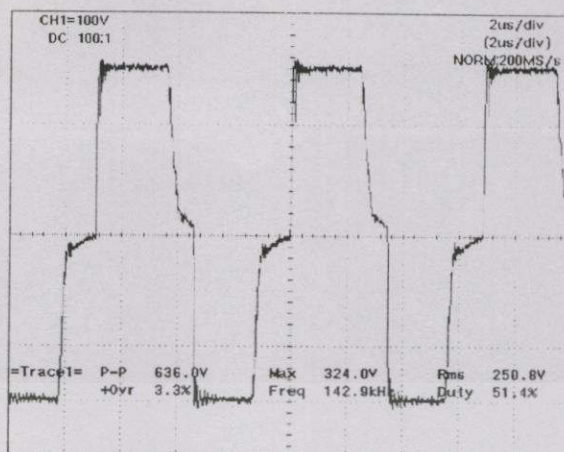


รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงดันเอาต์พุท ที่แรงดันอินพุท 60 V<sub>AC</sub>



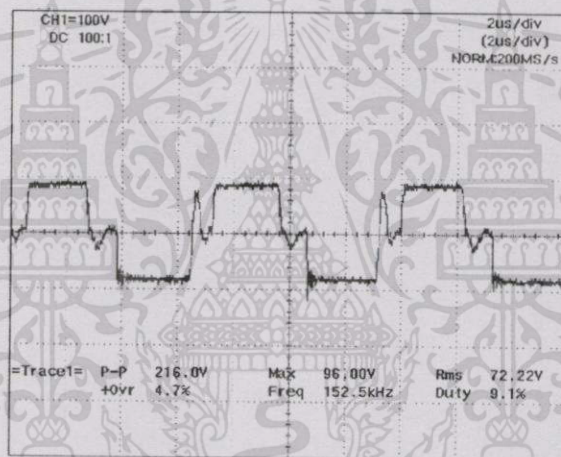
รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันเอาต์พุท ที่แรงดันอินพุท 140 V<sub>AC</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

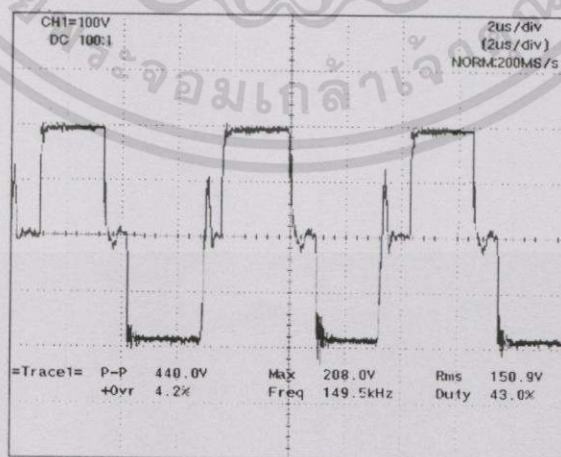


รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220 V<sub>AC</sub>

2. ที่ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 10 หลอด

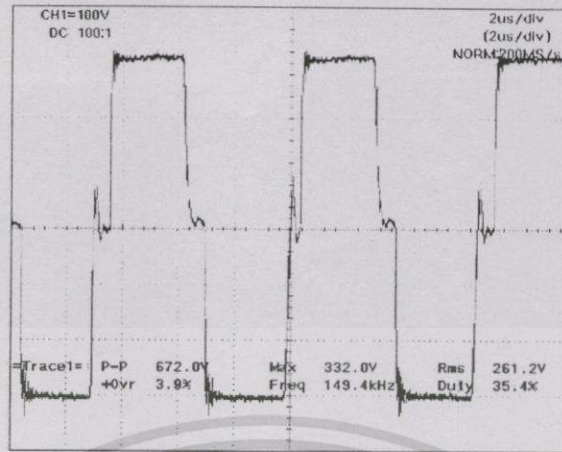


รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V<sub>AC</sub>



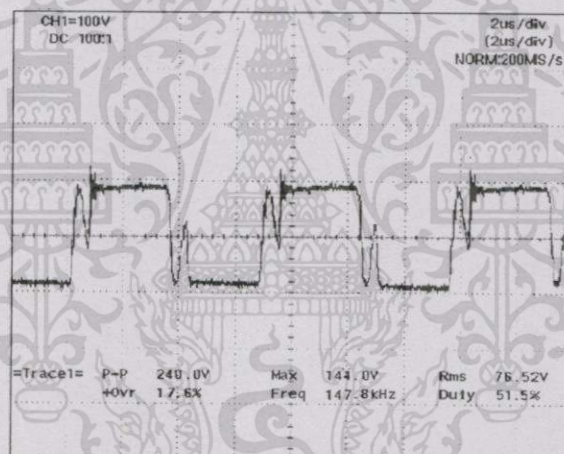
รูปที่ 4.19 สัญญาณเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V<sub>AC</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

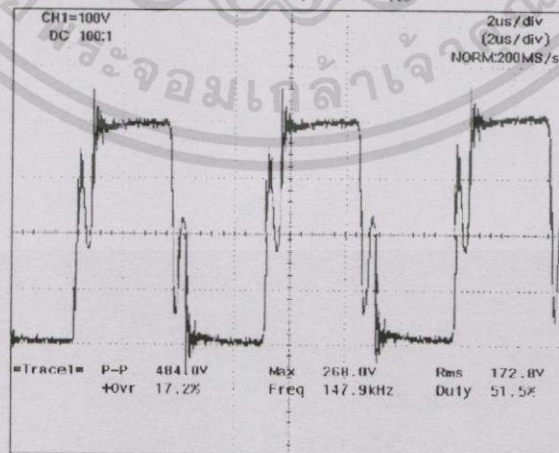


รูปที่ 4.20 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220 V<sub>AC</sub>

3. ที่ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 15 หลอด

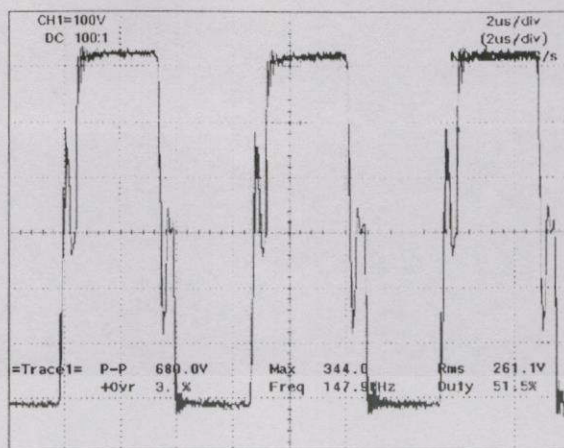


รูปที่ 4.21 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V<sub>AC</sub>



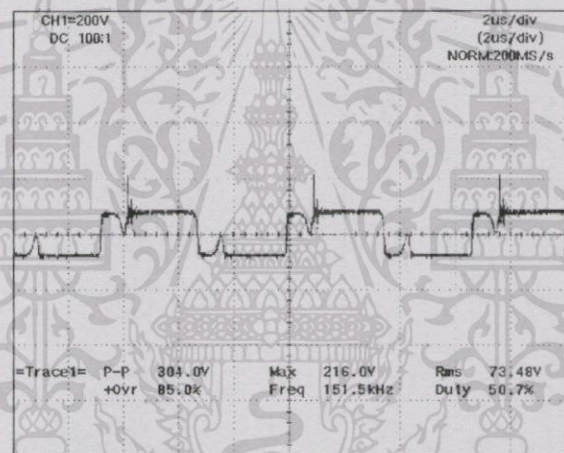
รูปที่ 4.22 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V<sub>AC</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่จากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

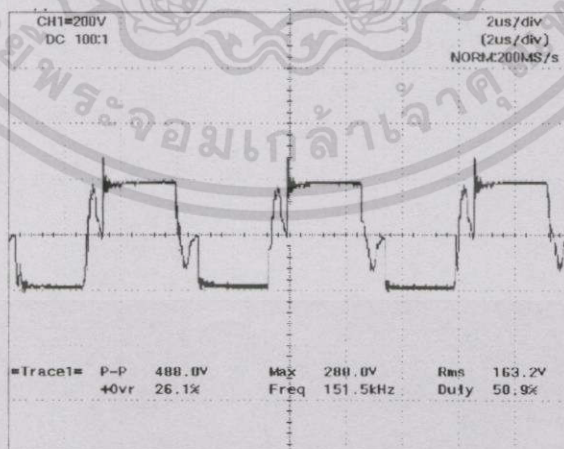


รูปที่ 4.23 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220 V<sub>AC</sub>

#### 4. ที่ความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 20 หลอด

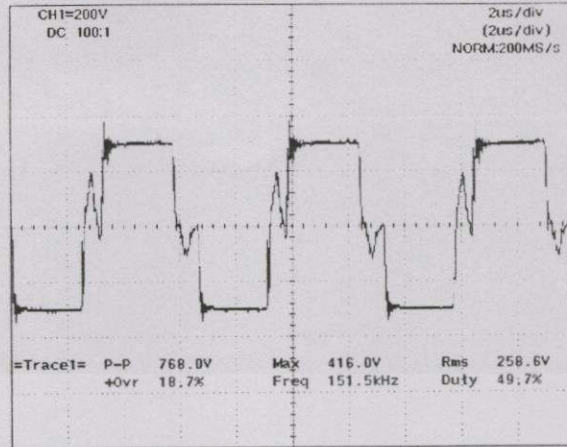


รูปที่ 4.24 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V<sub>AC</sub>



รูปที่ 4.25 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V<sub>AC</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

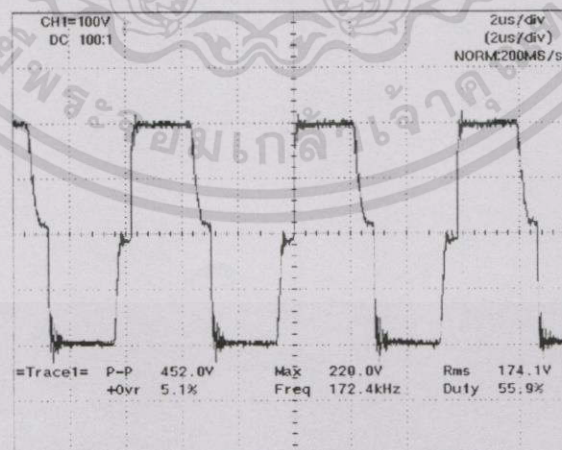


รูปที่ 4.26 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220 V<sub>AC</sub>

5. ที่ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 5 หลอด

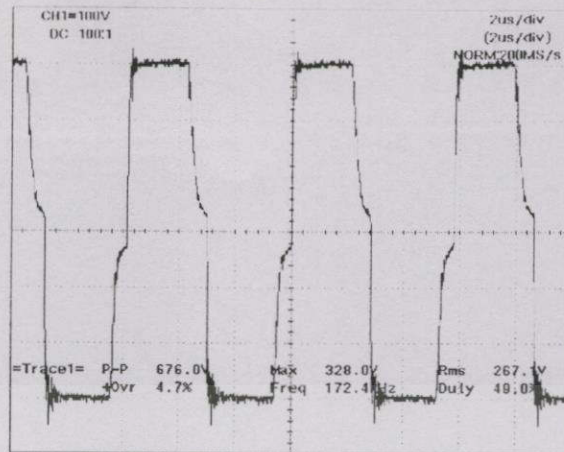


รูปที่ 4.27 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V<sub>AC</sub>



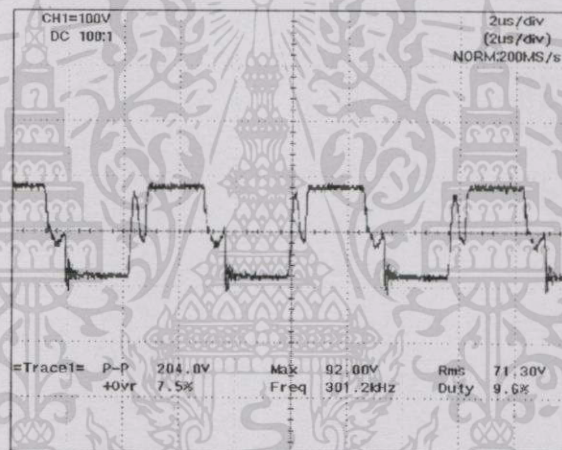
รูปที่ 4.28 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V<sub>AC</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

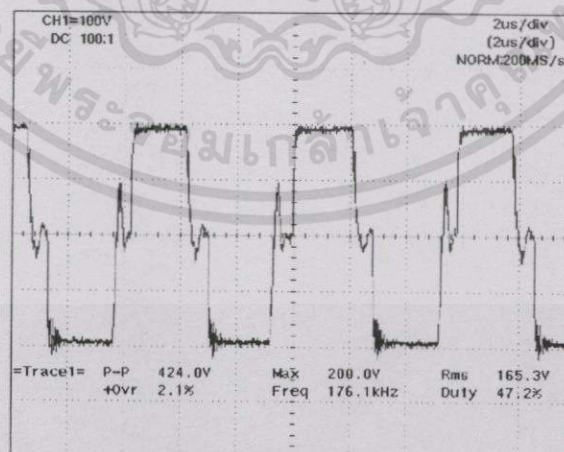


รูปที่ 4.29 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220 V<sub>AC</sub>

6. ทักความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 10 หลอด

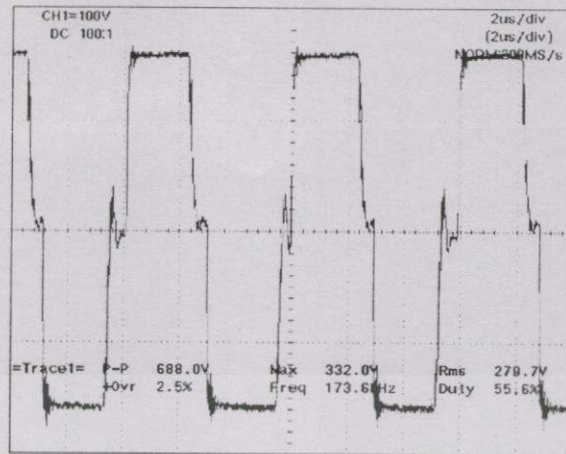


รูปที่ 4.30 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V<sub>AC</sub>



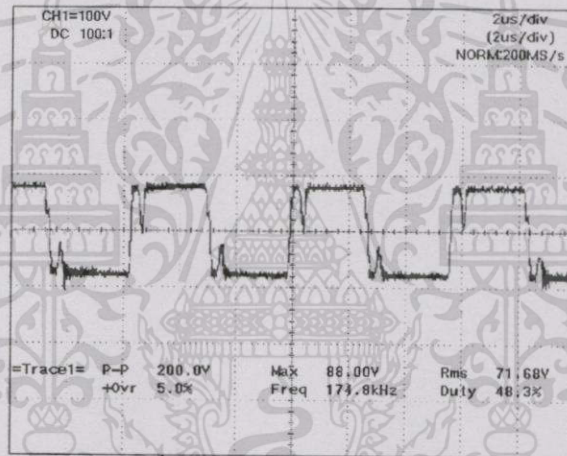
รูปที่ 4.31 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V<sub>AC</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

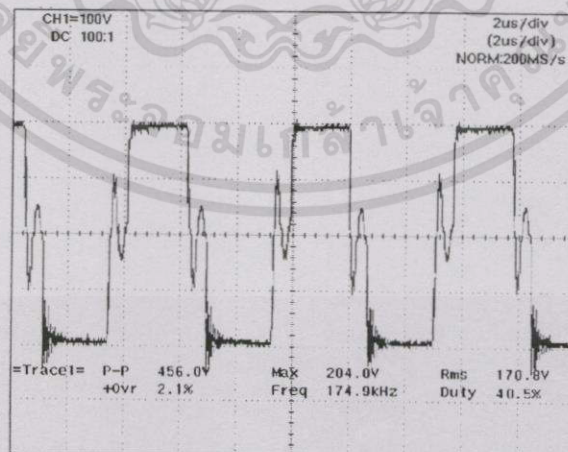


รูปที่ 4.32 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220 V<sub>AC</sub>

### 7. ที่ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 15 หลอด

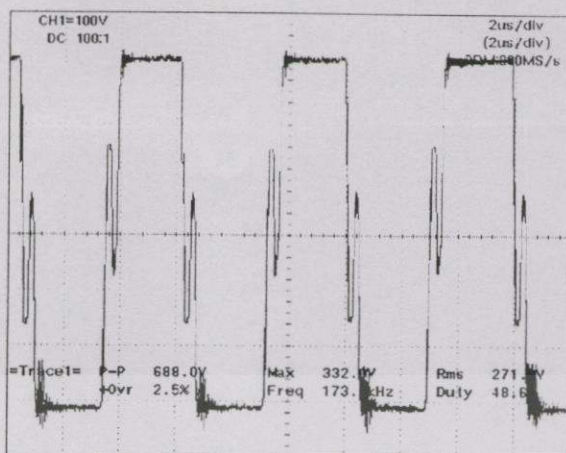


รูปที่ 4.33 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V<sub>AC</sub>



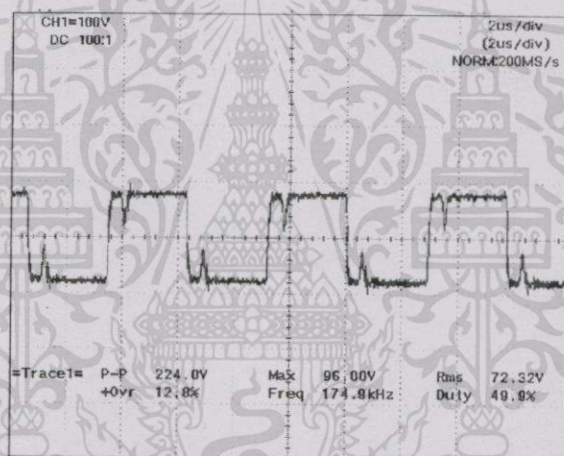
รูปที่ 4.34 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V<sub>AC</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

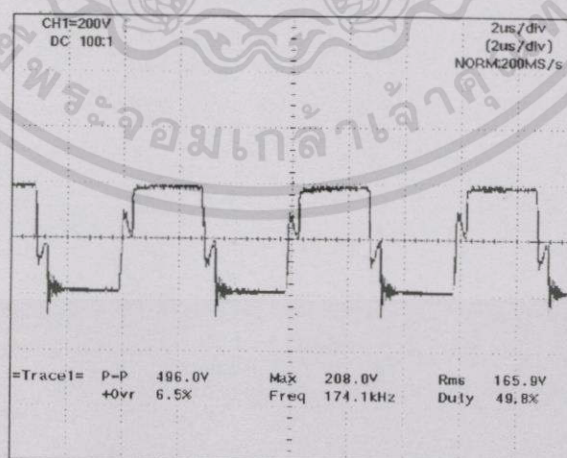


รูปที่ 4.35 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต  $220\text{ V}_{AC}$

8. ที่ความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 20 หลอด

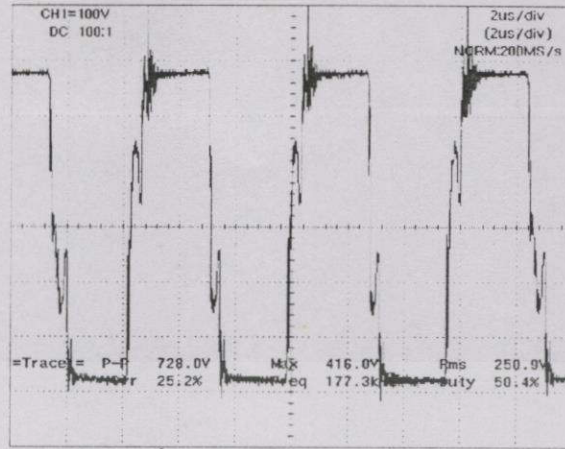


รูปที่ 4.36 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต  $60\text{ V}_{AC}$



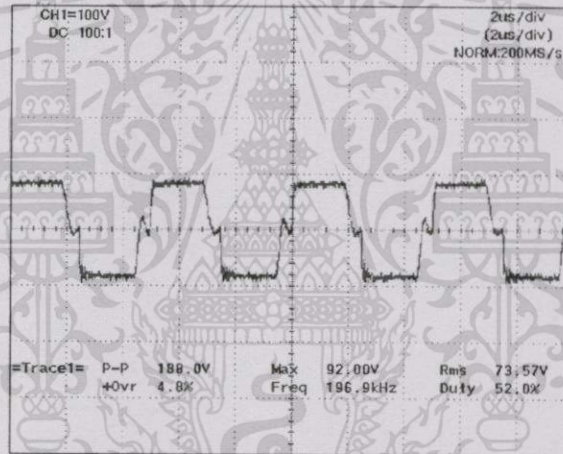
รูปที่ 4.37 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต  $140\text{ V}_{AC}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

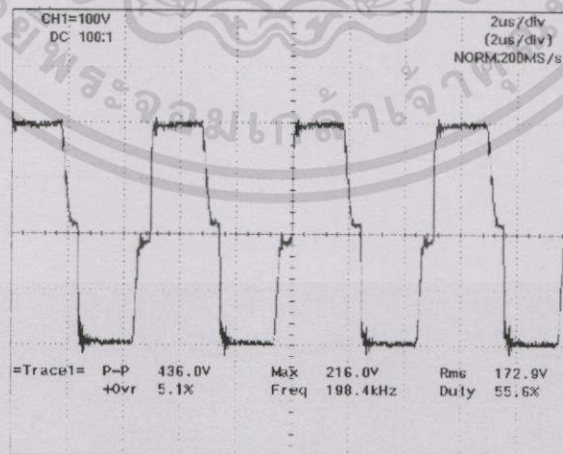


รูปที่ 4.38 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220 V<sub>AC</sub>

8. ที่ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 5 หลอด

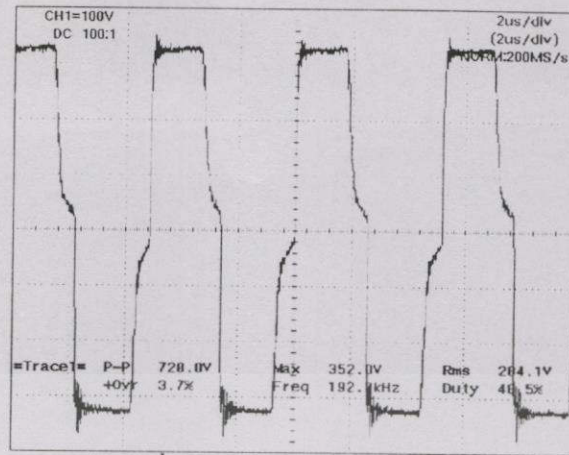


รูปที่ 4.39 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V<sub>AC</sub>



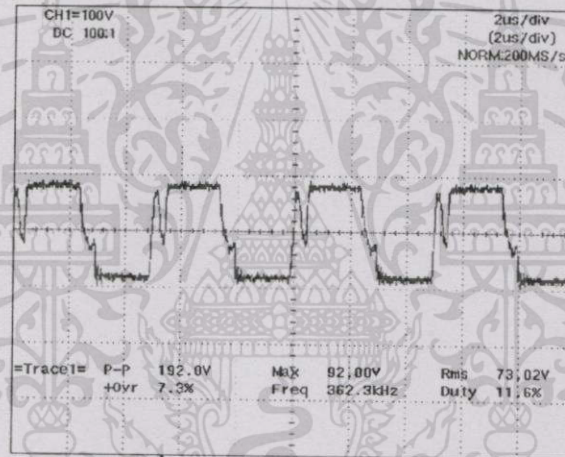
รูปที่ 4.40 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V<sub>AC</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

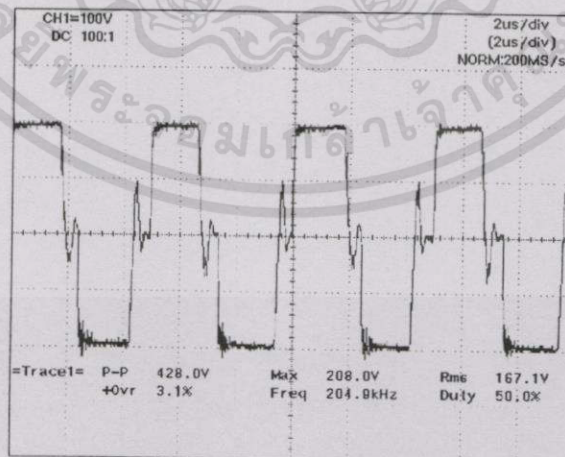


รูปที่ 4.41 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220 V<sub>AC</sub>

9. ที่ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 10 หลอด

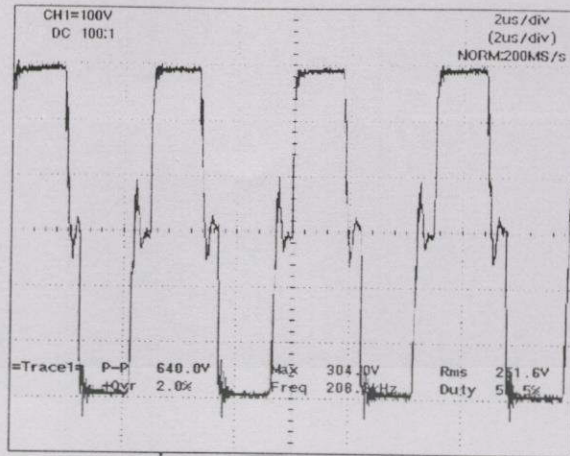


รูปที่ 4.42 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V<sub>AC</sub>



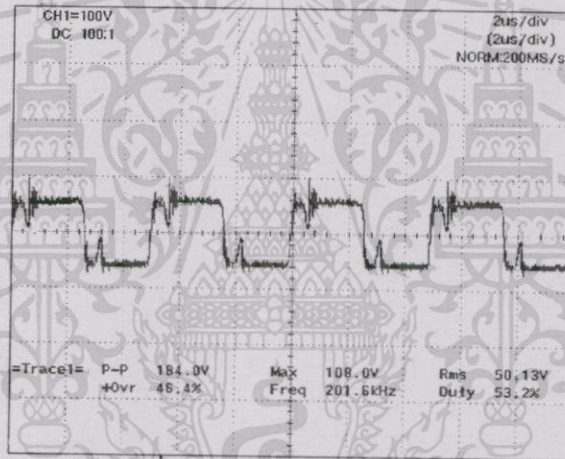
รูปที่ 4.43 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V<sub>AC</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

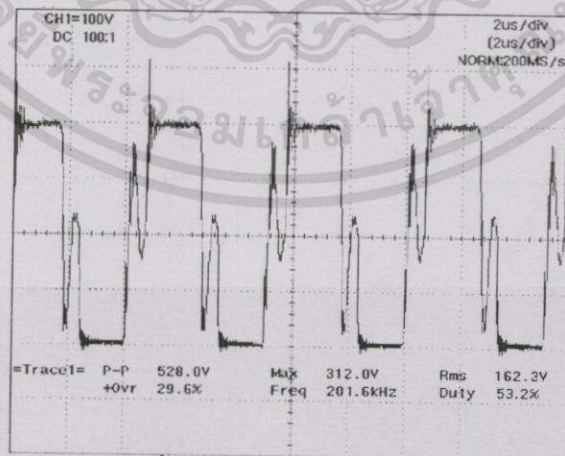


รูปที่ 4.44 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต  $220\text{ V}_{AC}$

10. ที่ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 15 หลอด

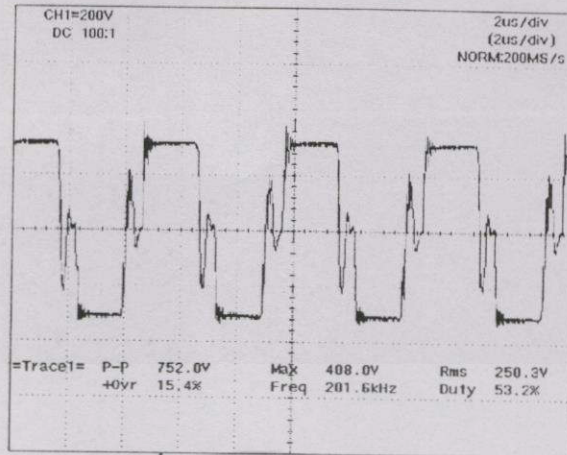


รูปที่ 4.45 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต  $60\text{ V}_{AC}$



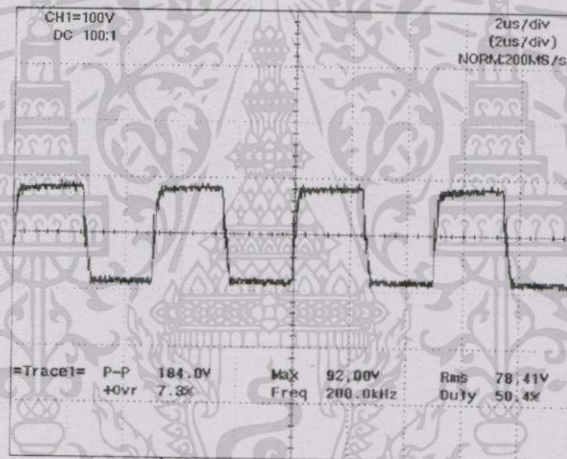
รูปที่ 4.46 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต  $140\text{ V}_{AC}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

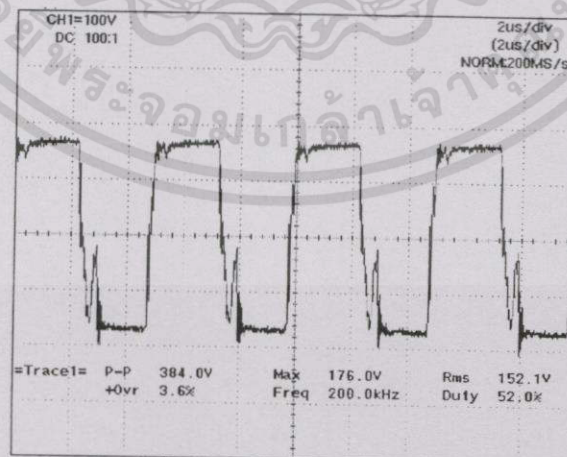


รูปที่ 4.47 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220 V<sub>AC</sub>

11. ที่ความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W จำนวน 20 หลอด

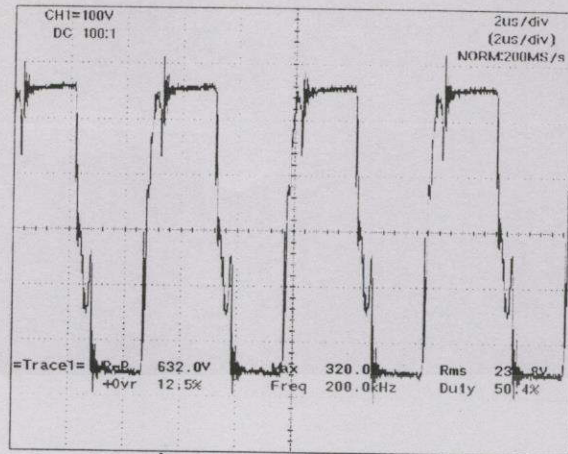


รูปที่ 4.48 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 60 V<sub>AC</sub>



รูปที่ 4.49 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 140 V<sub>AC</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.50 สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุต 220 V<sub>AC</sub>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด

Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	P.F.	$P_{IN}$ (W)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	%Ripple	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	DC	Inverter
20	1.51	0.67	20.2	27.6	0.6	17.11	2%	21.9	0.74	16.21	85%	80%
40	2.09	0.67	56	51.2	1.0	48.64	2%	41.3	1.10	45.43	87%	81%
60	2.56	0.62	95.2	73.2	1.2	84.18	2%	63.2	1.25	79.00	88%	83%
80	2.97	0.63	149.7	96.5	1.4	135.10	2%	83.3	1.52	126.62	90%	85%
100	3.4	0.64	217.6	122.5	1.6	196.00	2%	103.4	1.76	181.98	90%	84%
120	3.62	0.64	278	140.8	1.8	253.44	2%	123.8	1.88	232.74	91%	84%
140	3.94	0.63	347.5	159	2.0	318.00	2%	142.2	2.03	288.67	92%	83%
160	4.25	0.62	421.6	184	2.1	386.40	2%	161.3	2.17	350.02	92%	83%
180	4.72	0.62	526.8	206	2.4	494.40	2%	181.3	2.32	420.62	94%	80%
200	5.15	0.58	597.4	226	2.5	565.00	2%	201.3	2.43	489.16	95%	82%
220	5.73	0.58	731.1	270	2.6	688.50	2%	221.4	2.62	580.07	94%	79%

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด

Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	P.F.	$P_{IN}$ (W)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	%Ripple	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	DC	Inverter
20	2.16	0.67	28.9	25.4	1	25.40	2%	17.9	1.2	21.48	88%	74%
40	3.4	0.68	92.5	51.1	1.6	81.76	2%	38	1.95	74.10	88%	80%
60	3.81	0.69	157.7	78.8	1.7	133.96	2%	57.8	2.1	121.38	85%	77%
80	4.17	0.68	226.8	104.1	1.9	197.79	2%	75.7	2.45	185.47	87%	82%
100	4.74	0.68	322.3	130	2.2	286.00	2%	94	2.74	257.56	89%	80%
120	5.2	0.68	424.3	156.4	2.5	391.00	2%	112.8	3	338.40	92%	80%
140	5.47	0.67	513.1	179	2.7	483.30	2%	136.2	3.11	423.58	94%	83%
160	6.93	0.66	731.8	215	3.2	688.00	2%	166.6	3.54	589.76	94%	81%
180	7.44	0.64	857.1	234	3.4	795.60	2%	185.5	3.75	695.63	93%	81%
200	8.61	0.62	1067.6	269.1	3.6	968.76	2%	205.9	4.19	862.72	91%	81%
220	8.94	0.62	1219.4	291.9	3.8	1109.22	2%	223.7	4.4	984.28	91%	81%

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด

Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	P.F.	$P_{IN}$ (W)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	%Ripple	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	DC	Inverter
20	2.81	0.69	38.8	26	1.3	33.8	2%	26	1.2	31.20	87%	80%
40	3.89	0.69	107.4	49.7	1.9	94.43	2%	47	1.7	79.90	88%	74%
60	4.61	0.69	190.9	80.7	2	161.4	2%	57.1	2.6	148.46	85%	78%
80	5.3	0.7	296.8	104.9	2.5	262.25	2%	76.7	3.19	244.67	88%	82%
100	6.03	0.7	422.1	130.8	2.8	366.24	2%	96.5	3.61	348.37	87%	83%
120	6.78	0.69	561.4	155.6	3.2	497.92	2%	116.3	3.99	464.04	89%	83%
140	7.76	0.69	749.6	185.4	3.7	685.98	2%	142.2	4.41	627.10	92%	84%
160	8.57	0.67	918.7	205.1	4.2	861.42	2%	161.2	4.74	764.09	94%	83%
180	9.65	0.64	1111.7	242.3	4.4	1066.12	2%	181.3	5.08	921.00	96%	83%
200	10.9	0.62	1351.6	272.3	4.6	1252.58	2%	204.4	5.42	1107.85	93%	82%
220	11.1	0.61	1489.6	294.7	4.8	1414.56	2%	224.8	5.42	1218.42	95%	82%

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองความถี่ 150 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด

Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	P.F.	$P_{IN}$ (W)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	%Ripple	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	DC	Inverter
20	3.64	0.72	52.4	27.8	1.6	44.48	2%	17.9	2.3	41.17	85%	79%
40	5.11	0.72	147.2	50.9	2.6	132.34	2%	34.6	3.54	122.48	90%	83%
60	6.96	0.73	304.8	71.1	3.9	277.29	2%	52.6	4.68	246.17	91%	81%
80	8.26	0.74	489	101	4.4	444.4	2%	68.1	5.65	384.77	91%	79%
100	9.49	0.74	702.3	125.4	5.2	652.08	2%	88.2	6.32	557.42	93%	79%
120	10.8	0.72	933.1	151.6	5.8	879.28	2%	101.7	7.13	725.12	94%	78%
140	11.9	0.72	1199.5	175	6.5	1137.5	2%	128	7.43	951.04	95%	79%
160	13.1	0.7	1467.2	199.3	7.1	1415.03	2%	146.4	7.95	1163.88	96%	79%
180	14.2	0.68	1738.1	231.5	7.3	1689.95	2%	164.4	8.34	1371.10	97%	79%
200	16.6	0.64	2124.8	259.3	8	2074.4	2%	184.5	8.89	1640.21	98%	77%
220	17.8	0.64	2506.2	294.3	8.4	2472.12	2%	207.9	9.48	1970.89	99%	79%

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด

Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	P.F.	$P_{IN}$ (W)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	%Ripple	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	DC	Inverter
20	1.5	0.64	19.2	26.7	0.6	16.02	2%	18.7	0.78	14.59	83%	76%
40	2.21	0.63	55.7	51.4	0.9	46.26	2%	38.6	1.15	44.39	83%	80%
60	2.63	0.64	101	77.7	1.1	85.47	2%	58.4	1.3	75.92	85%	75%
80	3.03	0.66	160	103.6	1.3	134.68	2%	78	1.55	120.90	84%	76%
100	3.5	0.67	234.5	133.1	1.5	199.65	2%	104	1.74	180.96	85%	77%
120	3.88	0.65	302.6	158.1	1.7	268.77	2%	124.3	1.91	237.41	89%	78%
140	4.28	0.64	383.5	183	1.9	347.7	2%	143.5	2.07	297.05	91%	77%
160	4.81	0.6	461.8	211.1	2	422.2	2%	163	2.19	356.97	91%	77%
180	5.44	0.61	597.3	241.4	2.3	555.22	2%	182.2	2.45	446.39	93%	75%
200	6.24	0.58	723.8	269.2	2.5	673	2%	203.1	2.66	540.25	93%	75%
220	6.56	0.57	822.6	296.7	2.6	771.42	2%	222	2.8	621.60	94%	76%

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด

Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	P.F.	$P_{IN}$ (W)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	%Ripple	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	DC	Inverter
20	2.5	0.65	32.5	25.3	1.1	27.83	2%	18.5	1.25	23.13	86%	71%
40	3.07	0.67	82.3	50.7	1.4	70.98	2%	37.6	1.72	64.67	86%	79%
60	3.7	0.68	151	77.1	1.7	131.07	2%	56.4	2.09	117.88	87%	78%
80	4.28	0.68	232.8	105	1.9	199.5	2%	77.3	2.4	185.52	86%	80%
100	4.93	0.68	335.2	130.8	2.2	287.76	2%	97.5	2.72	265.20	86%	79%
120	5.44	0.67	437.4	152.6	2.5	381.5	2%	115.6	3	346.80	87%	79%
140	6.09	0.67	571.2	175.2	2.9	508.08	2%	134.8	3.27	440.80	89%	77%
160	6.89	0.67	738.6	208.7	3.2	667.84	2%	157.2	3.6	565.92	90%	77%
180	8.05	0.65	941.9	235.4	3.7	870.98	2%	187.7	3.92	735.78	92%	78%
200	9.04	0.63	1139	267.4	4	1069.6	2%	206.4	4.19	864.82	94%	76%
220	9.36	0.62	1276.7	295	4.2	1239	2%	221.8	4.49	995.88	97%	78%

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองความถี่ 175 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด

Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	P.F.	$P_{IN}$ (W)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	%Ripple	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	DC	Inverter
20	2.71	0.69	37.4	25.6	1.3	33.28	2%	16.6	1.78	29.55	89%	79%
40	4.12	0.69	113.7	54.6	1.8	98.28	2%	36.7	2.52	92.48	86%	81%
60	5.11	0.71	217.7	76.8	2.4	184.32	2%	54.8	3.09	169.33	85%	78%
80	6.37	0.72	366.9	102.1	3	306.3	2%	76.2	3.83	291.85	83%	80%
100	6.87	0.72	494.6	126.5	3.4	430.1	2%	94.9	4.14	392.89	87%	79%
120	7.5	0.71	639	150.6	3.7	557.22	2%	115	4.43	509.45	87%	80%
140	8.65	0.69	835.6	181.8	4.2	763.56	2%	135.7	5.03	682.57	91%	82%
160	9.52	0.68	1035.8	208.3	4.6	958.18	2%	153.6	5.38	826.37	93%	80%
180	10.6	0.66	1259.3	235.5	5	1177.5	2%	175.1	5.78	1012.08	94%	80%
200	11.9	0.64	1523.2	266.9	5.4	1441.26	2%	196.5	6.15	1208.48	95%	79%
220	12.7	0.62	1732.3	293.5	5.6	1643.6	2%	214.5	6.45	1383.53	95%	80%

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองความถี่ 175 kHz โหลดโหลดไฟ 100 W 20 หลอด

Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	P.F.	$P_{IN}$ (W)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	%Ripple	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	DC	Inverter
20	3.2	0.62	39.7	28.6	1.2	34.32	2%	14.5	2.17	31.47	86%	79%
40	5.02	0.67	136.9	50.3	2.4	120.72	2%	31.6	3.43	108.39	88%	79%
60	6.21	0.71	296.5	76.1	3.5	266.35	2%	53.2	4.21	223.97	90%	76%
80	7.3	0.7	462.6	100.8	4.2	423.36	2%	71.3	4.95	352.94	92%	76%
100	8.51	0.71	673.8	129	4.7	606.3	2%	90.1	5.65	509.07	90%	76%
120	9.02	0.7	907.2	151.5	5.5	833.25	2%	109.2	6.33	691.24	92%	76%
140	10.9	0.7	1166.2	174.7	6.2	1083.14	2%	127.1	6.88	874.45	93%	75%
160	13.1	0.64	1341.4	190.6	6.6	1257.96	2%	145.2	7.05	1023.66	94%	76%
180	14.2	0.63	1610.3	210.2	7.3	1534.46	2%	160.5	7.65	1227.83	95%	76%
200	15.6	0.6	1992	243.4	7.8	1898.52	2%	180	8.43	1517.40	95%	76%
220	17.1	0.61	2388.8	277.4	8.3	2302.42	2%	198.6	8.96	1779.46	96%	74%

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด

Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	P.F.	$P_{IN}$ (W)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	%Ripple	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	DC	Inverter
20	1.4	0.67	18.8	23.7	0.7	16.59	2%	18.7	0.75	14.03	88%	75%
40	2.1	0.66	55.4	50	1	50	2%	37.4	1.02	38.15	90%	69%
60	2.6	0.67	104.5	76.8	1.2	92.16	2%	57.8	1.27	73.41	88%	70%
80	2.99	0.66	157.9	102.3	1.3	132.99	2%	77.4	1.48	114.55	84%	73%
100	3.81	0.66	251.5	133.9	1.5	200.85	2%	101.6	1.75	177.80	80%	71%
120	3.85	0.63	291.1	148.7	1.6	237.92	2%	119	1.74	207.06	82%	71%
140	4.23	0.65	384.9	183.2	1.8	329.76	2%	138.4	2.02	279.57	86%	73%
160	4.56	0.61	445.1	201	2	402	2%	158.5	2.05	324.93	90%	73%
180	5.23	0.62	583.7	248.3	2.2	546.26	2%	179	2.33	417.07	94%	71%
200	5.78	0.59	682	276.8	2.3	636.64	2%	198.7	2.46	488.80	93%	72%
220	6.51	0.56	802	313.4	2.4	752.16	2%	218.7	2.64	577.37	94%	72%

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองความถี่ 2000 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด

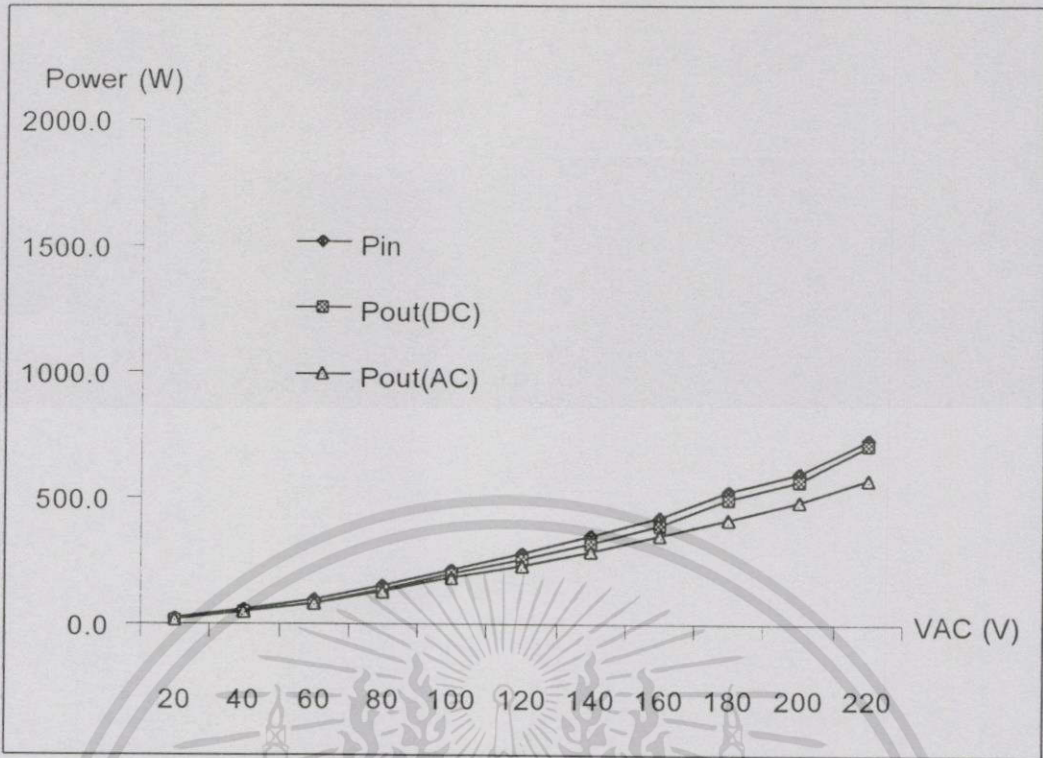
Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	P.F.	$P_{IN}$ (W)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	%Ripple	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	DC	Inverter
20	2.17	0.65	28.2	21.4	1.1	23.54	2%	17.4	1.21	21.05	83%	75%
40	3.17	0.66	83.7	53.9	1.3	70.07	2%	36.4	1.78	64.79	84%	77%
60	3.76	0.68	153.4	79.6	1.5	119.4	2%	54.8	2.07	113.44	78%	74%
80	4.32	0.67	231.6	97.6	1.9	185.44	2%	74	2.34	173.16	80%	75%
100	4.82	0.68	327.8	129.2	2.1	271.32	2%	91.5	2.71	247.97	83%	76%
120	5.4	0.69	447.1	153.5	2.4	368.4	2%	110.2	3	330.60	82%	74%
140	6.03	0.68	574.1	183.5	2.7	495.45	2%	131.5	3.2	420.80	86%	73%
160	6.69	0.67	717.2	210.7	3	632.1	2%	150.4	3.55	533.92	88%	74%
180	7.02	0.66	834	234.3	3.3	773.19	2%	169.5	3.66	620.37	93%	74%
200	7.8	0.62	967.2	260.6	3.5	912.1	2%	188.2	3.81	717.04	94%	74%
220	9.4	0.6	1240.8	294.8	4	1179.2	2%	214.6	4.21	903.47	95%	73%

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด

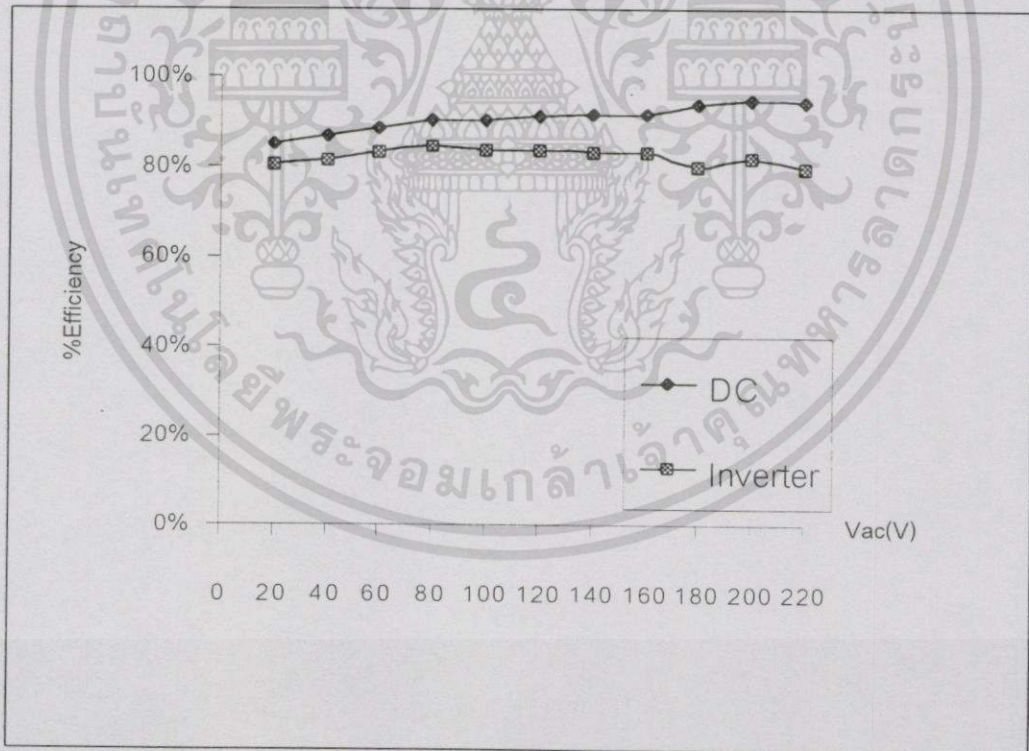
Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}(V)$	$I_{AC}(A)$	P.F.	$P_{IN}(W)$	$V_{DC}(V)$	$I_{DC}(A)$	$P_{OUT}(W)$	%Ripple	$V_{OUT}(V)$	$I_{OUT}(A)$	$P_{OUT}(W)$	DC	Inverter
20	2.45	0.66	32.3	24.9	1.1	27.39	2%	15.1	1.62	24.46	85%	76%
40	3.55	0.68	96.6	51.5	1.6	82.4	2%	31.1	2.41	74.95	85%	78%
60	4.51	0.69	186.7	76.5	2.1	160.65	2%	50.5	2.88	145.44	86%	78%
80	5.01	0.68	272.5	102.3	2.4	245.52	2%	67	3.12	209.04	90%	77%
100	5.82	0.7	407.4	126.4	2.9	366.56	2%	84.5	3.61	305.05	90%	75%
120	6.41	0.69	530.7	147.3	3.3	486.09	2%	98.8	4.17	412.00	92%	78%
140	7.31	0.69	706.1	178.6	3.6	642.96	2%	118.3	4.45	526.44	91%	75%
160	8.13	0.67	871.5	205.7	3.9	802.23	2%	134.8	4.78	644.34	92%	74%
180	9.12	0.64	1050.6	237.6	4.1	974.16	2%	149.8	5.43	813.41	93%	77%
200	10.2	0.62	1264.8	265.7	4.5	1195.65	2%	165.6	5.84	967.10	95%	76%
220	10.9	0.62	1486.8	290	4.8	1392	2%	182.6	6.25	1141.25	94%	77%

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองความถี่ 200 kHz โหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด

Input Rectifier				Output DC				Output Inverter			% Eff. Output	
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	P.F.	$P_{IN}$ (W)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	%Ripple	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	DC	Inverter
20	3.12	0.51	31.8	20.3	1.4	28.42	2%	14.6	1.75	25.55	89%	80%
40	4.94	0.66	130.4	50.3	2.2	110.66	2%	30.8	3.26	100.41	85%	77%
60	6.9	0.71	293.9	79.2	3.3	261.36	2%	48.5	4.57	221.65	89%	75%
80	8.23	0.72	474	103.3	4.3	444.19	2%	65.8	5.36	352.69	94%	74%
100	9.22	0.71	654.6	124.3	5	621.5	2%	83.2	5.85	486.72	95%	74%
120	10.4	0.71	886.1	147.3	5.7	839.61	2%	98.6	6.67	657.66	95%	74%
140	11.1	0.68	1056.7	155.7	6.5	1012.05	2%	114.6	6.87	787.30	96%	75%
160	12.4	0.68	1349.1	187.2	6.9	1291.68	2%	129.8	7.62	989.08	96%	73%
180	13.3	0.66	1580	207.6	7.2	1494.72	2%	148.6	7.82	1162.05	95%	74%
200	14.9	0.64	1907.2	234.6	7.6	1782.96	2%	165.2	8.52	1407.50	93%	74%
220	16	0.63	2217.6	264.8	7.9	2091.92	2%	179.2	8.87	1589.50	94%	72%

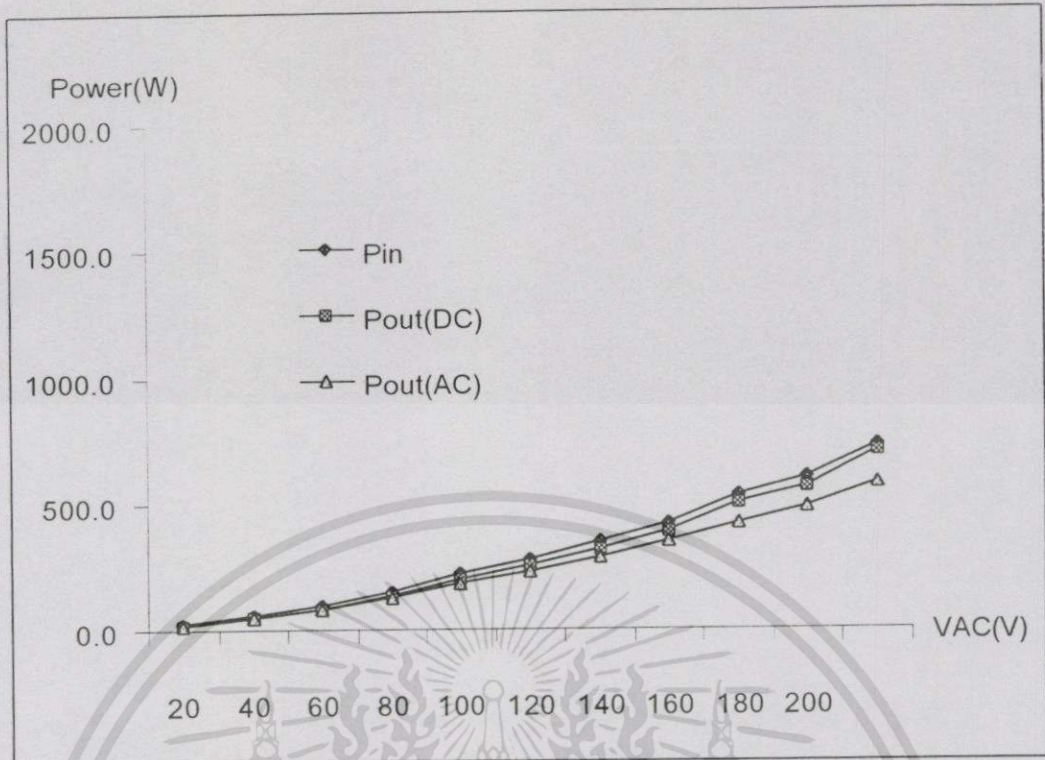


รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz  
 ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด



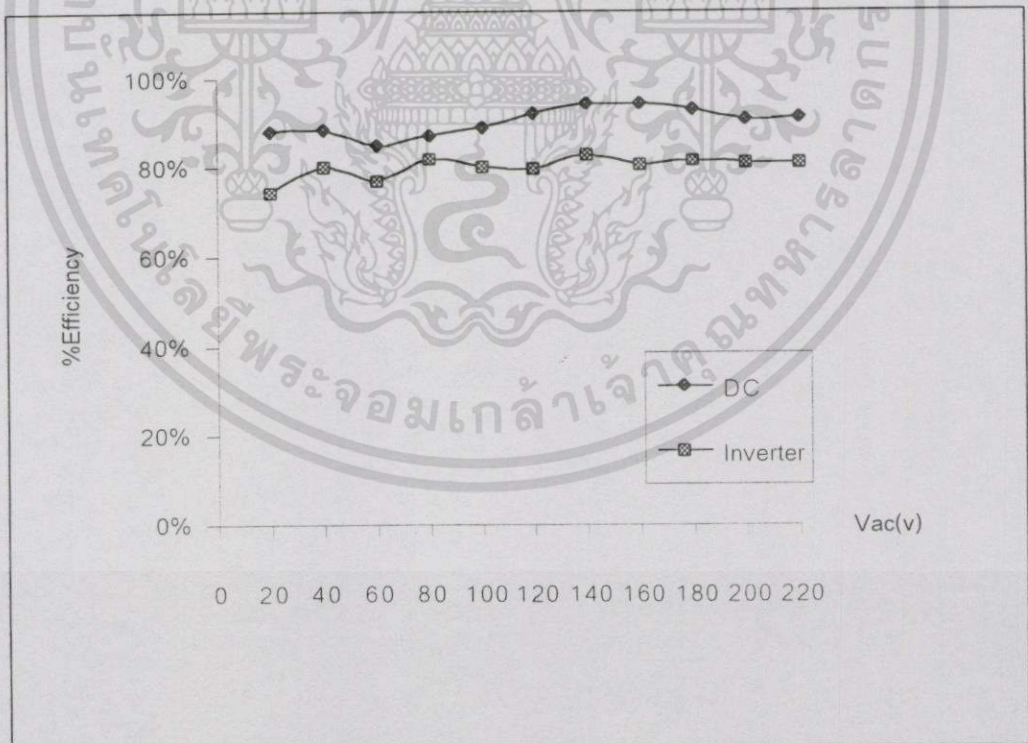
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz  
 ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz

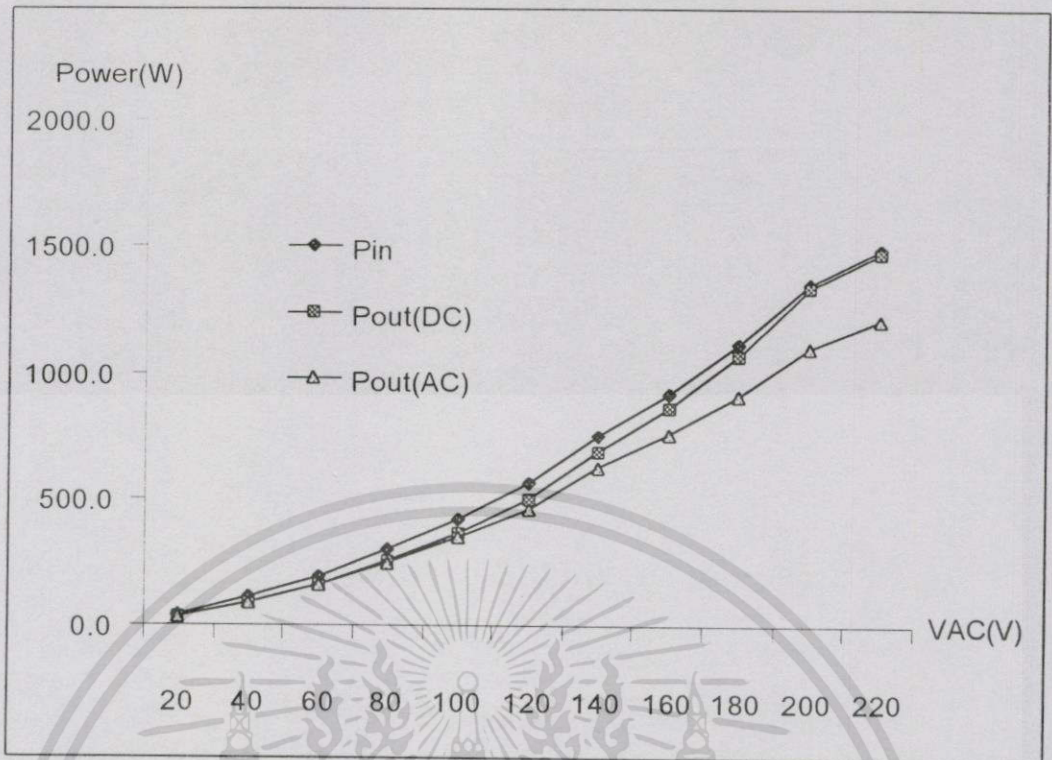
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด



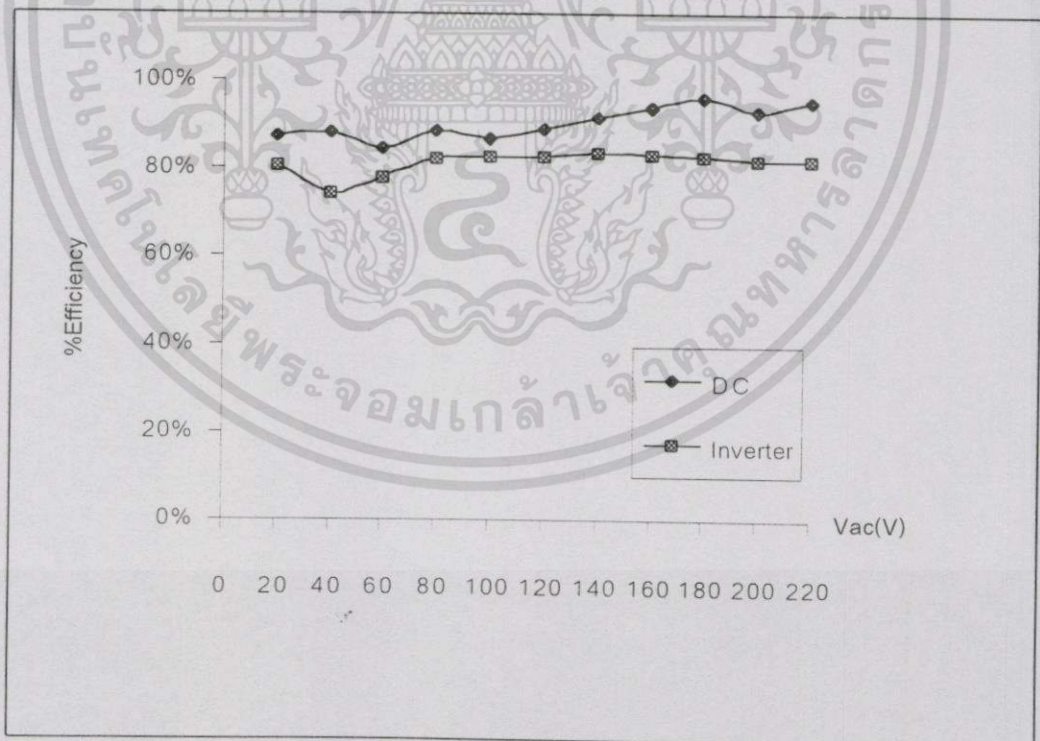
รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz

ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

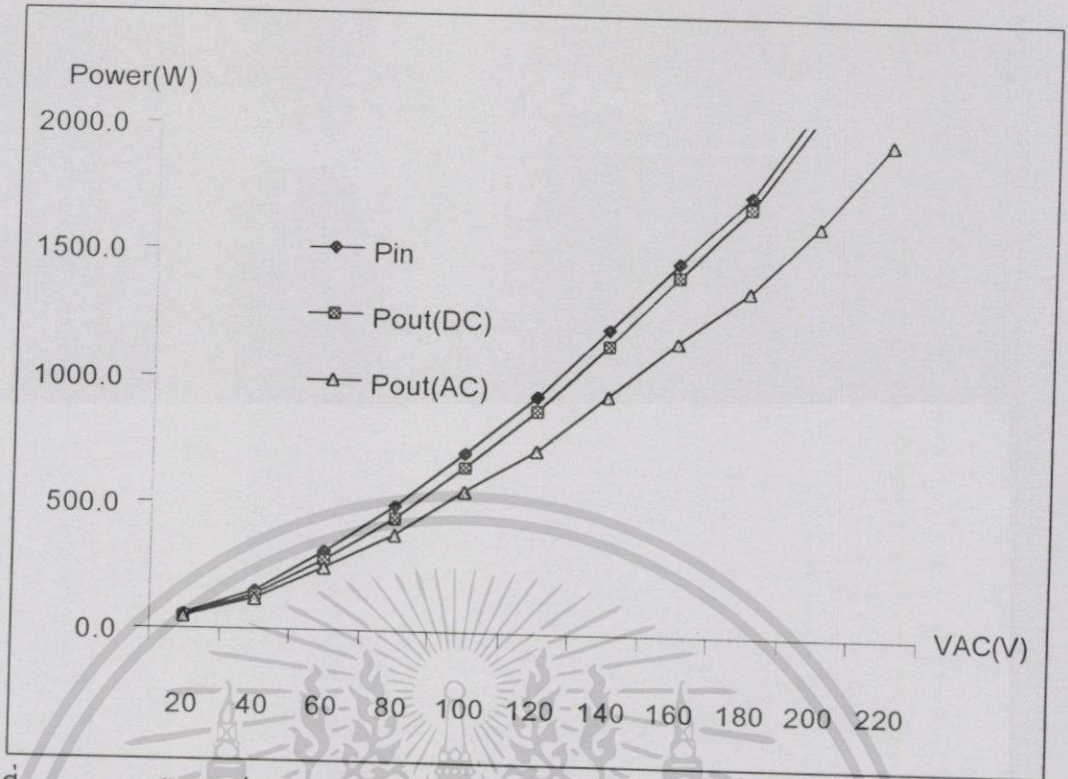


รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด

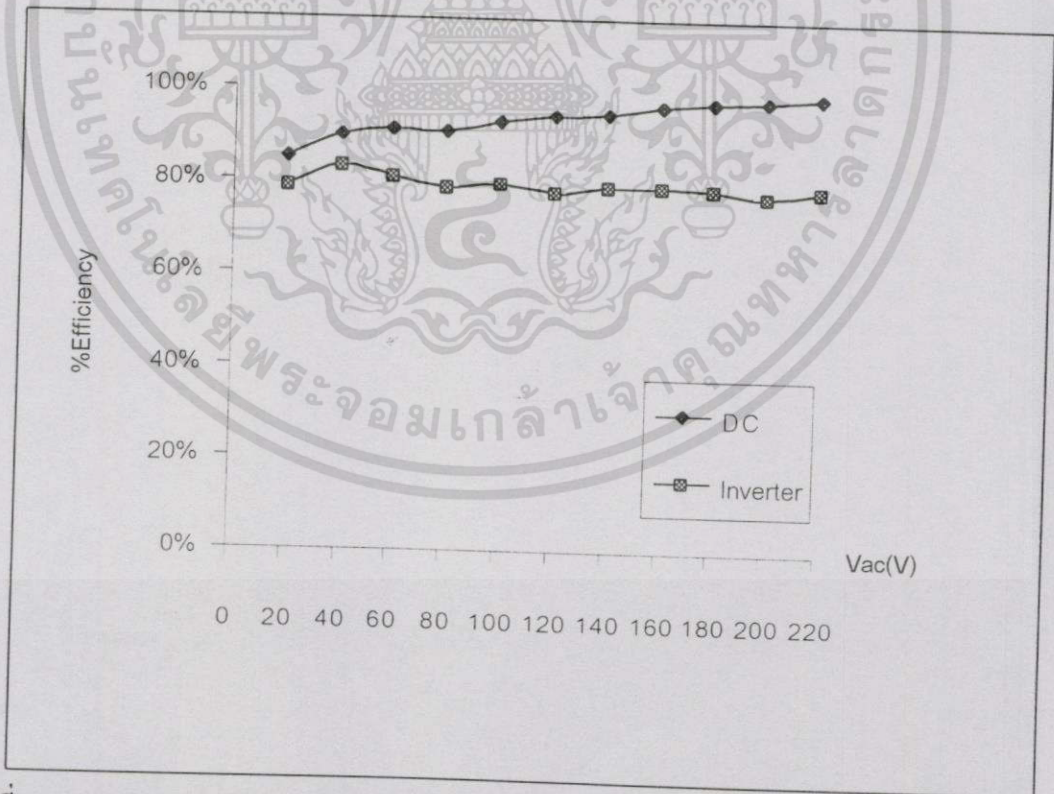


รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

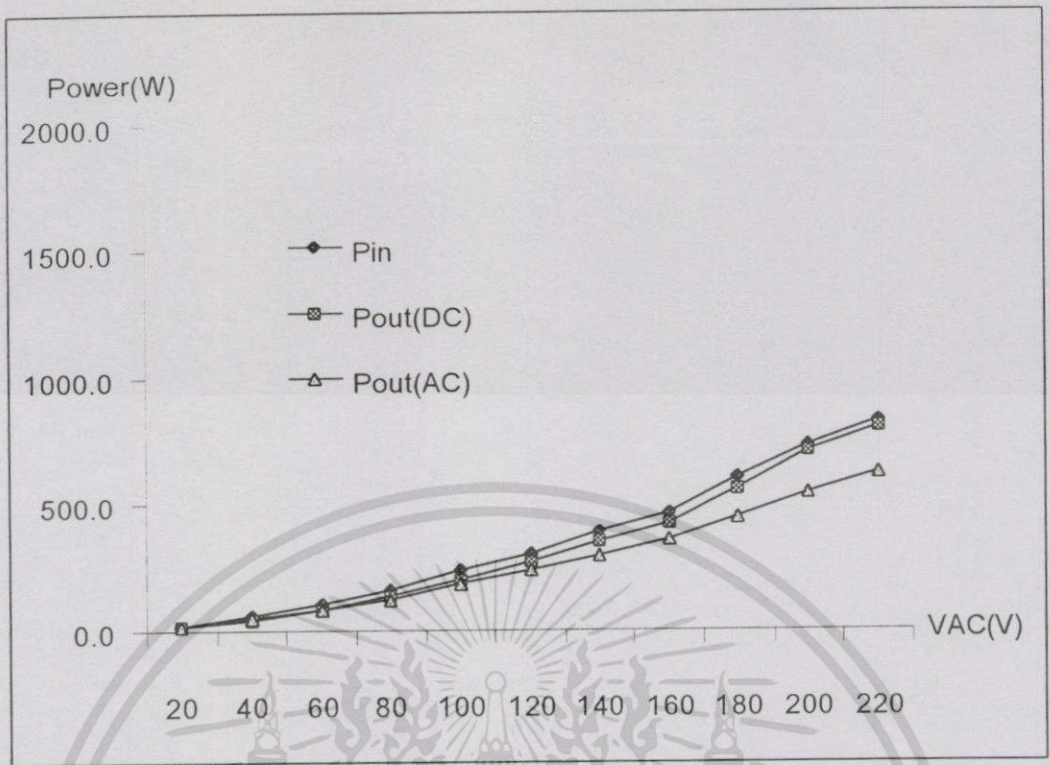


รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด

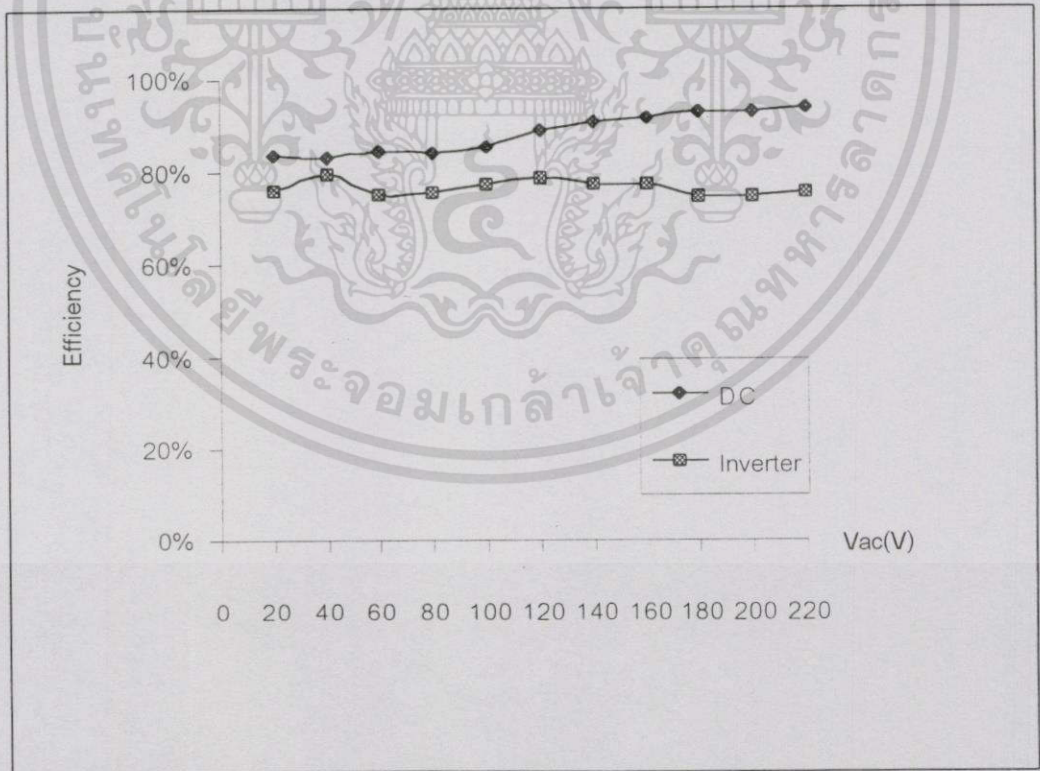


รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 150 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

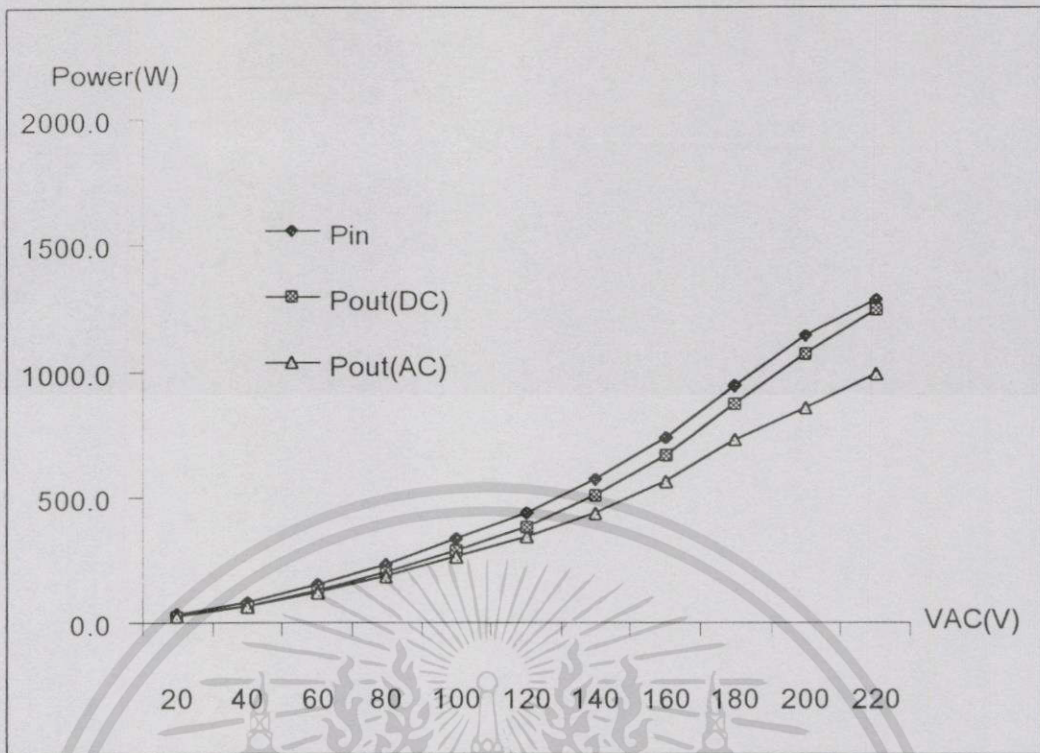


รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด



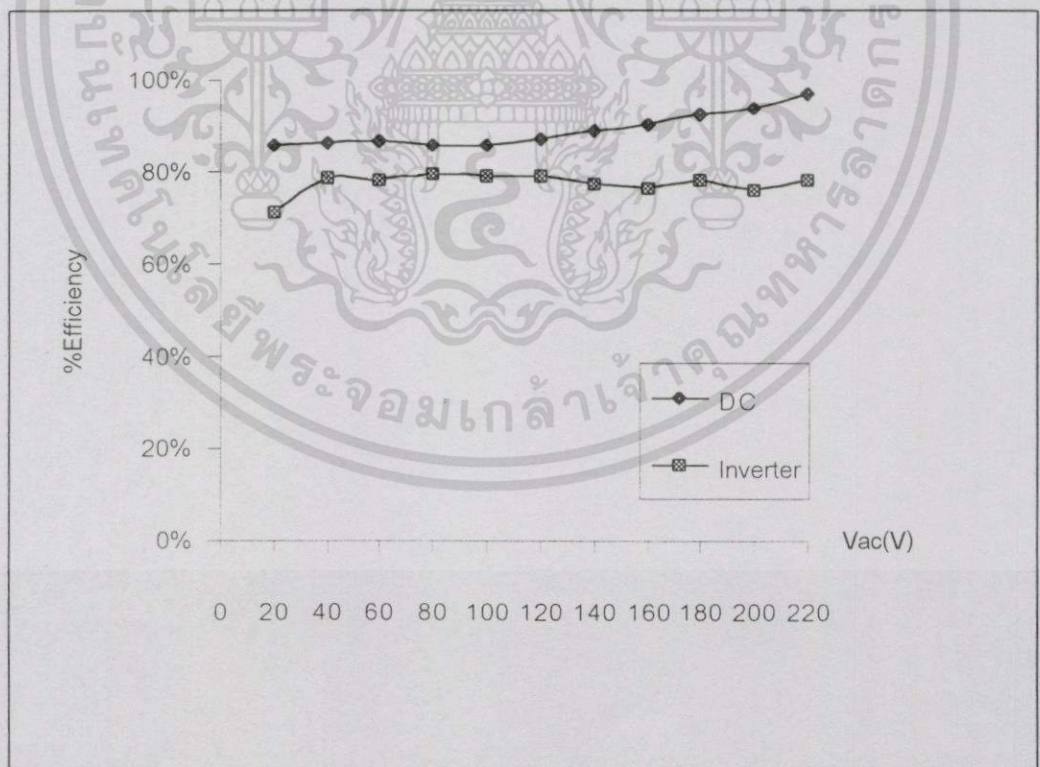
รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 5 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz

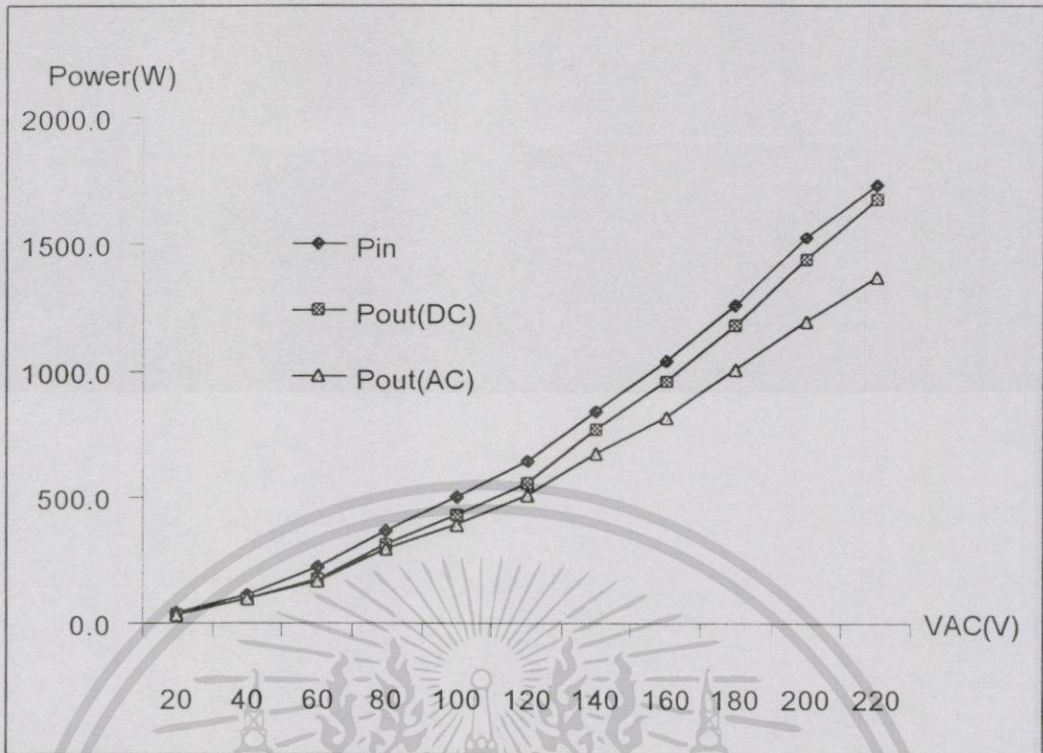
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด



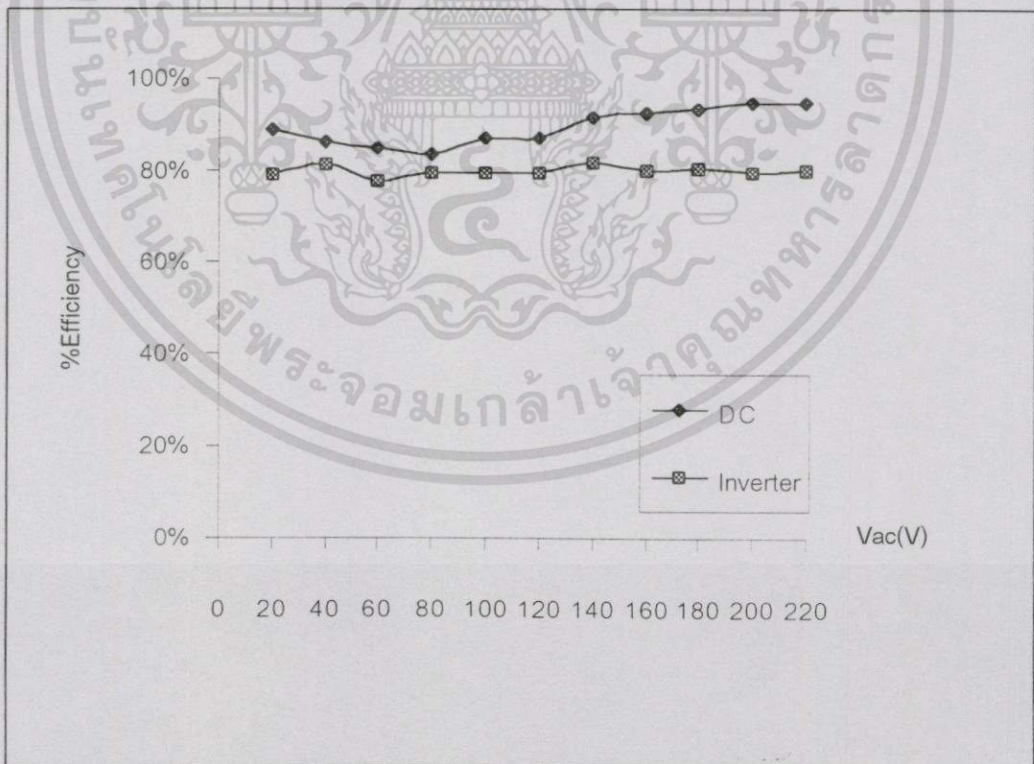
รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz

ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

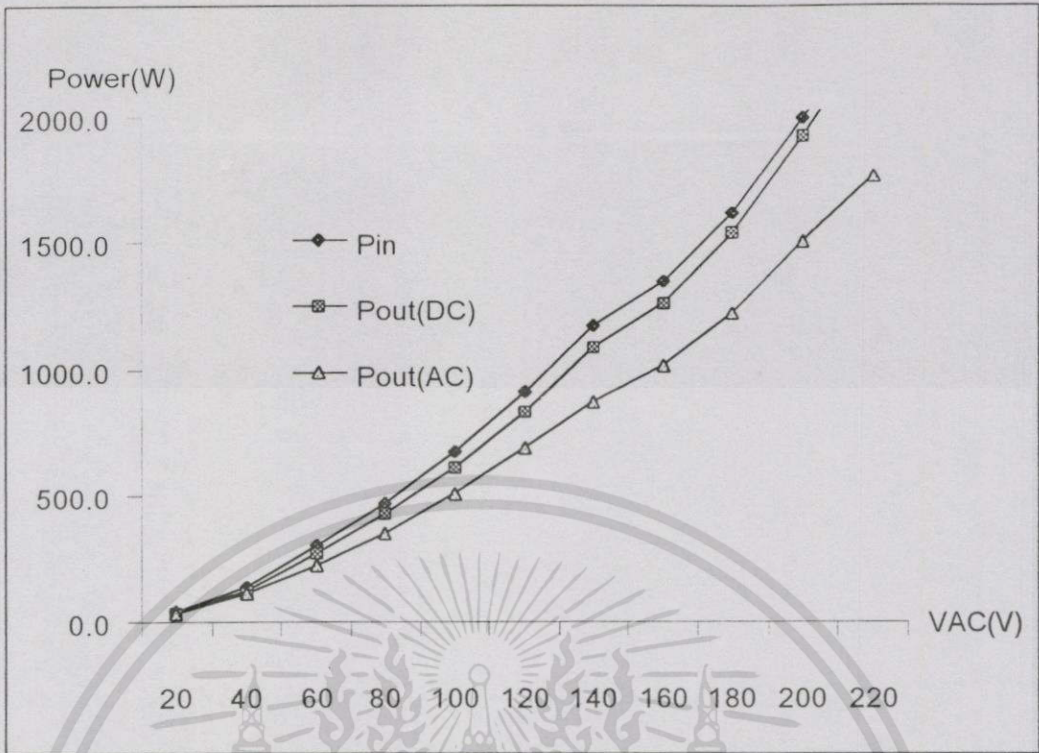


รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด

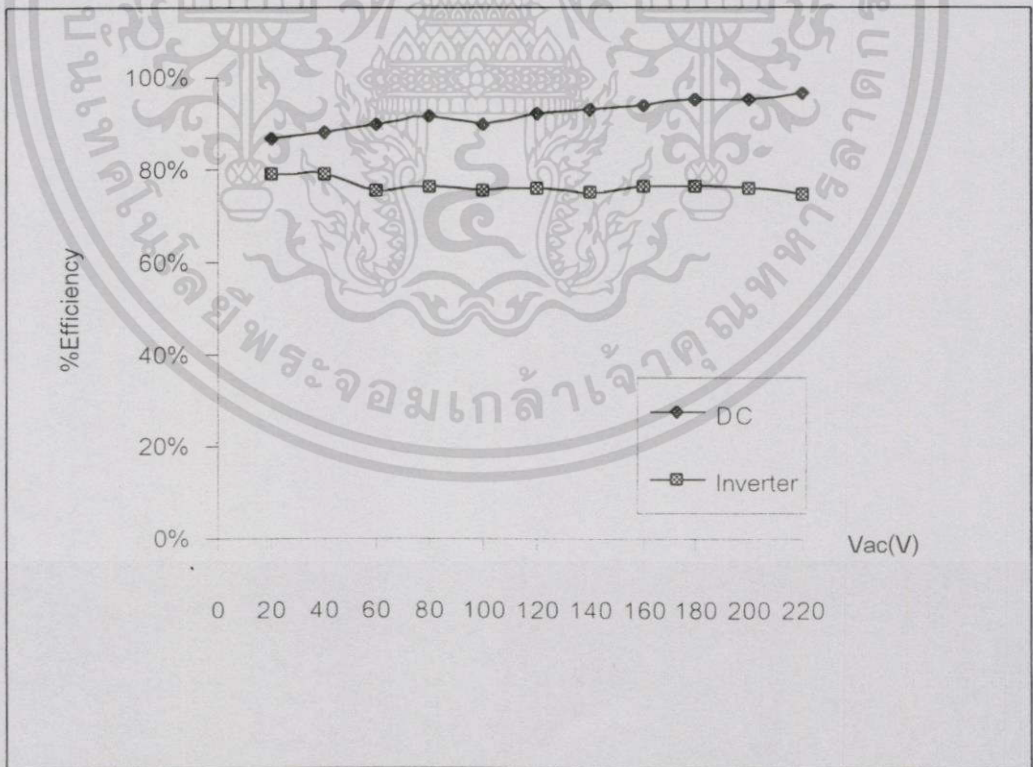


รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

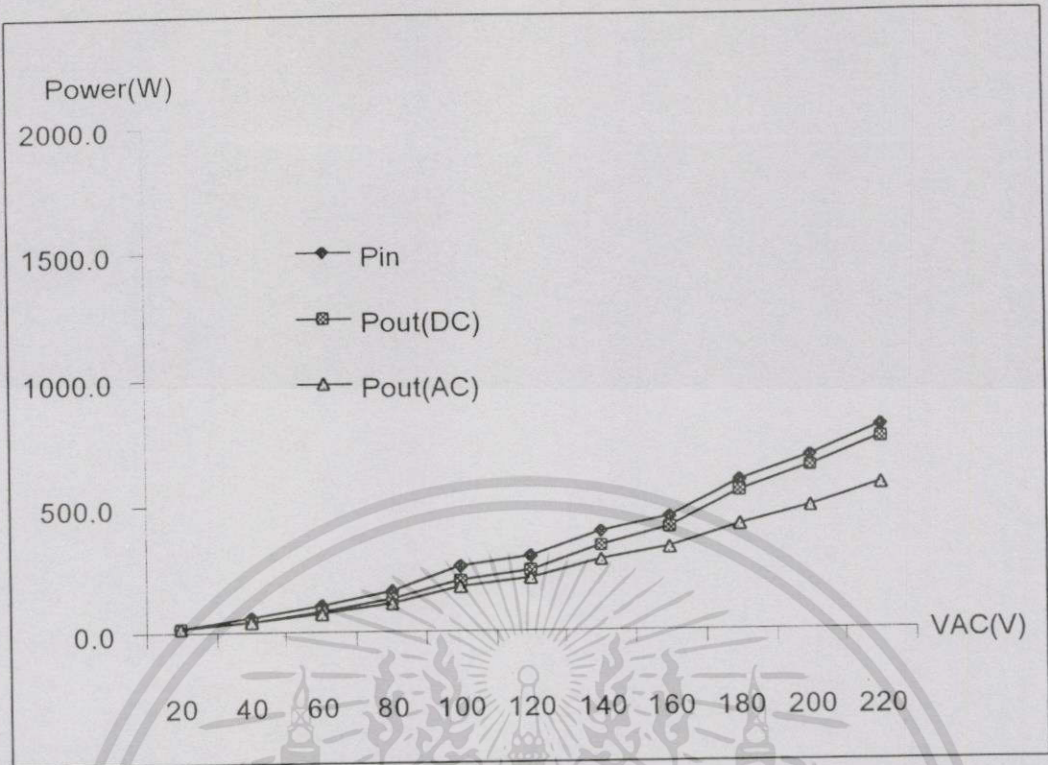


รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด

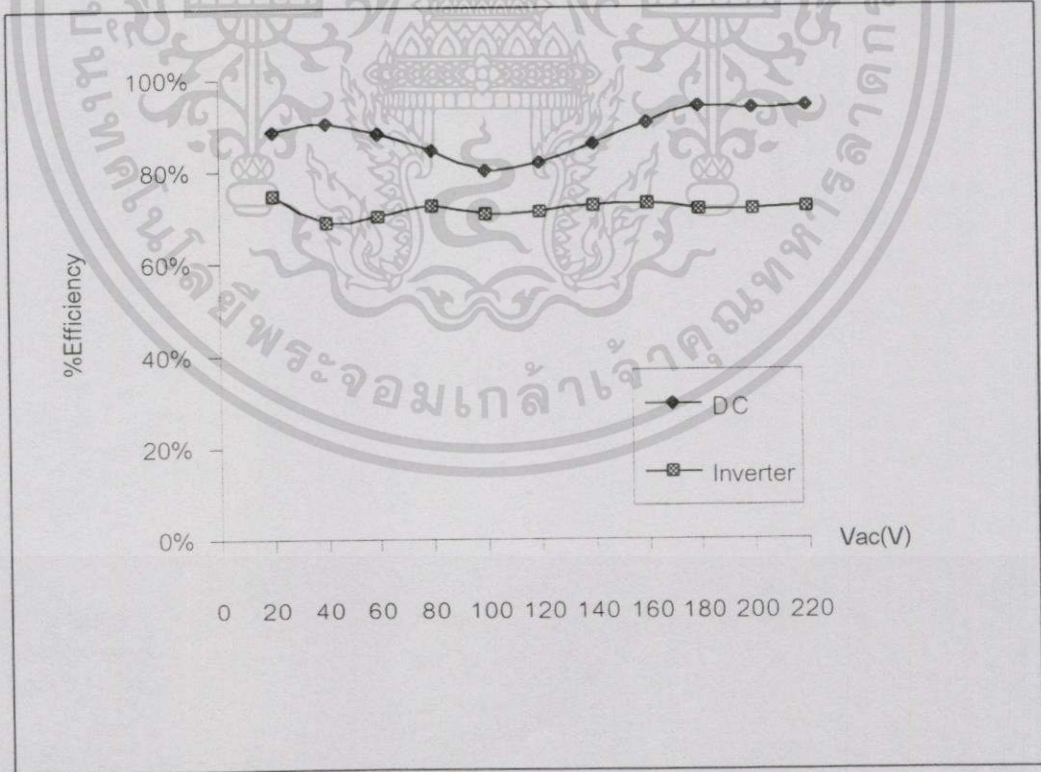


รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 175 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

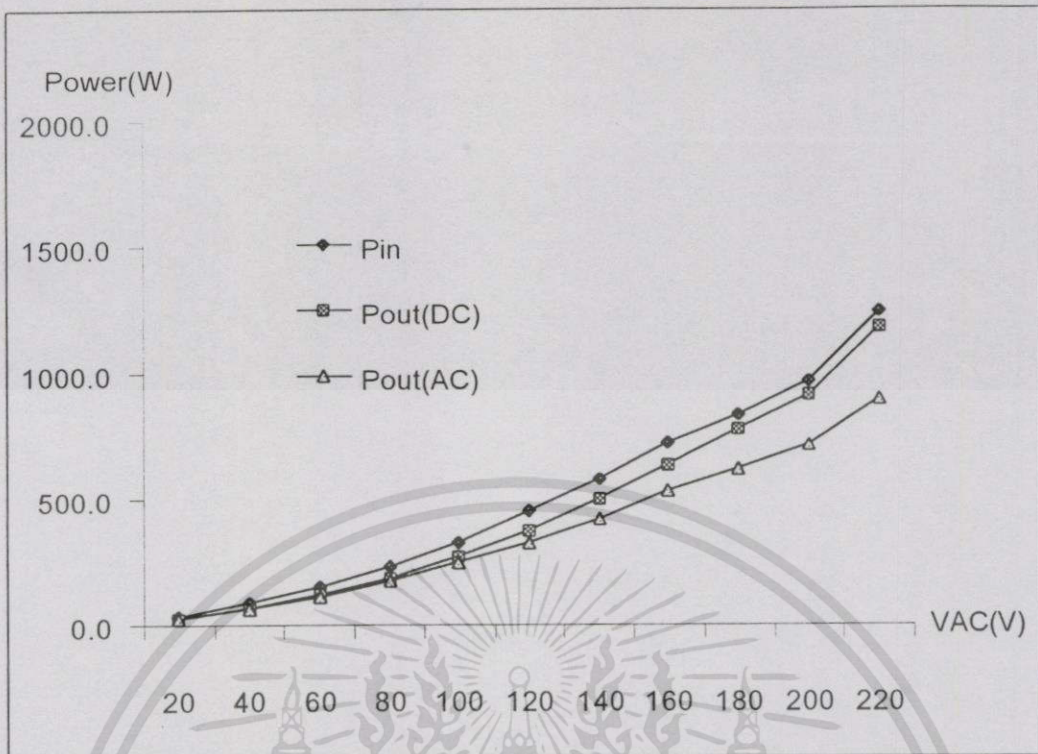


รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz  
ภาระโหลดตลอดไฟ 100 W 5 หลอด



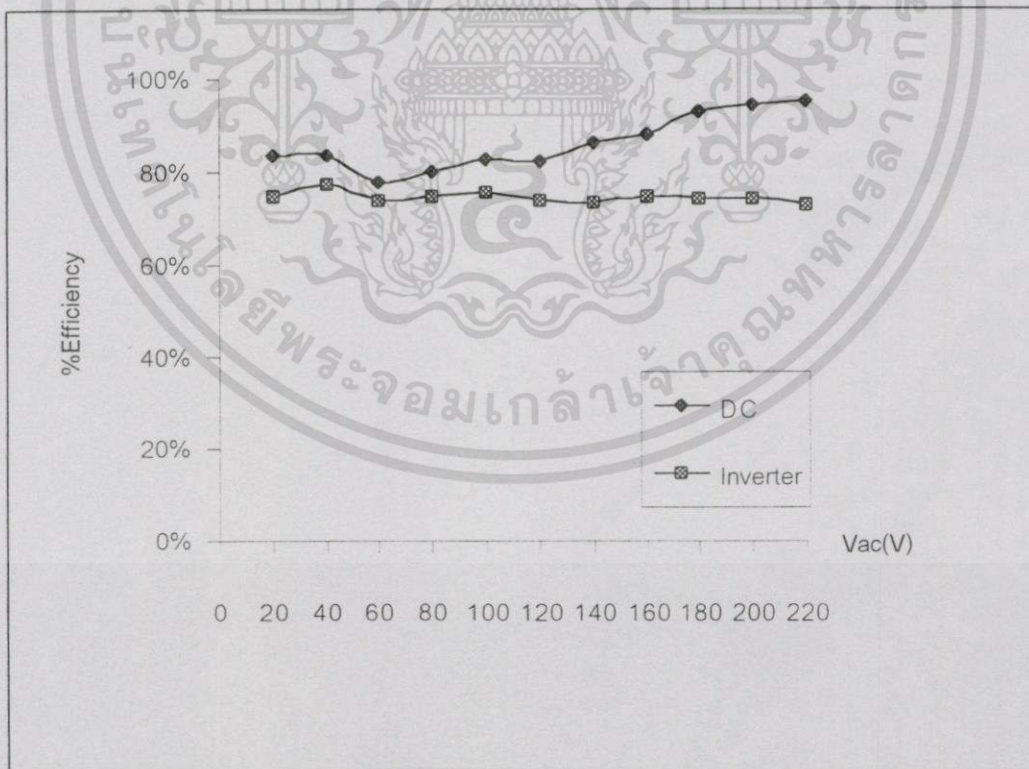
รูปที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz  
ภาระโหลดตลอดไฟ 100 W 5 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz

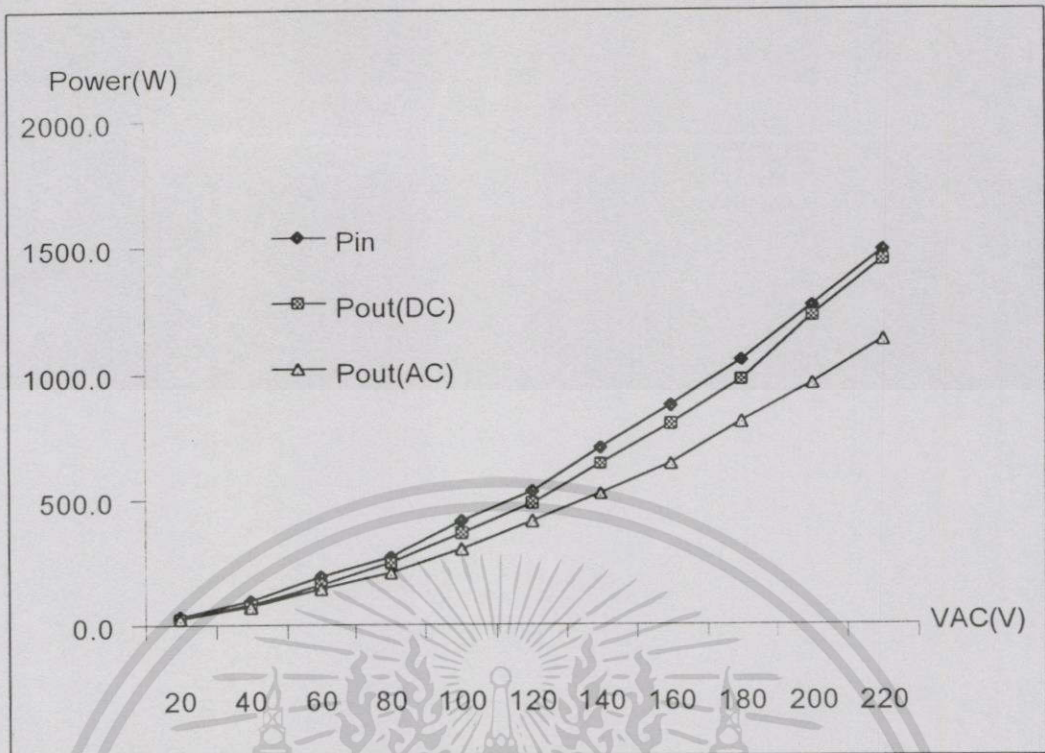
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด



รูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz

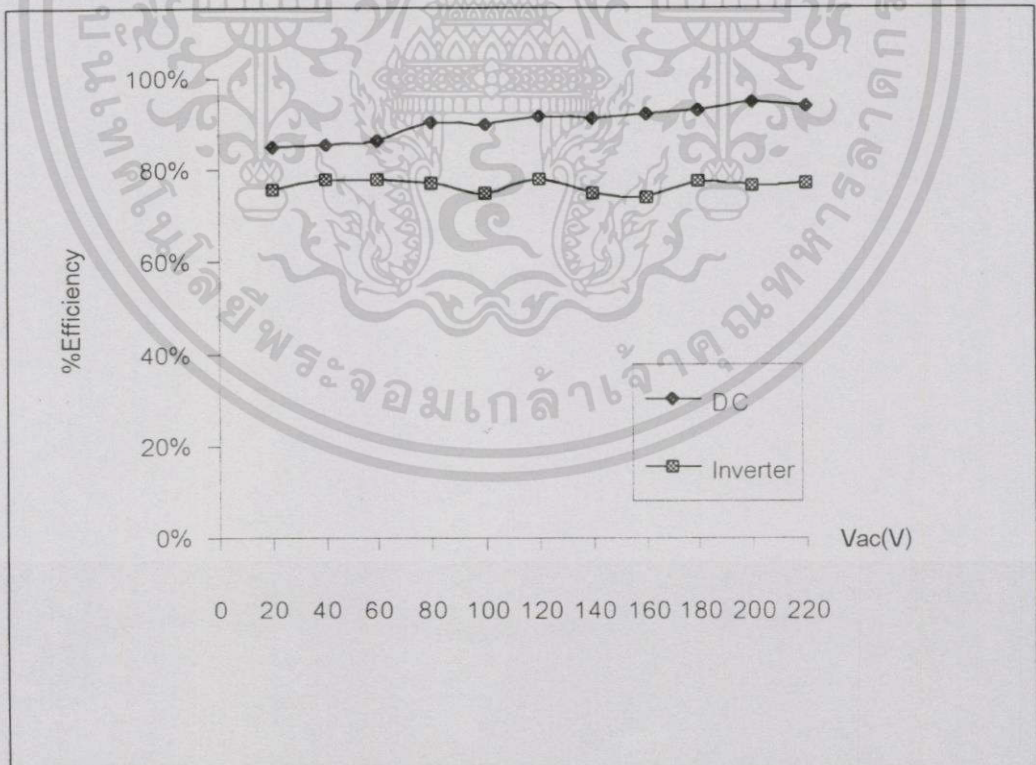
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 10 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz

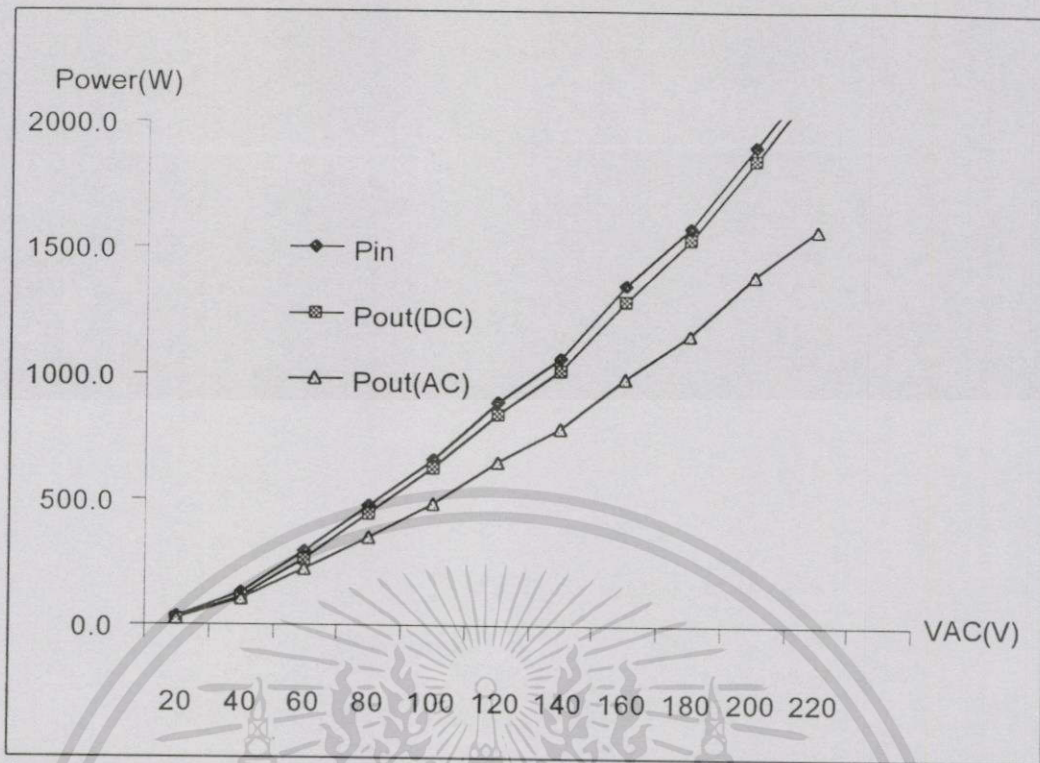
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด



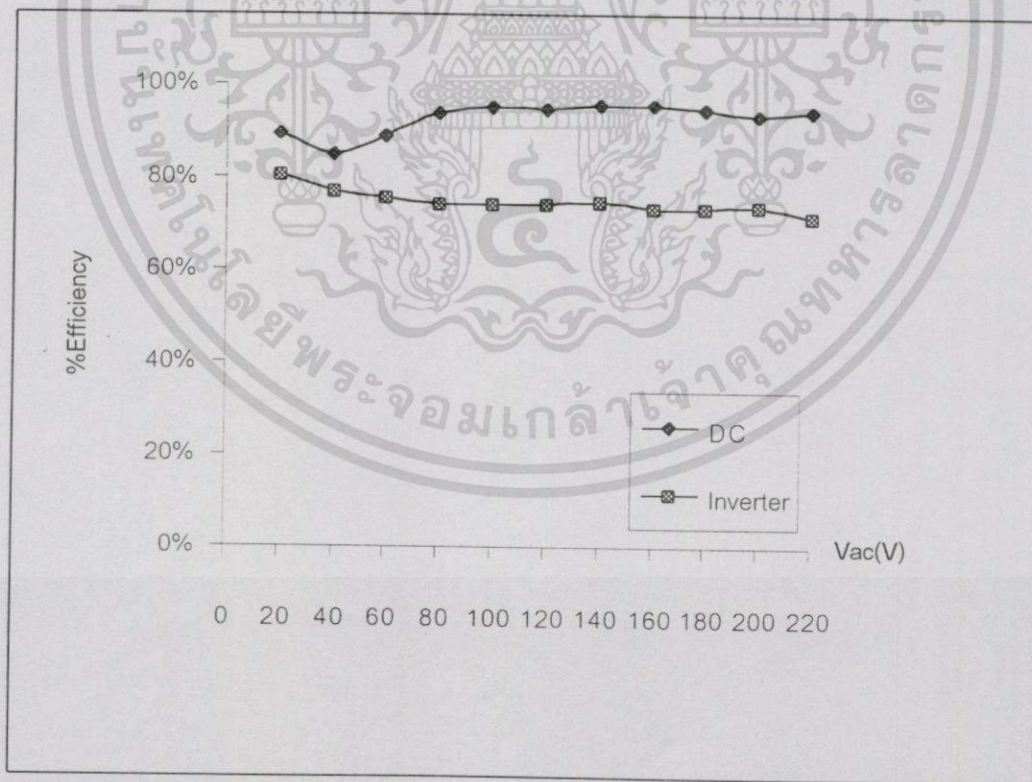
รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz

ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 15 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด



รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับแรงดัน ที่ความถี่ 200 kHz  
ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด

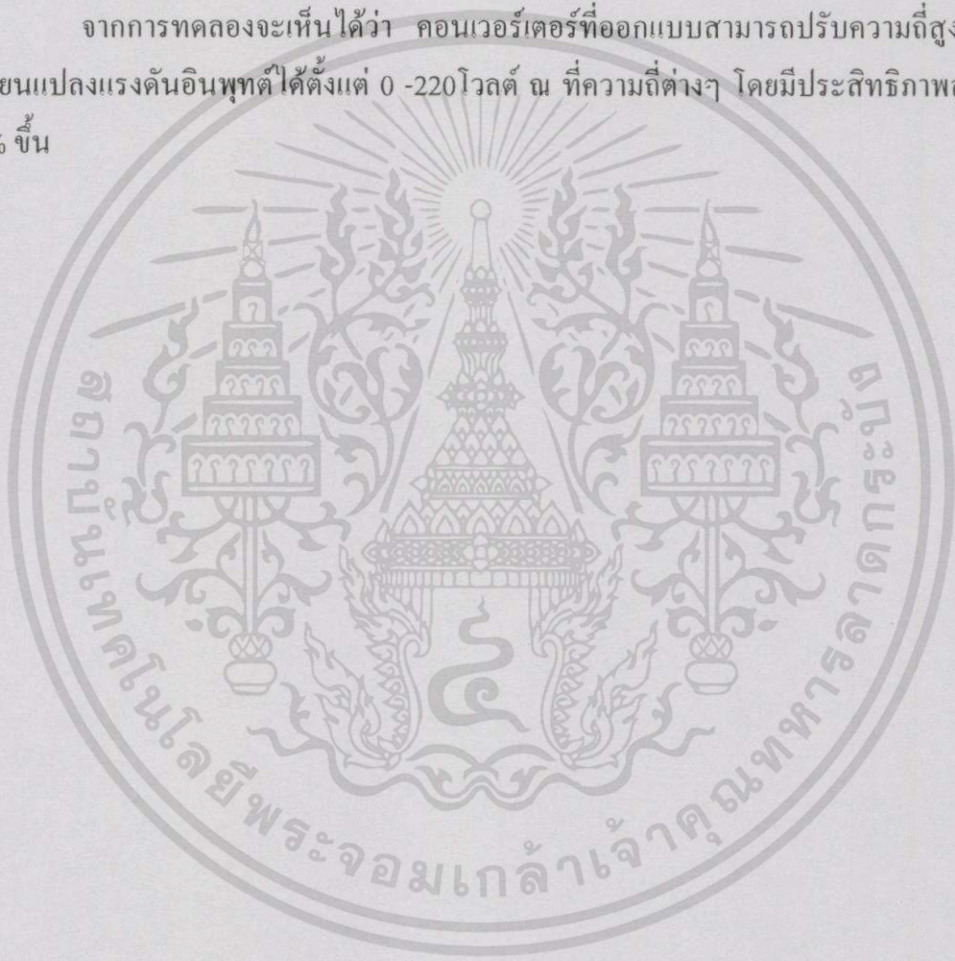
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 150-200 kHz เครื่องต้นแบบ สามารถที่จะจ่ายแรงดันได้ โดยที่เปลี่ยนแปลงความถี่ด้วย และสามารถเพิ่ม ภาระโหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด โดยจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเข้าไปในส่วนแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ และต่อจากนั้นกำลังไฟฟ้าอีกส่วนจะไปสูญเสียในส่วนของชุดอินเวอร์เตอร์

ประสิทธิภาพของส่วนเรกติไฟลิ่งก็จะมากกว่า ประสิทธิภาพรวมที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ โดยที่ประสิทธิภาพรวมทั้งอินเวอร์เตอร์ก็จะอยู่ที่ประมาณ 70 – 80 %

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า คอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบสามารถปรับความถี่สูงได้ และเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตได้ตั้งแต่ 0 -220 โวลต์ ณ ที่ความถี่ต่างๆ โดยมีประสิทธิภาพสูงสุด 70-80% ขึ้น

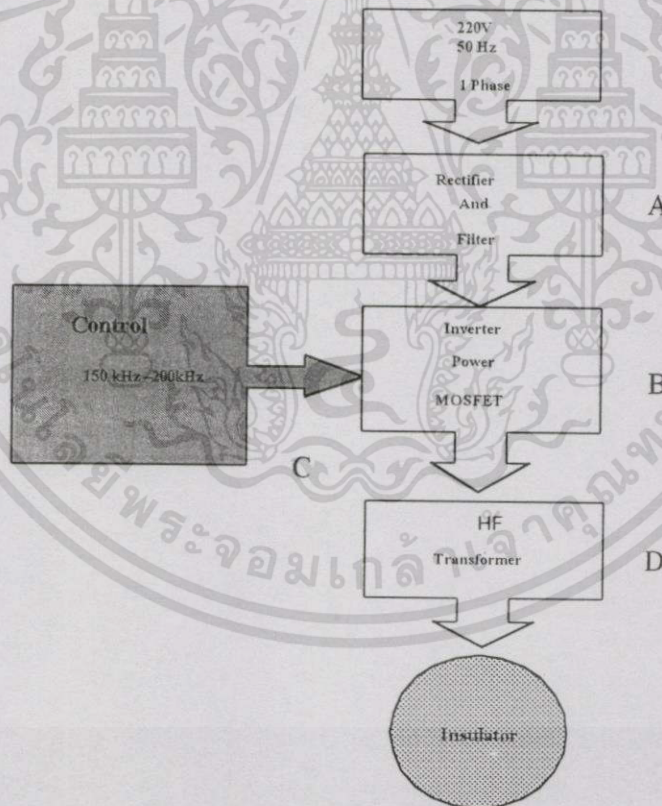


# บทที่ 5

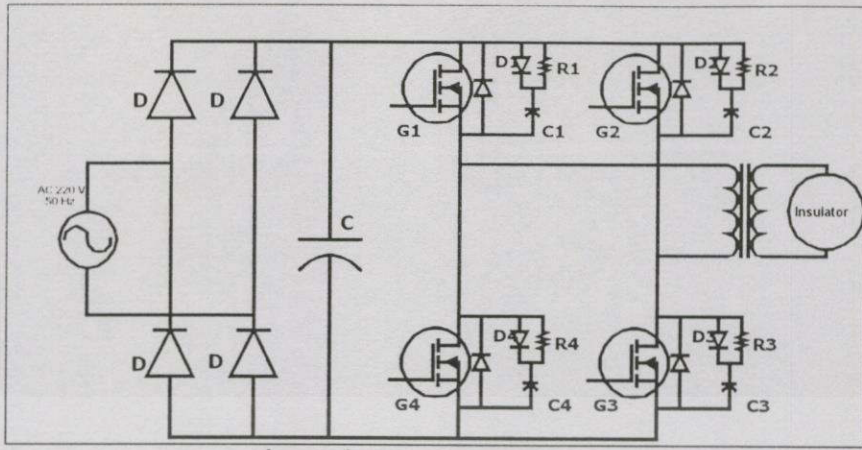
## การทดสอบหม้อแปลง

### 5.1 บทนำ

เป็นการนำเอาอุปกรณ์ อิเลคทรอนิกส์กำลัง ( Power Electronic) มาใช้งานแทนหลักการเดิมที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น เพื่อให้ได้ความถี่สูง สัญญาณไม่มีการหน่วง และการควบคุมสะดวกกว่า หลักการของระบบคือ เมื่อจ่ายไฟ หนึ่งเฟส 220 โวลต์ กระแสสลับ 50 เฮิร์ต เข้ามาในเครื่อง ก็จะแปลงไฟให้เป็นกระแสตรง หนึ่งเฟส 310 โวลต์ โดยผ่านชุดเรกติไฟท์ (Rectifier) เพื่อผ่านไปยังชุดแปลงเป็นไฟกระแสสลับ โดยใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ แปลงเป็นสัญญาณไฟกระแสสลับ ความถี่สูง 150 กิโลเฮิร์ต - 200 กิโลเฮิร์ต ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการวาบไฟ ซึ่งได้แรงดันสูงสุด 310 โวลต์ และผ่านไปยังหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อยกระดับแรงดันให้ได้  $3 \text{ kV}_p$



รูปที่ 5.1 หลักการทำงานของระบบที่ได้นำเสนอ



รูปที่ 5.2 วงจรทดสอบเบรคความถี่สูง

## 5.2 การทดสอบหม้อแปลงโดยใช้แหล่งจ่าย Converter จ่ายให้กับหม้อแปลง

### 5.2.1 วัตถุประสงค์

เพื่อดูการตอบสนองต่อความถี่ ของหม้อแปลง แกนเฟอร์ไรท์ ว่าสัญญาณ ด้านเข้า กับ สัญญาณ ด้านออกเป็นอย่างไร และสามารถที่จะรักษาระดับของ อัตรา ส่วนของหม้อแปลงให้ ได้ คงที่หรือไม่

### 5.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1.ต่อหม้อแปลงความถี่สูงแรงดันสูงเข้ากับชุด Converter
- 2.ปรับความถี่ของ Converter ให้ได้ 200 kHz 150 kHz
- 3.ปรับขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ครั้งละ 25 V ขึ้นไปเรื่อยๆจนถึง 300 V วัดแรงดัน

### 5.2.3 ผลการทดสอบ

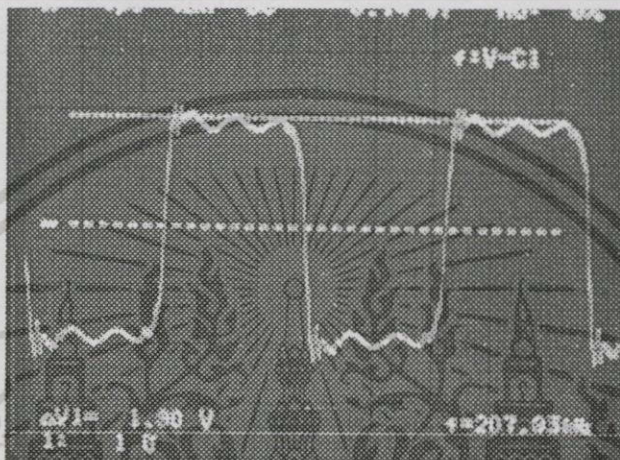
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบหม้อแปลง โดยใช้ Converter ที่ความถี่ 200 kHz

$V_{input} (V_{dc})$	$V_{input} (V_p)$	$V_{output} (V_p)$
25	25	250
50	50	500
75	75	750
100	98	980
125	122	1220
150	146	1460
175	172	1720
200	198	1980
225	222	2220

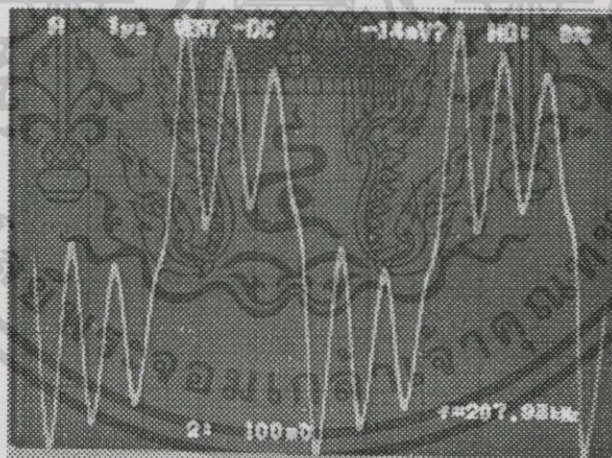
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

$V_{input} (V_{dc})$	$V_{input} (V_p)$	$V_{output} (V_p)$
250	246	2460
275	270	2700
300	296	2960

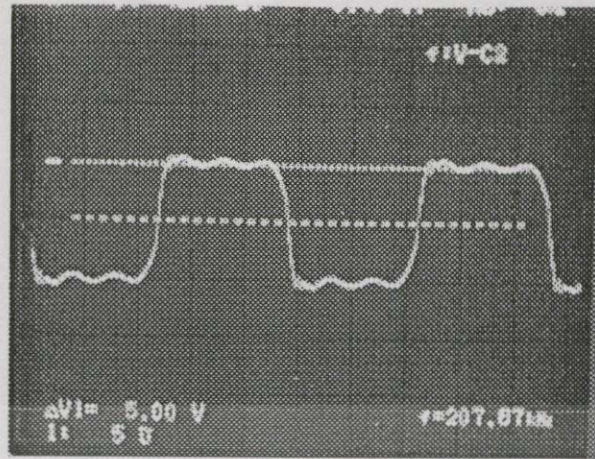


รูปที่ 5.3 สัญญาณ INPUT วัตคร่อมหม้อแปลง (PROBE x 10) = 19 V ความถี่ 200 kHz

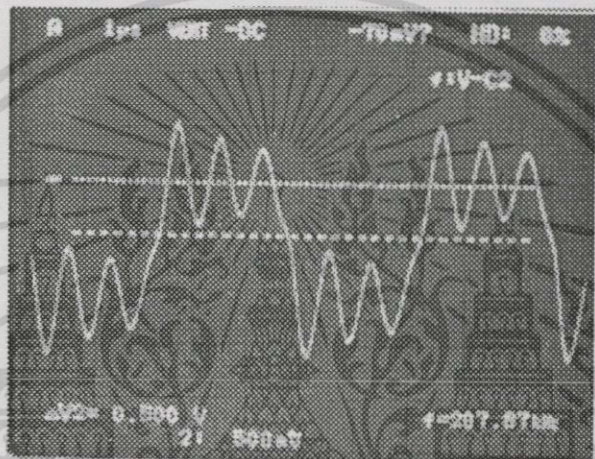


รูปที่ 5.4 สัญญาณ OUTPUT วัตคร่อมหม้อแปลง (PROBE x 1000) = 190 V ความถี่ 200 kHz

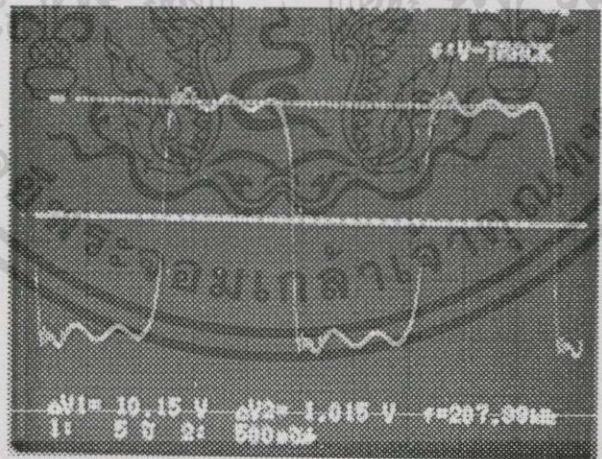
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 สัญญาณ INPUT วัดคร่อมหม้อแปลง(PROBE X 10) = 50 V ความถี่ 200 kHz

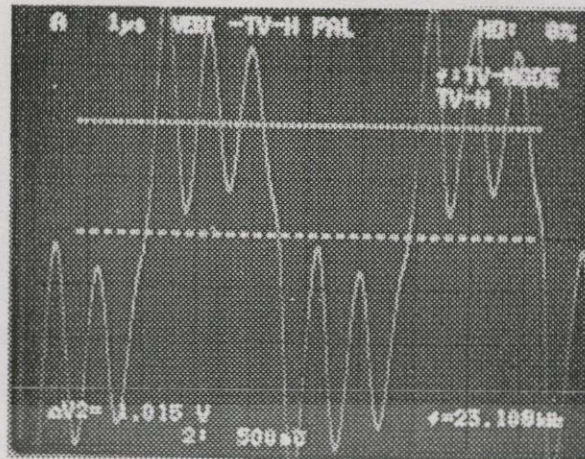


รูปที่ 5.6 สัญญาณ OUTPUT วัดคร่อมหม้อแปลง(PROBE x 1000) = 500 V ความถี่ 200 kHz

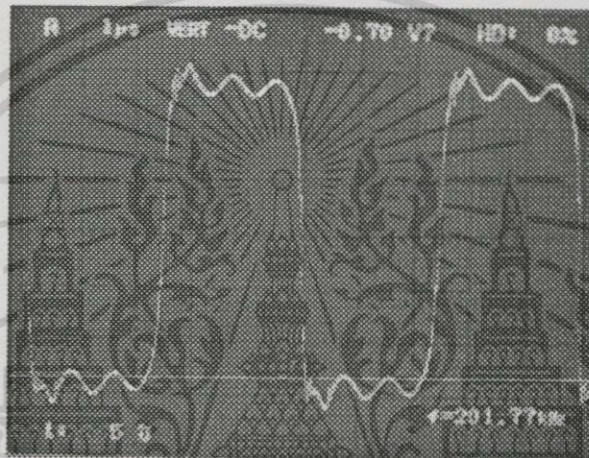


รูปที่ 5.7 สัญญาณ INPUT วัดคร่อมหม้อแปลง(PROBE X 10) = 101.5 V ความถี่ 200 kHz

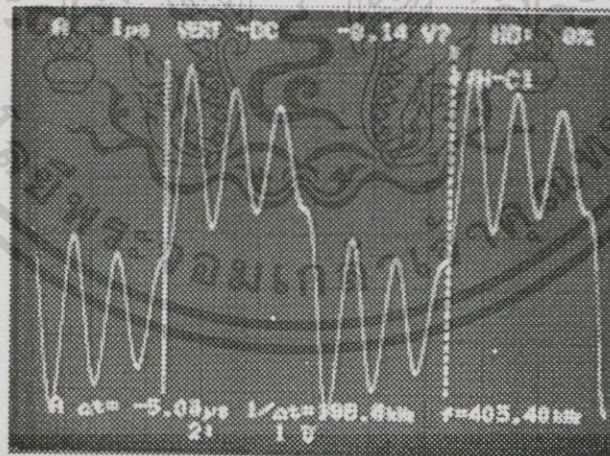
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 สัญญาณ OUTPUT วัตคร่อมหม้อแปลง(PROBE x 1000) = 1015 V ความถี่ 200 kHz

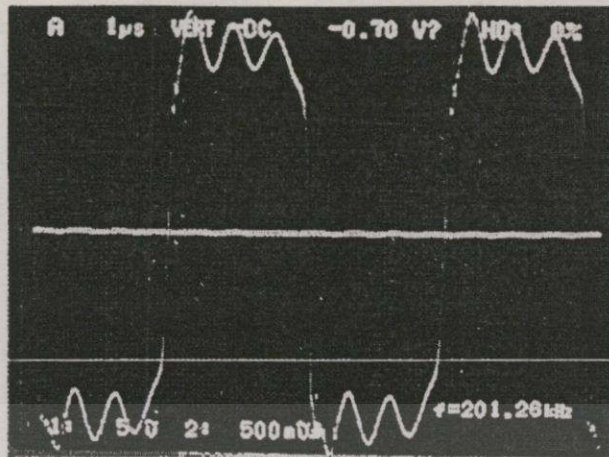


รูปที่ 5.9 สัญญาณ INPUT วัตคร่อมหม้อแปลง(PROBE X 10) = 149 V ความถี่ 200 kHz

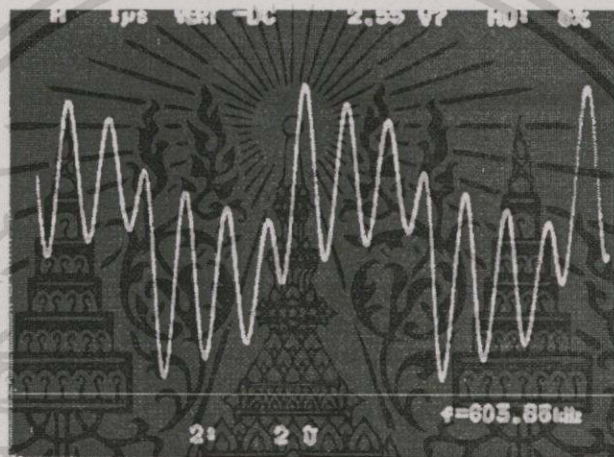


รูปที่ 5.10 สัญญาณ OUTPUT วัตคร่อมหม้อแปลง(PROBE x 1000) = 1490 V ความถี่ 200 kHz

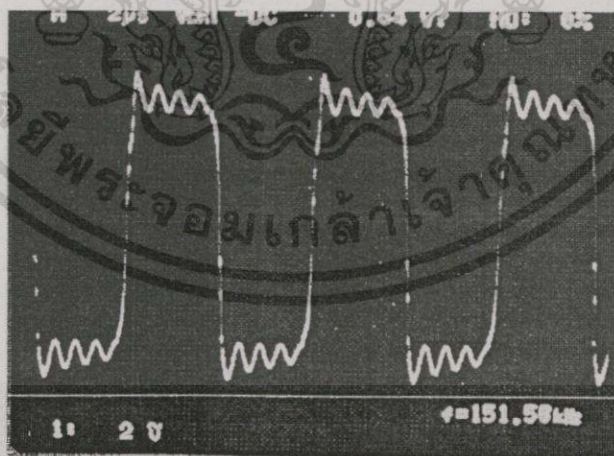
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 สัญญาณ INPUT วัตต์คร่อมหม้อแปลง(PROBE X 10) = 190 V ความถี่ 200 kHz

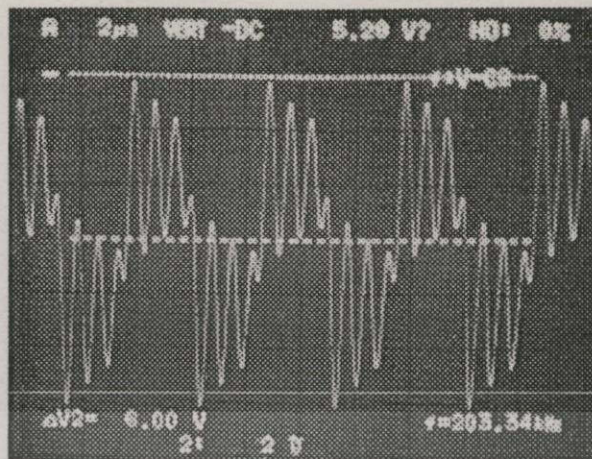


รูปที่ 5.12 สัญญาณ OUTPUT วัตต์คร่อมหม้อแปลง(PROBE x 1000) = 1900 V ความถี่ 200 kHz



รูปที่ 5.13 สัญญาณ INPUT วัตต์คร่อมหม้อแปลง(PROBE x 100) = 250 V ความถี่ 200 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

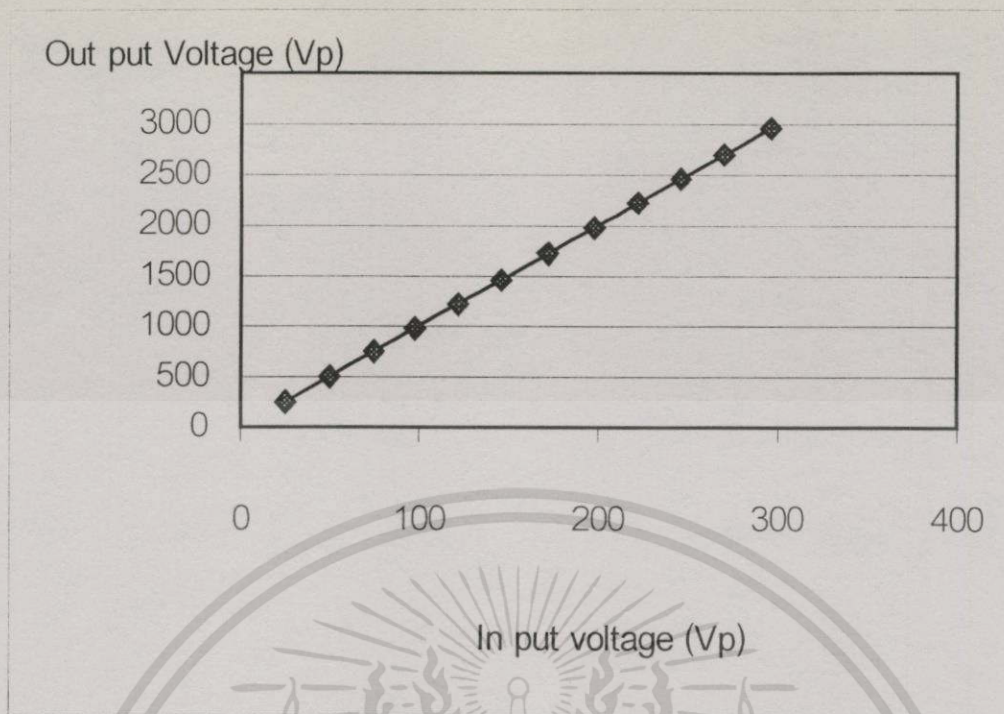


รูปที่ 5.14 สัญญาณ OUTPUT วัตคร่อมหม้อแปลง(PROBE x 1000) = 3000 Vความถี่200 kHz

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบหม้อแปลงโดยใช้ Converter ที่ความถี่ 150 kHz

$V_{input}$ (Vdc)	$V_{input}$ (Vp)	$V_{output}$ (Vp)
25	25	250
50	50	500
75	75	750
100	98	980
125	122	1220
150	146	1460
175	172	1720
200	198	1980
225	222	2220
250	246	2460
275	270	2700
300	296	2960

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ปฐมภูมิและทุติยภูมิที่ ความถี่ 200 kHz

### 5.2.2 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า รูปสัญญาณที่เข้าและออกหม้อแปลง จะได้ความถี่ที่ต้องการ และสามารถที่จะรักษา อัตราส่วน แรงดัน ทางด้าน ปฐมภูมิ ต่อ ทางด้าน ทุติยภูมิ ได้คงที่ตามที่ออกแบบ แสดงว่าหม้อแปลงที่ใช้สามารถใช้ได้จริง ณ. ที่ความถี่สูง และแรงดันสูง

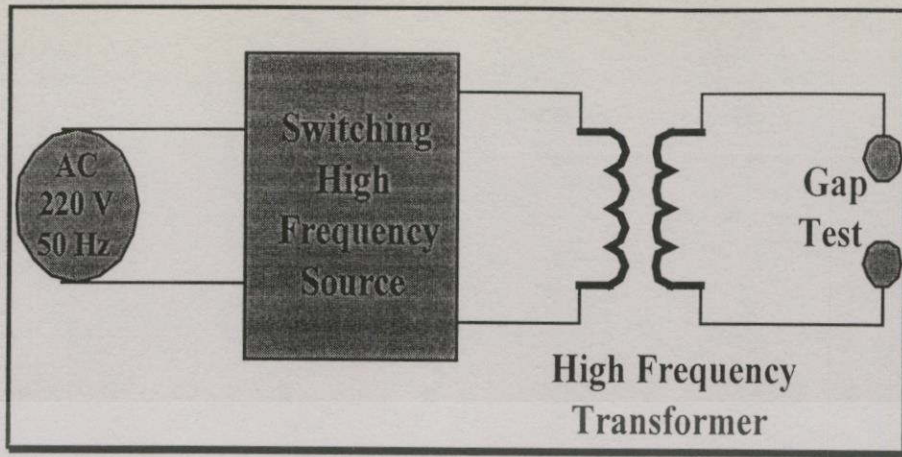
## 5.3 การทดลอง ทดสอบ เปรดความถี่ที่ความถี่สูง

### 5.3.1 วัตถุประสงค์

เป็นการทดสอบเพื่อดูความคงทนของหม้อแปลงเมื่อทำการทดสอบแล้วเกิดการเบรคความถี่ของฉนวนว่าหม้อแปลงสามารถที่จะทนได้หรือไม่อย่างไร

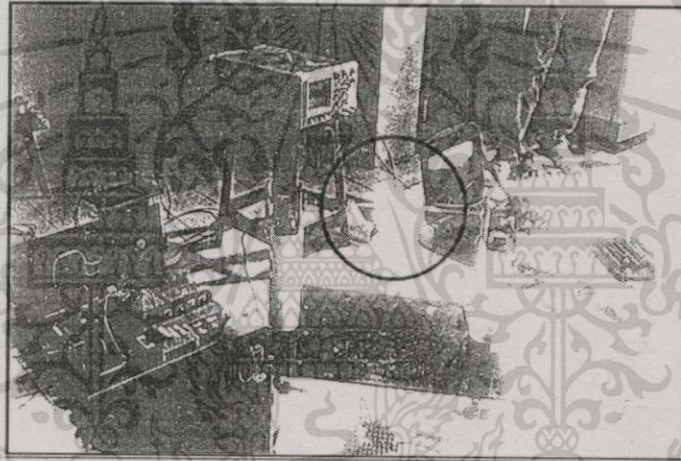
### 5.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ตั้งระยะแกปของแท่งอิเหล็ก โทรอดให้ห่างกัน 2.5 มม.
2. ต่อชุดแปลงผันความถี่สูงเข้ากับหม้อแปลงและต่อด้านแรงดันขาออกของหม้อแปลงเข้ากับแท่งอิเหล็ก โทรอด ตามรูปที่ 5.16
3. ต่อกราวด์ระบบเข้ากับด้านแรงสูงของหม้อแปลง
4. บันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ 5.16 วงจรทดสอบเบรคความถี่สูง

### 5.3.3 ผลการทดสอบ



รูปที่ 5.17. ขณะทำการเกิดเบรคความถี่ ที่ความถี่ 200 kHz แก๊ป 2.5 mm.

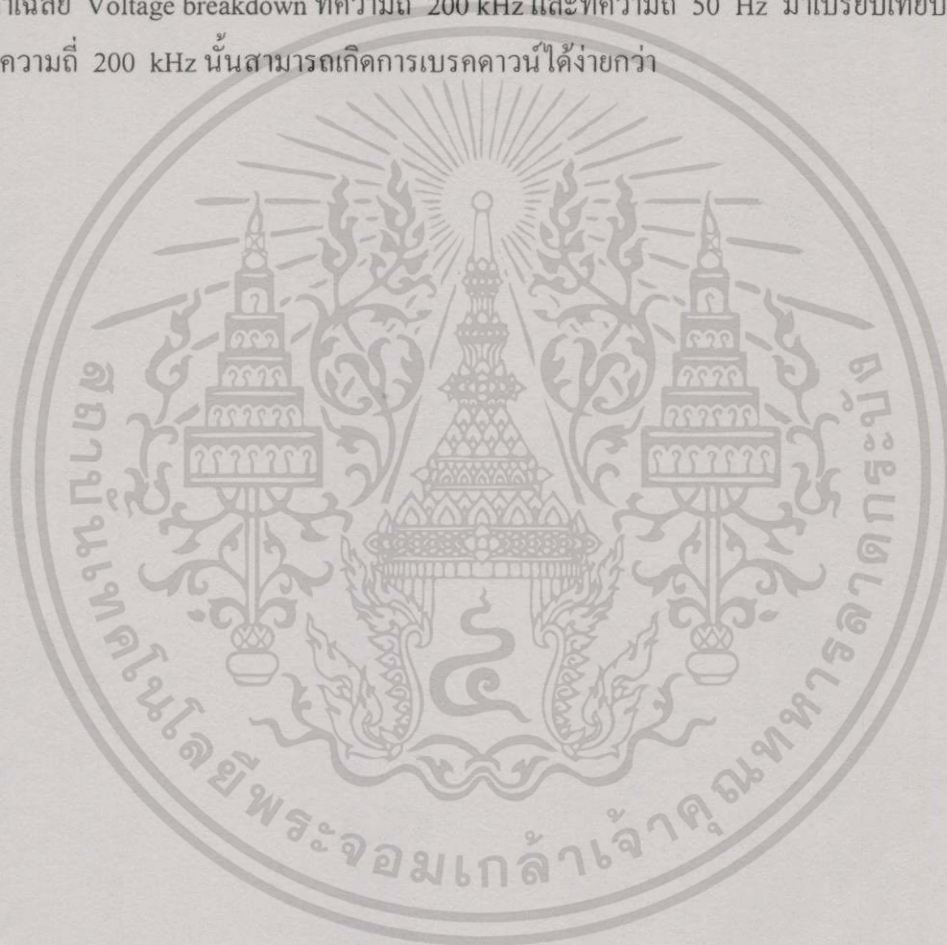
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแบบวาวไฟ

ครั้งที่	แรงดัน(kV)	กระแส(A)
1	1.8	10
2	2.2	10
3	2.4	10
4	2.1	10
5	2.3	10

### 5.3.4 สรุปผลการทดสอบ SHORT CIRCUIT

จากการทดสอบเมื่อจ่ายแรงดันเข้าที่อิเล็กโตรด โดยปรับความถี่ที่ 200 kHz และอิเล็กโตรดมีระยะห่างกัน 2.5 mm. เมื่อทำการทดสอบ 5 ครั้ง จะเห็นว่าค่า Voltage breakdown ในแต่ละครั้งมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากจะมีแฟกเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดเบรคดาวน์ เช่น รูปร่างของอิเล็กโตรด ผลของสิ่งทีเปราะเปื้อน ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ เป็นต้น เมื่อนำค่า Voltage breakdown ในการทดสอบแต่ละครั้งมาหาค่าเฉลี่ยจะได้เท่ากับ 2.16 kV

เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 50 kHz อากาศจะมีค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเท่ากับ 25 kV/cm และเมื่อมีระยะห่างเท่ากับ 2.5 mm. จะมีค่า Voltage breakdown เท่ากับ 6.25 kV ถ้านำค่าเฉลี่ย Voltage breakdown ที่ความถี่ 200 kHz และที่ความถี่ 50 Hz มาเปรียบเทียบกับกันจะเห็นว่าที่ความถี่ 200 kHz นั้นสามารถเกิดการเบรคดาวน์ได้ง่ายกว่า



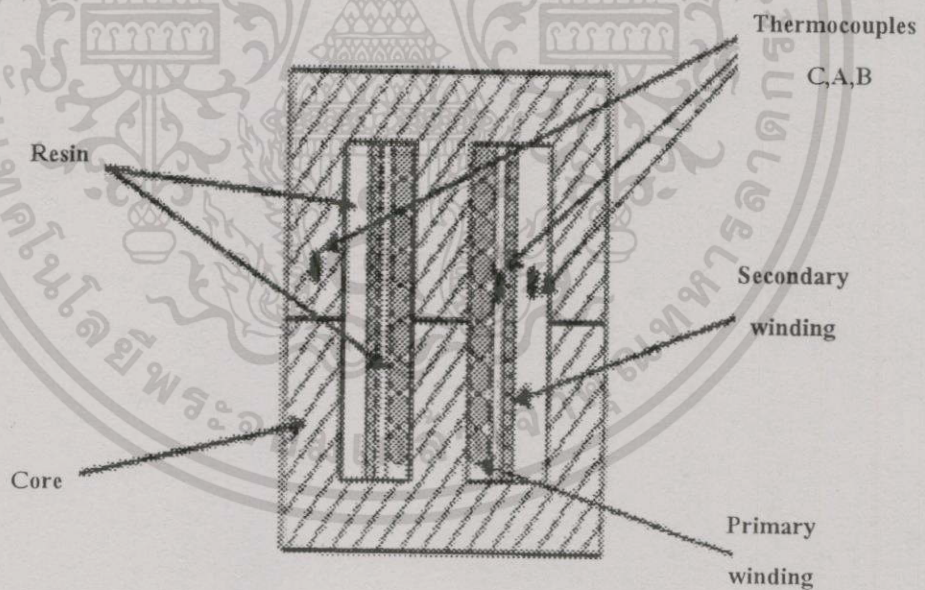
## การประยุกต์นำเครื่องต้นแบบไปใช้งาน

### 6.1 บทนำ

ในบทนี้จะ เป็นการประยุกต์ นำเครื่องต้นแบบไปใช้งาน วิศวกรรม โดยการออกแบบหม้อแปลงแรงดันขนาด 2 kV ความถี่ 200 kHz นำมาทดสอบฉนวนของหม้อแปลงแต่ละชนิด คุณสมบัติของค่ากำลังการสูญเสียที่เกิดภายในเนื้อฉนวน ว่าฉนวนชนิดใดมีค่า ความสูญเสียมากกว่า และคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงแรงดันกับความถี่ มีผลต่อเนื้อฉนวนอย่างไร โดยใช้หลักการตามเอกสารอ้างอิง[10]

#### 6.1.1แบบจำลองของหม้อแปลง (model)

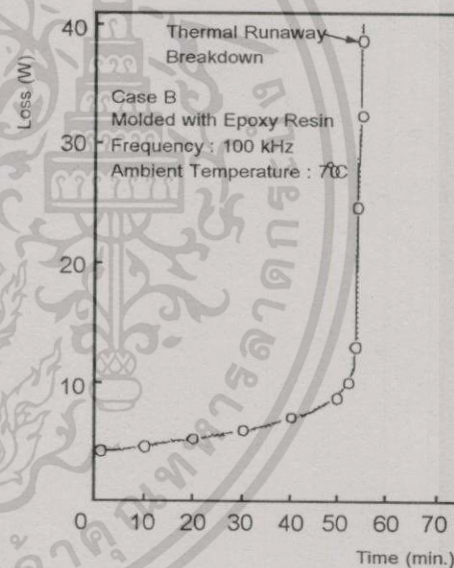
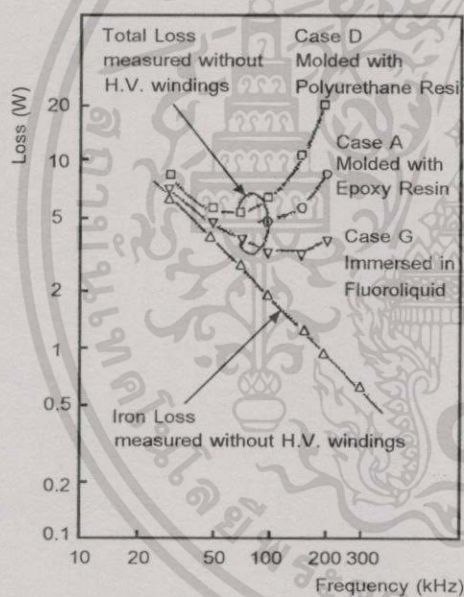
ในตารางที่ 6.1 เป็นชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบของหม้อแปลงวัสดุที่ใช้มี ชนิด "a", "b" และแบบรองพัน (bobbin) เทอร์โมคัปเปิล (thermocouples) ทั้ง 3 ตัว ที่อยู่ในโครงสร้างของหม้อแปลงดังรูปที่ 6.1 ใช้วัดอุณหภูมิระหว่างการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิล "a" จะใช้วัดที่ขดลวดแรงดันด้าน Primary ส่วนเทอร์โมคัปเปิล "b" จะใช้วัดที่ขดลวด Secondary และเทอร์โมคัปเปิล "c" จะใช้วัดที่แกนเหล็กดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แบบและโครงสร้างของหม้อแปลง

ตารางที่ 6.1 เป็นค่าวัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้ในหม้อแปลง

Case	Mold Resin For Windings ( Resin a )	Mold Resin For Core ( Resin b )	Bobbin
A	Epoxy Resin	None	Phonel
B	Epoxy Resin	Silicone Resin	Phonel
C	Epoxy Resin	Epoxy Resin	Phonel
D	Polyurethane Resin	None	Phonel
E	Polyurethane Resin	Polyurethane Resin	Phonel
F	Silicone Resin	Silicone Resin	Phonel



รูปที่ 6.2 การสูญเสียในหม้อแปลงแบบต่างๆ[10]

รูปที่ 6.3 การเพิ่มขึ้นของค่าการสูญเสียจนถึงช่วงที่เกิดความร้อนสูงสุด[10]

## 6.2 เงื่อนไขในการเกิดการสูญเสีย

จากรูปที่ 6.2 เป็นค่าการสูญเสียทางแกนเหล็ก และค่าการสูญเสียรวมทั้ง 3 แบบ (Case A, D, G) ในตารางที่ 6.1 ที่ใช้กับความถี่ต่างๆ การสูญเสียทางแกนเหล็กจะแปรผกผันกับความถี่ แต่ผลรวมของค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจะอยู่ที่ความถี่ 100 kHz ผลรวมของค่าการสูญเสียที่สูงสุดในกราฟนี้

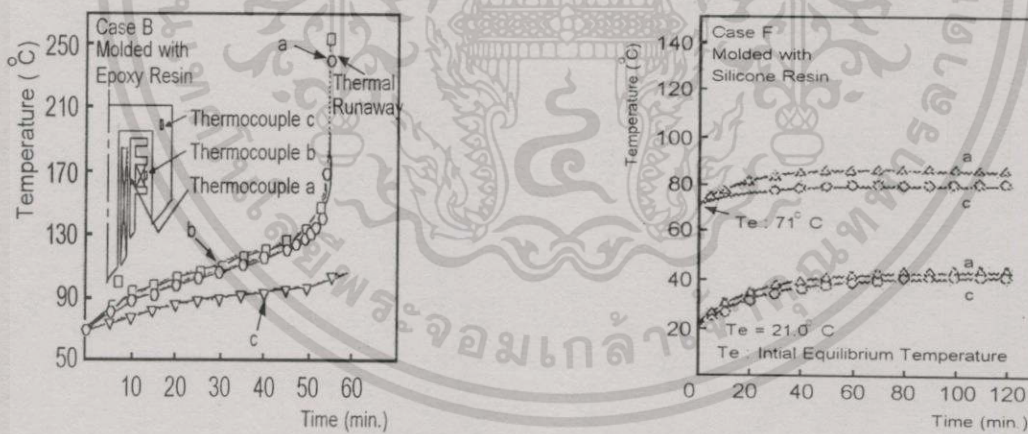
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มี ชนิดโพลียูเรเทน เรซิน (Polyurethane Resin) อีพ็อกซี เรซิน (Epoxy Resin) ได้มีการเปรียบเทียบระหว่าง ผลรวมของค่าการสูญเสียทางแกนหลัก จากนั้นจะเรียกว่า การสูญเสียแบบสเตรลอส

### 6.3 คุณสมบัติของการสูญเสียที่อุณหภูมิสูง

เมื่อหม้อแปลงมีการใช้งานไประยะเวลาหนึ่งที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าผลรวมของการสูญเสียก็จะคงที่ ที่ระยะเวลาหนึ่งขณะที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า ในแต่ละชนิด (case) ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นค่าการสูญเสียก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสุดท้ายแล้วค่าการสูญเสียก็จะพุ่งขึ้นสูงสุด การเกิดการสูญเสียที่สูงขึ้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของชนิดวัสดุที่นำไปใช้และอุณหภูมิสูงสุดของบรรยากาศบริเวณรอบๆ ว่ามีมากเท่าไร รูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 เป็นค่าการสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆ จะสังเกตได้ว่าชนิดอีพ็อกซี ของหม้อแปลงในชนิด B อุณหภูมิโดยรอบสูงถึง 70°C

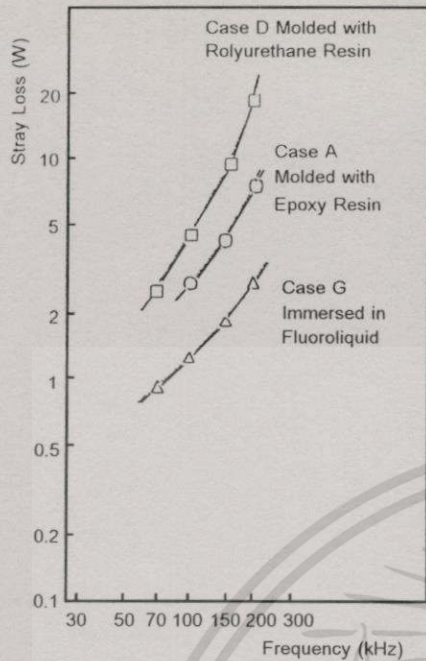
ในรูปที่ 6.3 เป็นค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จาก 1 ถึง 55 นาที ที่แรงดันที่ใช้งาน ในรูปที่ 6.4 อุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล “a”, “b” อุณหภูมิจะสูงขึ้นทันทีที่ 55 นาทีที่แรงดันใช้งาน ในการสูญเสียแต่ละชนิด แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างทันทีก็ไม้อาจที่จะวัดอุณหภูมิในขดลวดได้ รูปที่ 6.5 จะแสดงเวลาและอุณหภูมิที่คงที่จะสังเกตได้จากหม้อแปลงชนิดซิลิคอน (silicon) ชนิด F อุณหภูมิของหม้อแปลงที่เพิ่มขึ้นที่ 15°C และการแผ่กระจายของอุณหภูมิที่ออกมาจะอยู่ในระดับเดียวกันกับอุณหภูมิสูงถึง 71°C



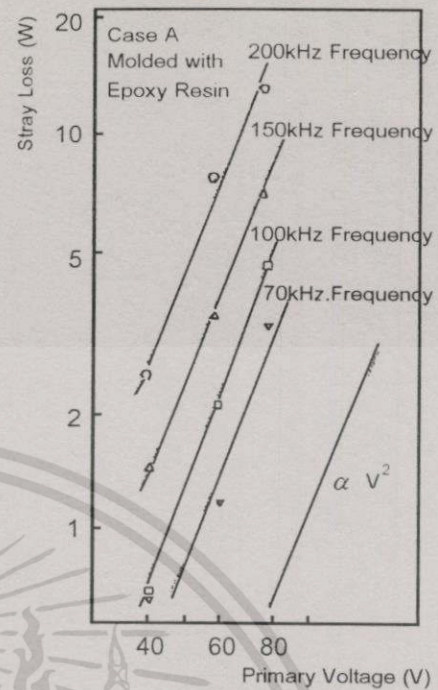
รูปที่ 6.4 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะสังเกตได้ที่จุดที่เกิดความร้อนสูงสุด[10]

รูปที่ 6.5 รูปลนวนชนิด F จะสังเกตได้จากเสถียรภาพของความร้อน[10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 ค่าการสูญเสียแบบสเตรลอสที่ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ [10]



รูปที่ 6.7 ค่าการสูญเสียแบบสเตรลอสที่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน [10]

#### 6.4 แหล่งกำเนิดค่าการสูญเสียแบบสเตรลอส (Source of stray loss)

รูปที่ 6.6 แสดงค่าการสูญเสียแบบสเตรลอสที่ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ ซึ่งจะนำค่าการสูญเสียที่แกนเหล็ก จากผลรวมทั้งหมดออกไป

รูปที่ 6.7 แสดงค่าการสูญเสียแบบสเตรลอสที่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน ค่าการสูญเสียแบบสเตรลอสจะเพิ่มขึ้นด้วยความถี่ดังรูปที่ 6.6 และค่าสัดส่วนระหว่างกำลังงานของแรงดันอินพุตดังรูปที่ 6.8 ข้อมื่อนำในการหาค่าการสูญเสียแบบสเตรลอสจากค่าการสูญเสียสภาพฉนวนหรือชนิดของวัสดุที่ใช้ จากสมการไดอิเล็กทริก (Dielectric loss,  $w_d$ )

$$W_d = V^2 \omega C \tan \delta \quad (6.1)$$

เมื่อ  $W_d$  = ค่าการสูญเสียสภาพฉนวนเป็น  
 $f$  = ความถี่  
 $\epsilon$  = ค่าคงที่ของฉนวน  
 $V$  = ค่าสนามไฟฟ้า  
 $\delta$  = ค่ามุมของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้สมการการสะสมความร้อน (Heating)[9]

$$T(t) = \left[ \frac{W}{hA} \left( 1 - e^{-\left(\frac{hA}{H}\right)t} \right) + (T_0 - T_\alpha) e^{-\left(\frac{hA}{H}\right)t} \right] + T_\alpha \quad (6.2)$$

- เมื่อ
- $T(t)$  = อุณหภูมิของวัตถุ ณ เวลา  $t$  ใดๆ ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - $T_0$  = อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุ ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - $T_\alpha$  = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - $hA$  = ความสามารถในการระบายความร้อน (Watt /  $^{\circ}\text{C}$ )
  - $H$  = พลังงานที่ต้องการเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $1^{\circ}\text{C}$  (J)
  - $t$  = ช่วงเวลาหรือแปลงทำงานและหยุดทำงาน (sec)

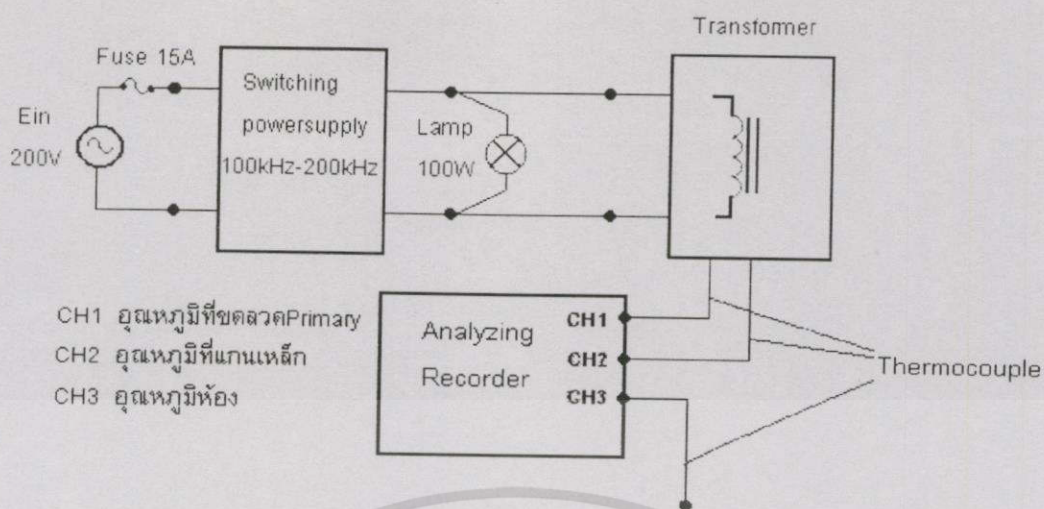
เมื่อ  $T_0 = T_\alpha$  จะได้

$$T(t) = \left[ \frac{W}{hA} \left( 1 - e^{-\left(\frac{hA}{H}\right)t} \right) \right] + T_\alpha \quad (6.3)$$

## 6.5 การทดสอบหาค่าสูญเสียที่แกนเหล็กและขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง

### 6.5.1 วัตถุประสงค์

1. หาค่าการสูญเสียที่แกนเหล็ก(CORE LOSS)ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง
2. หาค่าการสูญเสียที่ขดลวดปฐมภูมิ(PRIMARY WINDING LOSS)ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

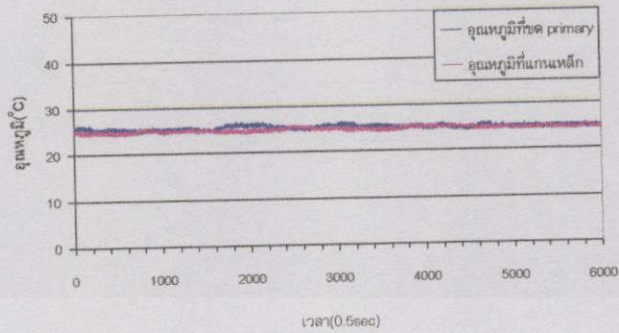


รูปที่.6.8 วงจรการทดสอบหาค่าการสูญเสียที่แกนเหล็กและขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง

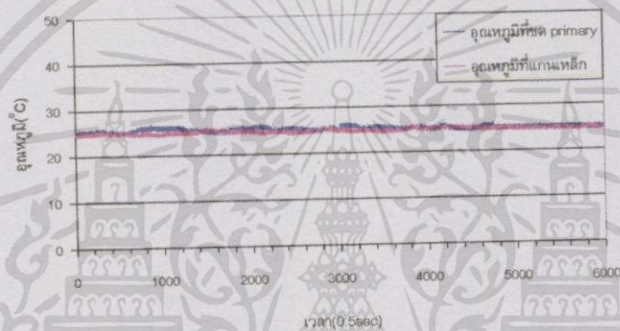
### 6.5.2 ขั้นตอนการทดลอง

- 1 ต่อวงจรตามรูปที่ 6.8 (หม้อแปลงไม่พันขดลวดด้านทุติยภูมิ)
- 2 ปรับแรงดันอินพุทไว้ที่ 200V คงที่ตลอดการทดลอง
- 3 ปรับความถี่ของ SWITCHING POWERSUPPLY 200 kHz
- 4 ทำการวัดค่าอุณหภูมิที่แกนเหล็ก และที่ขดลวด PRIMARY โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล แล้วนำไปต่อกับ ANALYZING RECORDER
- 5 รออนกว่ากราฟอุณหภูมิของทั้งสองเส้นอิ่มตัว (SATURATE)
- 6 บันทึกกราฟอุณหภูมิ และค่าที่ได้จาก ANALYZING RECORDER
- 7 ปรับแรงดันอินพุทลดจนเหลือ 0V แล้วรออนกว่าอุณหภูมิของหม้อแปลงต่ำลงจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง (AMBIENT)
- 8 เริ่มทำการทดลองใหม่ โดยเริ่มทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 แต่เปลี่ยนความถี่เป็น 150 kHz
- 9 นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผล

### 6.5.3 ผลการทดลอง



รูปที่ 6.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ CORE LOSS ที่ความถี่ 150 kHz



รูปที่ 6.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ CORE LOSS ที่ความถี่ 200 kHz

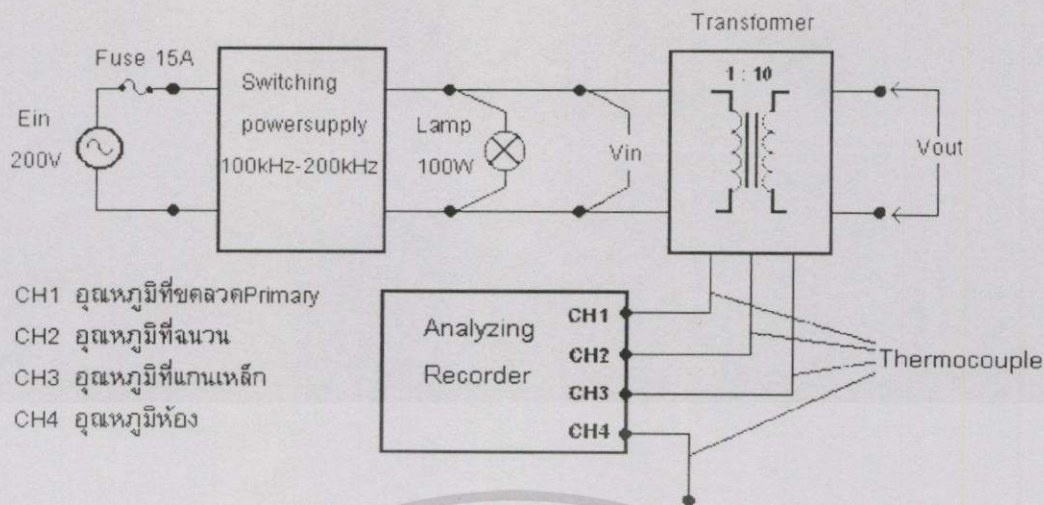
### 6.5.4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองวัดค่าความร้อนในแกนเหล็กของหม้อแปลงโดยที่ยังไม่ได้พันขดลวดทางด้านทุติยภูมินั้น เมื่อจ่ายแรงดันที่ 200V และความถี่ 150 kHz- 200 kHz จะพบว่าค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในรูปของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่แกน และเนื้อฉนวน เกือบเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จึงพอที่จะสรุปได้ว่า เมื่อจ่ายแรงดันที่ 200V และความถี่ต่างๆผลของ CORE LOSS จะเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อออกแบบตามข้อกำหนด และใช้งานตามแบบข้อกำหนดของหม้อแปลง

## 6.6 วัตต์อุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง case A และ case B โดยการปรับความถี่

### 6.6.1 วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่าการสูญเสียของหม้อแปลงความถี่สูง ที่ฉนวน case A และ case B โดยดูผลการเปลี่ยนแปลงที่ ความถี่ต่างๆ โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับฉนวนหม้อแปลงทั้งสองชนิด ชนิดใดมีค่าการสูญเสียมากกว่า ณ. ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง

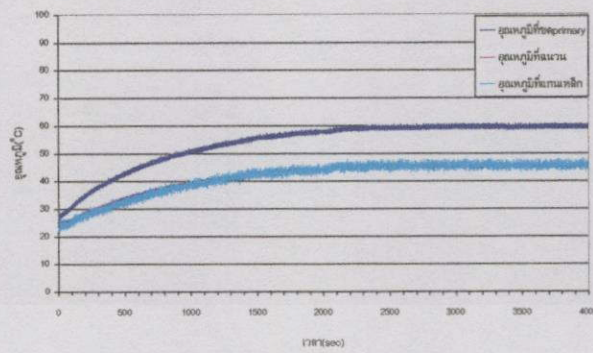


รูปที่ 6.11 วงจรการทดลองการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง case A และ case B โดยการปรับความถี่

### 6.6.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ต้องวงจรตามรูปที่ 6.10
2. ปรับแรงดันอินพุตให้ได้ 200V คงที่ตลอดการทดลอง
3. เปลี่ยนความถี่ของ Switching power supply ที่ 200kHz
4. ทำการวัดค่าอุณหภูมิที่ขดลวด Primary, ฉนวน และแกนเหล็ก โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล แล้วต่อเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับ Analyzing Recorder
5. รอนกว่ากราฟอุณหภูมิของหม้อแปลงทั้ง 3 เส้นจะอิมตัว
6. บันทึกกราฟอุณหภูมิ และค่าที่วัดได้จาก Analyzing Recorder
7. ปรับแรงดันอินพุต ให้มีค่าเท่ากับ 0V รอให้หม้อแปลงมี -อุณหภูมิลดลงจนเท่ากับ อุณหภูมิห้อง
8. เริ่มทำการทดลองต่อ โดยเริ่มทำการทดลองตั้งแต่ขั้น 2 เปลี่ยนความถี่เป็น 180kHz และ 160kHz
10. ทำเหมือนกันทั้ง case A และ case B
11. นำผลการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกันระหว่าง case A กับ case B วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

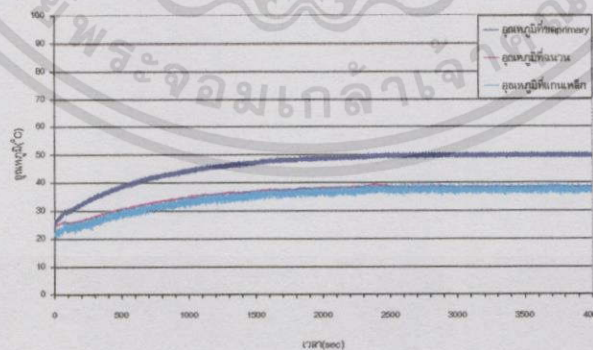
### 6.6.3 ผลการทดลอง



รูปที่ 6.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 200kHz

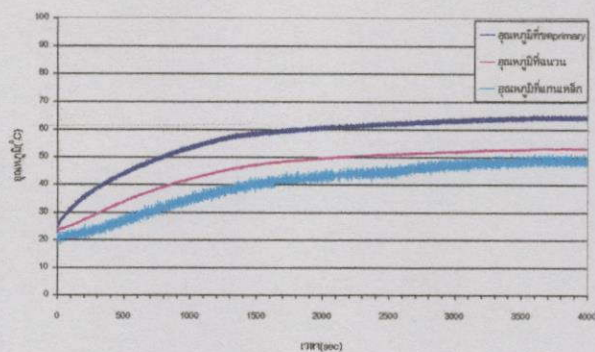


รูปที่ 6.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 200 kHz

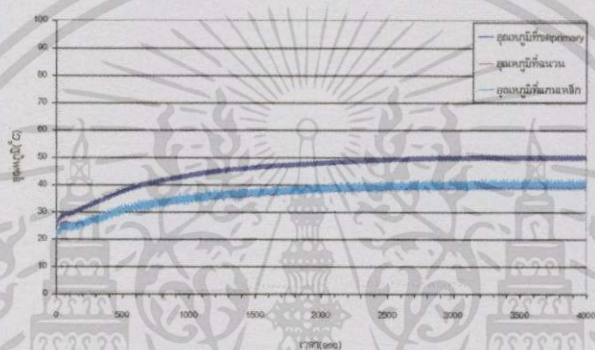


รูปที่ 6.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 180 kHz

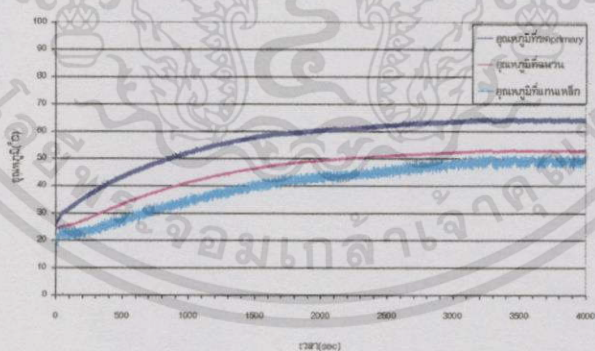
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B  
ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 180kHz

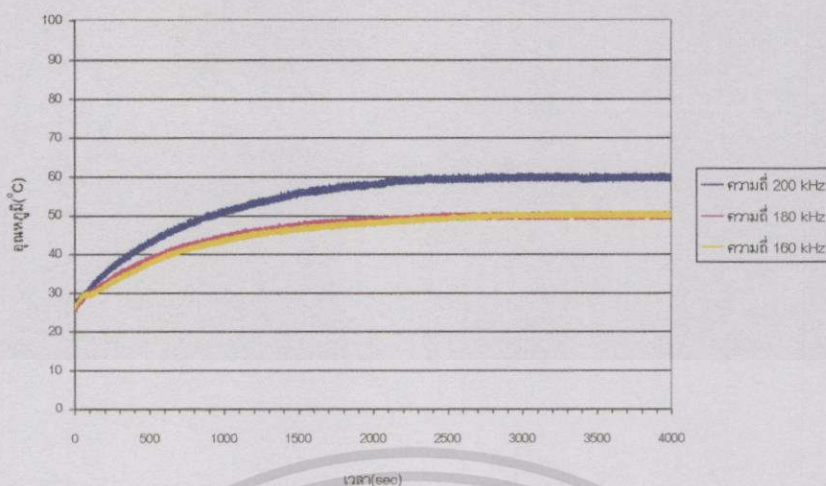


รูปที่ 6.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A  
ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 160 kHz

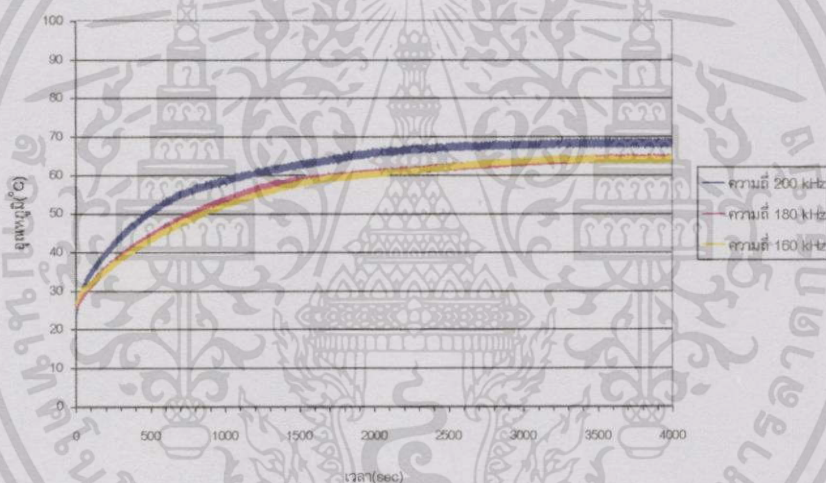


รูปที่ 6.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B  
ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ 160 kHz

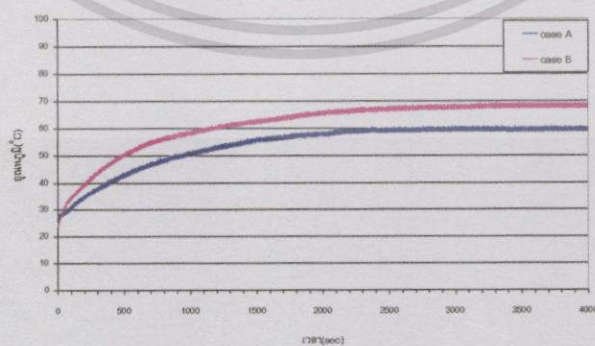
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ตั้งแต่ 160kHz-200kHz



รูปที่ 6.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B ที่แรงดันอินพุต 200V ความถี่ตั้งแต่ 160kHz-200kHz

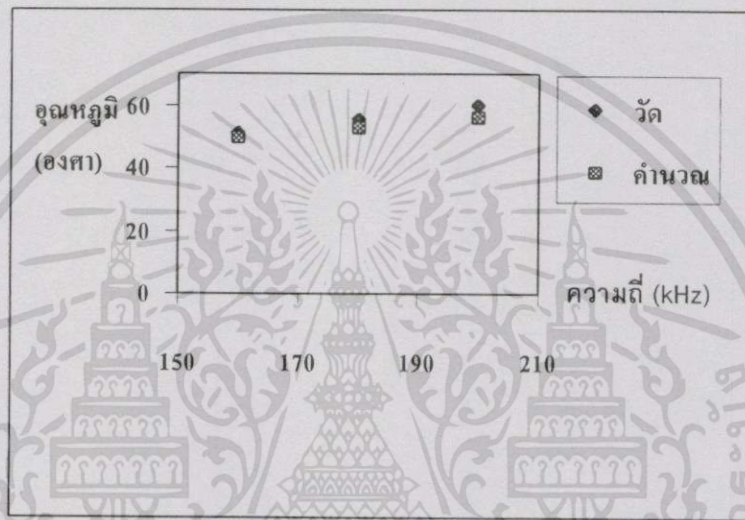


รูปที่ 6.20 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของหม้อแปลง case A และ case B ที่แรงดัน 200V และความถี่ 200 kHz

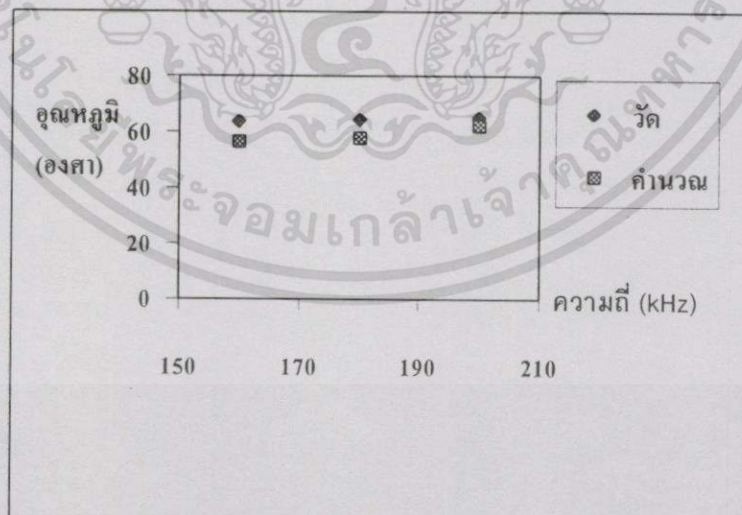
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 บันทึกผลการทดลอง โดยการปรับความถี่ ณ.เวลาทดสอบ

ความถี่(kHz)	อุณหภูมิ(°C)				Power loss(W)		%error	
	case A		Case B		caseA	caseB	CaseA	caseB
	วัด	คำนวณ	วัด	คำนวณ				
200	59.92	55.97	64.71	61.92	17.65	17.65	6.59	4.31
180	55.33	52.69	64.03	58.04	15.89	15.89	4.77	9.35
160	50.62	49.40	63.80	56.15	14.13	14.13	2.41	12.00



รูปที่ 6.21 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดจริง และคำนวณ ของฉนวน Case A โดยปรับความถี่



รูปที่ 6.22 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดจริง และคำนวณ ของฉนวน Case B โดยปรับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

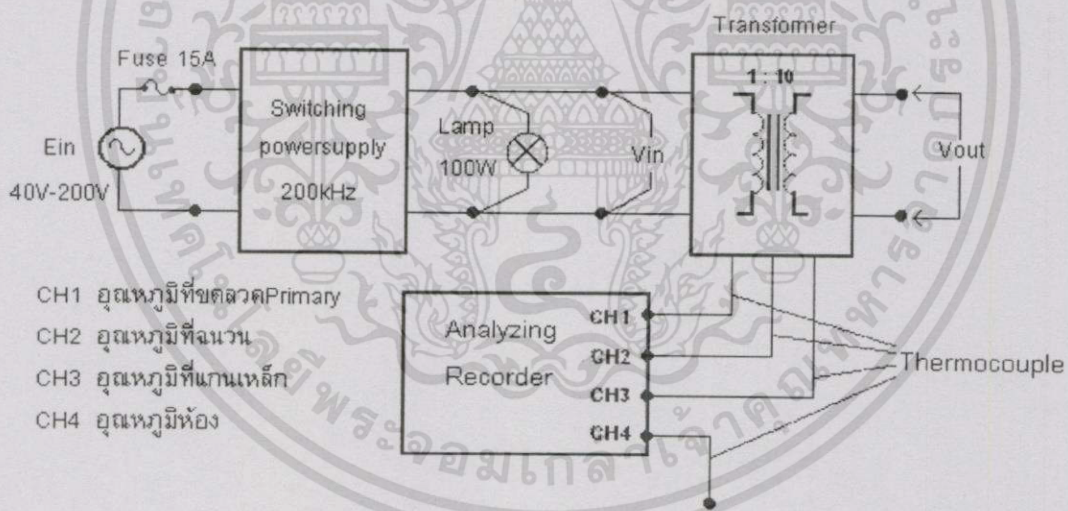
### 6.6.4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลอง วัดค่าความร้อนในเนื้อฉนวนของหม้อแปลงโดยกำหนดให้แรงดันจ่ายเข้าหม้อแปลงไว้ที่ 200V และเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 160kHz-200kHz จะพบว่าที่ค่าความถี่ 200kHz จะได้ค่าการสูญเสียในรูปของอุณหภูมิสูงที่สุด แต่เมื่อลดความถี่ลงมา (< 200kHz) จะพบว่าอุณหภูมิจะใกล้เคียงกันมากเนื่องมาจากข้อกำหนดของการออกแบบหม้อแปลงที่ว่าอัตราส่วนระหว่าง  $e/f$  ในแบบ per unit จะต้องไม่เกิน 1.1 per unit จึงทำให้มีการสูญเสียอีกรูปหนึ่งโดยเราให้เป็นค่า K ดังนั้นค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนของหม้อแปลงเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่จึงมีค่าคือ  $W_d = (\omega V^2 C \tan \delta) + K$

## 6.7 วัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง case A และ case B โดยการปรับแรงดันอินพุท

### 6.7.1 วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่าการสูญเสียของหม้อแปลงความถี่สูง ที่ฉนวน case A และ case B โดยการดูผลการเปลี่ยนแปลงที่ แรงดันต่างๆ โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับฉนวนหม้อแปลงทั้งสองชนิด ชนิดใดมีค่าความสูญเสียมากกว่า ณ ที่ความแรงดันเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.23 วงจรการทดลองการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง case A และ case B โดยการปรับแรงดันอินพุท

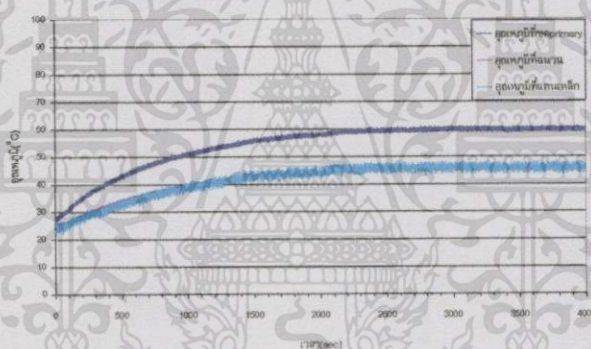
### 6.7.2 ขั้นตอนการทดลอง

- 1 ต่อวงจรตามรูปที่ 6.21
- 2 ปรับความถี่ของ Switching powersupply ไว้ที่ 200kHz คงที่ตลอดการทดลอง
- 3 ปรับแรงดันอินพุทให้มีค่าเท่ากับ 200V

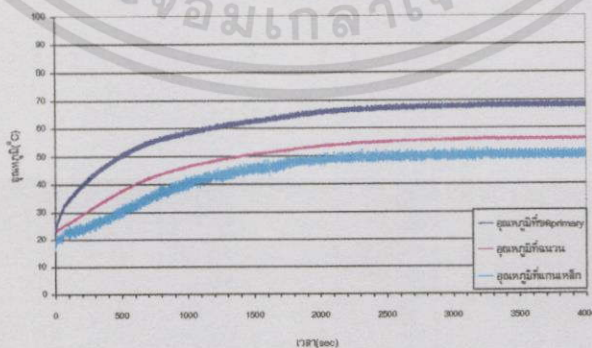
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการวัดค่าอุณหภูมิที่ขดลวด Primary, ฉนวน และแกนเหล็ก โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล แล้วต่อเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับ Analyzing Recorder
5. รอจนกว่ากราฟอุณหภูมิของหม้อแปลงทั้ง 3 เส้นจะอิมตัว
6. บันทึกกราฟอุณหภูมิ และค่าที่วัดได้จาก Analyzing Recorder
7. ปรับแรงดันอินพุท ให้มีค่าเท่ากับ 0 V รอให้หม้อแปลงมี อุณหภูมิลดลงจนเท่ากับ อุณหภูมิห้อง
8. เริ่มทำการทดลองใหม่ โดยเริ่มตั้งแต่ข้อ 2 เปลี่ยนแรงดันเป็น 160V , 120V , 80V และ 40V ตามลำดับ
10. ทำเหมือนกันทั้ง case A และ case B
11. นำผลการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกันระหว่าง case A กับ case B วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

### 6.7.3 ผลการทดลอง

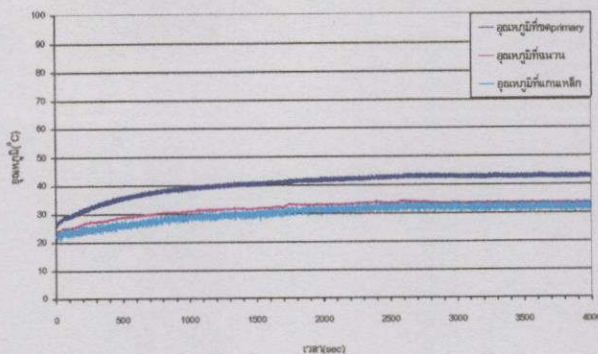


รูปที่ 6.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุท 200V



รูปที่ 6.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุท 200V

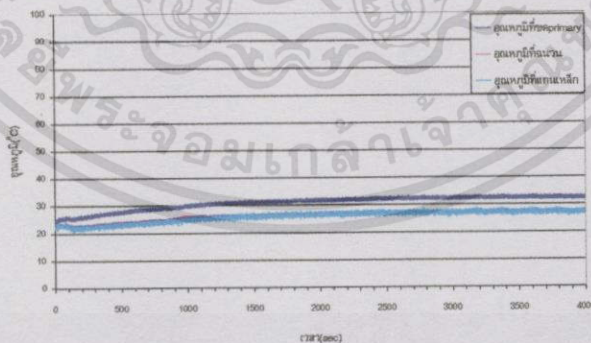
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุต 160V

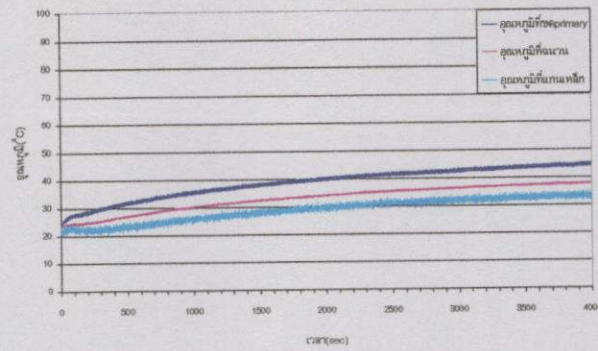


รูปที่ 6.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B ที่ความถี่ 200kHz แรงดันอินพุต 160V

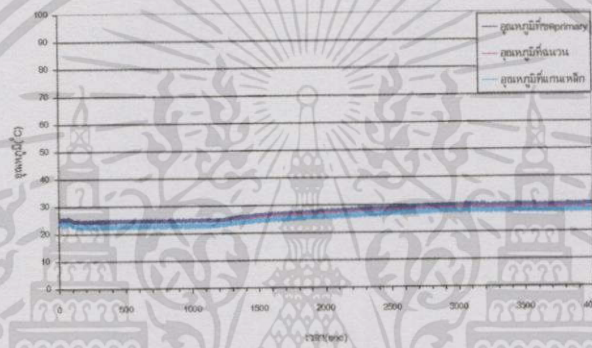


รูปที่ 6.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A ที่ความถี่ 200kHz แรงดันอินพุต 120V

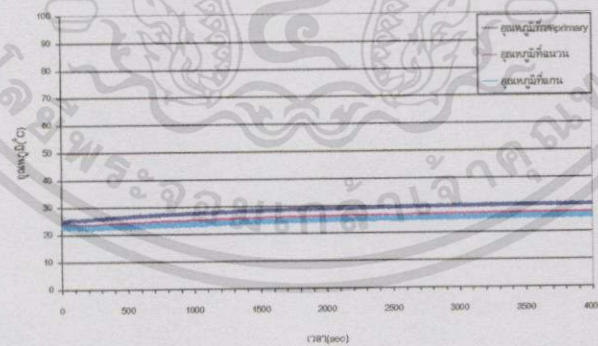
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุต 120V

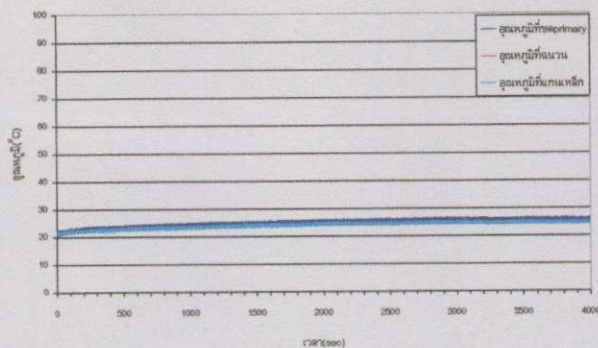


รูปที่ 6.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุต 80V

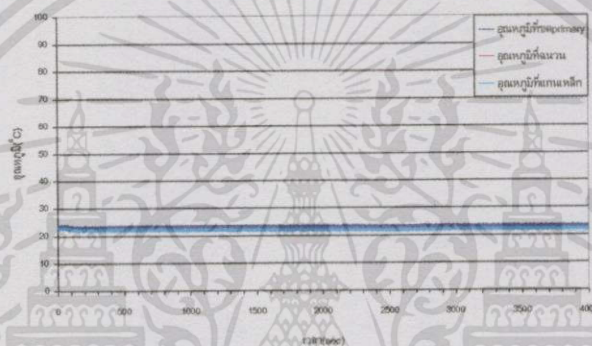


รูปที่ 6.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุต 80V

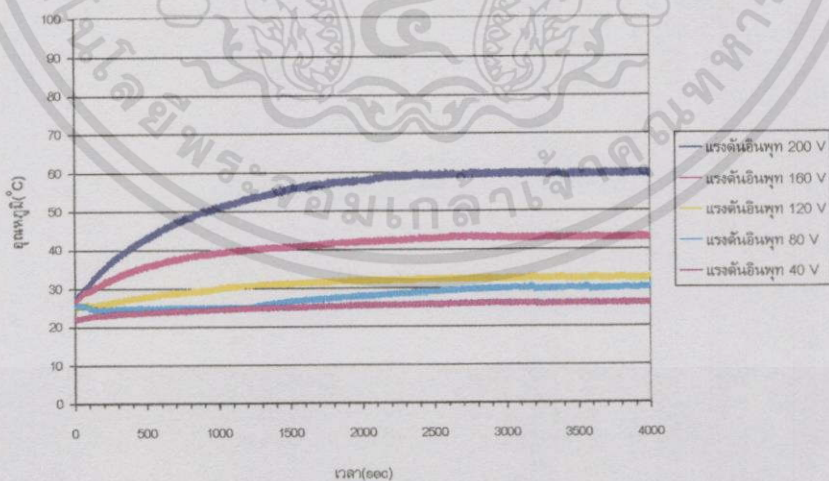
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุต 40V

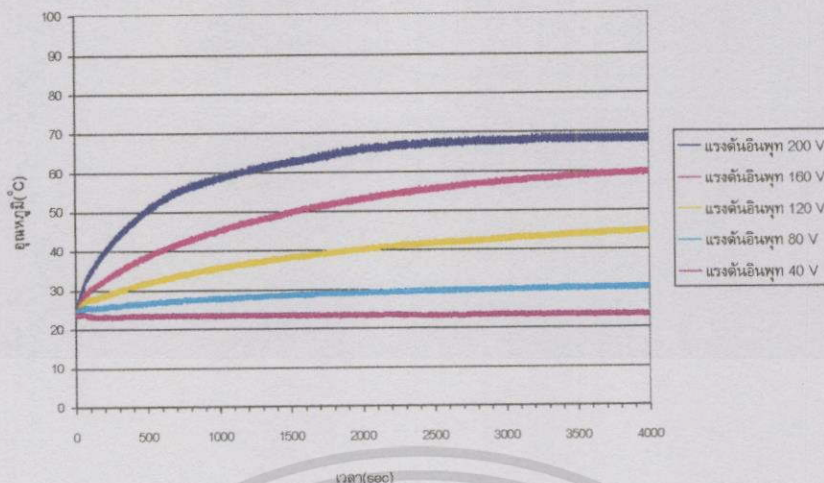


รูปที่ 6.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุต 40V



รูปที่ 6.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case A ที่ความถี่ 200k Hz แรงดันอินพุต ตั้งแต่ 40V-200V

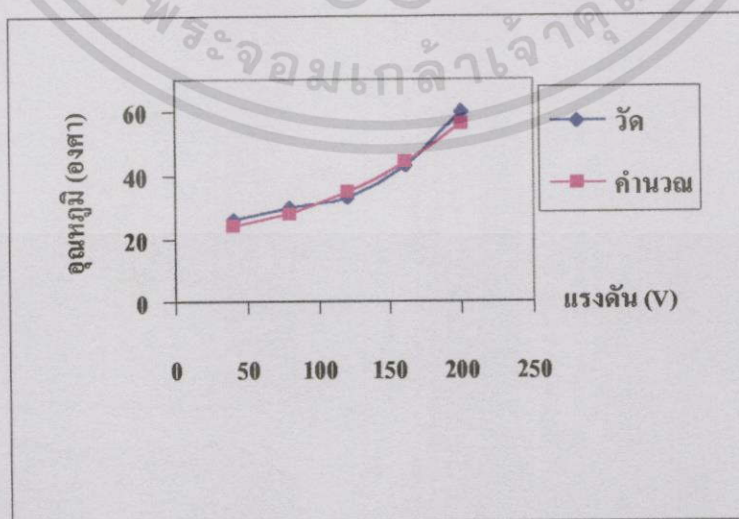
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของหม้อแปลง case B ที่ความถี่ 200 kHz แรงดันอินพุตตั้งแต่ 40V-200V

ตารางที่ 6.3 บันทึกผลการทดลอง โดยการปรับแรงดัน ณ เวลาทดสอบ

แรงดัน(V)	อุณหภูมิ(°C)				Power loss(W)		%errorอุณหภูมิ	
	case A		Case B		caseA	caseB	CaseA	caseB
	วัด	คำนวณ	วัด	คำนวณ				
200	59.92	55.97	64.71	61.92	17.65	17.65	6.59	4.31
160	42.86	44.11	59.92	56.38	11.30	11.30	2.92	5.91
120	33.38	34.88	44.40	42.65	6.36	6.36	4.49	3.94
80	30.07	28.29	29.73	29.24	2.83	2.83	5.92	1.65
40	26.25	24.31	23.40	24.54	0.70	0.70	7.39	4.87



รูปที่ 6.36 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดจริง และคำนวณ ของฉนวน Case A โดยปรับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.37 กราฟเปรียบเทียบอุนหภูมิที่วัดจริง และคำนวณ ของฉนวน Case B โดยปรับแรงดัน

#### 6.7.4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองวัดค่าความร้อนในเนื้อฉนวนของหม้อแปลง โดยที่กำหนดความถี่ไว้ที่ 200kHz จะพบว่าเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 200V จะได้ค่าความร้อนที่วัดได้มีค่าสูงกว่าเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 160V, 120V, 80V และ 40V ตามลำดับ เป็นไปตามสมการที่ว่า  $W_d = \omega V^2 C \tan \delta$  W/cm<sup>3</sup> คือเมื่อเราเปลี่ยนแรงดันด้านอินพุต ค่า  $V$  ก็จะเปลี่ยนแปลงด้วยถ้าเรากำหนดค่าอื่นๆในสมการคงที่ จะนั่นจึงสรุปได้ว่า แรงดันที่จ่ายเข้าไปในหม้อแปลงมีผลต่ออุนหภูมิของหม้อแปลงหรืออีกนัยหนึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตมีผลต่อค่าการสูญเสียในเนื้อฉนวนด้วยคือ  $W_d \propto V^2$  เมื่อกำหนดให้ค่าอื่นๆในสมการเป็นค่าคงที่

#### 6.8 ตัวอย่างการคำนวณการเพิ่มของอุนหภูมิ ฉนวนหม้อแปลง Case A

ฉ.ความถี่ 200 kHz ; 200 V ของ case A

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ(6.1)} \quad W_d &= V^2 \omega C \tan \delta && \text{W/cm}^3 \\ &= V^2 2\pi f C \tan \delta \end{aligned}$$

$$\text{Voltage between layer} = \frac{(100 \times 2 \times 200)}{10} = 4000 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\tan \delta = 0.013$  (ค่าได้จากกรวัด),  $C = 67.55 \times 10^{-12}$  F(ค่าได้จากกรวัด),

$V = 4000$  V,  $f = 200$  kHz

$$\begin{aligned} W_d &= 2\pi \times 200 \times 10^3 \times 4000^2 \times 67.55 \times 10^{-12} \times 0.013 \\ &= 17.65 \text{ W} \end{aligned}$$

จาก[9]

$$W_d = h_A (T_h - T_c) \quad (6.4)$$

เมื่อ  $h_A$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น  $W/m^2K$  ในระบบ SI  
 $T_H$  คือ อุณหภูมิที่ร้อนกว่า ( $^{\circ}C$ )  
 $T_C$  คือ อุณหภูมิที่เย็นกว่า ( $^{\circ}C$ )

หม้อแปลง CASE A

หาค่า  $h_A$  จากสมการ(6.4)

$$h_A = \frac{W}{(T_h - T_c)} = \frac{17.65}{(59.92 - 23)} = 0.48$$

สมการระสมความร้อน(6.3)หาค่า  $H$

$$\frac{0.48}{(55.98 - 23)} = 1 - e^{-\left(\frac{0.48}{H}\right) 1500}$$

ได้  $H = 316.9$

นำ  $h_A$  และ  $H$  ไปแทนค่าในอุณหภูมิสุดท้าย สมการ(6.3)

$$(t) = \left[ \frac{17.65}{0.48} \left( 1 - e^{-\left(\frac{0.48}{316.9}\right) (4000)} \right) \right] + 23$$

$$= 55.97^{\circ}C \text{ ค่าที่วัดได้ } 59.92^{\circ}C$$

$$\text{ERROR} = 6.59\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทสรุป และวิเคราะห์ผล

### 7.1 การทดสอบคอนเวอร์เตอร์

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ความถี่ 150-200 kHz เครื่องต้นแบบ สามารถที่จะจ่ายแรงดันได้ โดยที่เปลี่ยนแปลงความถี่ด้วย และสามารถเพิ่ม ภาระ โหลดหลอดไฟ 100 W 20 หลอด โดยจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเข้าไปในส่วนแปลงไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสสลับ และต่อจากนั้นกำลังไฟฟ้าอีกส่วนจะไปสูญเสียในส่วนของชุดอินเวอร์เตอร์

ประสิทธิภาพของส่วนเรกติไฟลิ่งจะมากกว่า ประสิทธิภาพรวมที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ โดยที่ ประสิทธิภาพรวมทั้งอินเวอร์เตอร์ก็จะอยู่ที่ประมาณ 70 – 80 %

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า คอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบสามารถปรับความถี่สูงได้ และเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตได้ตั้งแต่ 0- 220 โวลต์ ณ ที่ความถี่ต่างๆ โดยมีประสิทธิภาพสูงสุด 70-80% ขึ้น

### 7.2 การทดสอบหม้อแปลง

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า รูปสัญญาณที่เข้าและออกหม้อแปลง จะได้ความถี่ที่ต้องการ และสามารถที่จะรักษา อัตราส่วน แรงดัน ทางค้ำ้น ปฐมภูมิ ต่อ ทางค้ำ้น ทุติยภูมิ ได้คงที่ ตามที่ออกแบบ แสดงว่าหม้อแปลงที่ใช้สามารถใช้ได้จริง ณ ที่ความถี่สูง และแรงดันสูง

จากการทดลองตอนที่ 5.3 เมื่อจ่ายแรงดันเข้าที่อิเล็กโตรด โดยปรับความถี่ที่ 200 kHz และ อิเล็กโตรดมีระยะห่างกัน 2.5 mm. เมื่อทำการทดลอง 5 ครั้ง จะเห็นว่าค่า Voltage breakdown ในแต่ละครั้งมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากจะมีแฟลคเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดเบรคดาวน์ เช่น รูปร่างของอิเล็กโตรด ผลของสิ่งที่ประอบีอน ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ เป็นต้น เมื่อนำค่า Voltage breakdown ในการทดลองแต่ละครั้งมาหาค่าเฉลี่ยจะได้เท่ากับ 2.16 kV

เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 50 kHz อากาศจะมีค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเท่ากับ 25 kV/cm และเมื่อมีระยะห่างเท่ากับ 2.5 mm. จะมีค่า Voltage breakdown เท่ากับ 6.25 kV ถ้า นำค่าเฉลี่ย Voltage breakdown ที่ความถี่ 200 kHz และที่ความถี่ 50 Hz มาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าที่ความถี่ 200 kHz นั้นสามารถเกิดการเบรคดาวน์ได้ง่ายกว่า

### 7.3 การประยุกต์นำไปใช้งาน

จากผลการทดลอง 6.5 วัดค่าความร้อนในแกนเหล็กของหม้อแปลง โดยที่ยังไม่ได้พันขดลวดทางด้านทุติยภูมิ นั้น เมื่อจ่ายแรงดันที่ 200V และความถี่ 150 kHz- 200 kHz จะพบว่าค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในรูปของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่แกน และเนื้อฉนวน แทนจะเท่ากับอุณหภูมิถึงแควด-ด้อม จึงพอที่จะสรุปได้ว่า เมื่อจ่ายแรงดันที่ 200V และความถี่ต่างๆ ผลของ CORE LOSS จะเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อออกแบบตามข้อกำหนด และใช้งานตามแบบข้อกำหนดของหม้อแปลง

จากผลการทดลอง 6.6 วัดค่าความร้อนในเนื้อฉนวนของหม้อแปลง โดยกำหนดให้แรงดันจ่ายเข้าหม้อแปลงไว้ที่ 200V และเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 160kHz-200kHz จะพบว่าที่ค่าความถี่ 200kHz จะได้ค่าการสูญเสียในรูปของอุณหภูมิสูงที่สุด แต่เมื่อลดความถี่ลงมา (< 200kHz) จะพบว่าอุณหภูมิจะใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากมาจากการออกแบบหม้อแปลงที่ว่าอัตราส่วนระหว่าง e / f ในแบบ per unit จะต้องไม่เกิน 1.1 per unit จึงทำให้มีการสูญเสียอีกรูปแบบหนึ่งโดยเราให้เป็นค่า K ดังนั้นค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนของหม้อแปลงเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่จึงมีค่าคือ  $W_d = (\omega V^2 C \tan \delta) + K$

จากผลการทดลอง 6.7 วัดค่าความร้อนในเนื้อฉนวนของหม้อแปลง โดยที่กำหนดความถี่ไว้ที่ 200kHz จะพบว่าเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 200V จะได้ค่าความร้อนที่วัดได้มีค่าสูงกว่าเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 160V, 120V, 80V และ 40V ตามลำดับ เป็นไปตามสมการที่ว่า  $W_d = \omega V^2 \epsilon \tan \delta \text{ W/cm}^3$  คือเมื่อเราเปลี่ยนแรงดันด้านอินพุต ค่า V ก็จะไปเปลี่ยนแปลงด้วยถ้าเรากำหนดค่าอื่นๆ ในสมการคงที่ ฉะนั้นจึงสรุปได้ว่า แรงดันที่จ่ายเข้าไปในหม้อแปลงมีผลต่ออุณหภูมิของหม้อแปลงหรืออีกนัยหนึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตมีผลต่อค่าการสูญเสียในเนื้อฉนวนด้วยคือ  $W_d \propto V^2$  เมื่อกำหนดให้ค่าอื่นๆ ในสมการเป็นค่าคงที่

จากผลการทดลองจะพบว่าหม้อแปลงความถี่สูงแรงดันสูงที่ใช้ฉนวน case B (Epoxy & Silicone) มีค่าอุณหภูมิในเนื้อฉนวนระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิสูงกว่าที่ใช้ฉนวน Case A ทั้งการทดลอง ป้อนแรงดันอินพุต 200 V แล้วปรับความถี่ 160kHz-200kHz และปรับแรงดันอินพุต 0V-200V ที่ความถี่ 200kHz เนื่องจาก Case A ใช้ฉนวน Epoxy Resin หุ้มเฉพาะขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ ต่างจาก case B ที่ใช้ฉนวน Epoxy Resin หุ้มขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ แล้วใช้ Silicone Resin หุ้มทับทั้งตัว ทำให้ case A มีการระบายความร้อนดีกว่า ถึงแม้ว่า Silicone Resin จะมีคุณสมบัติในการระบายความร้อนที่ดี ( นิยมใช้ในการระบายความร้อนระหว่างอุปกรณ์ Transistor กับ Heat sink ) ดังนั้นในการ ออกแบบและสร้างหม้อแปลงความถี่สูงแรงดันสูง ควรที่จะหุ้มฉนวนเฉพาะขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ ไม่ควรหุ้มฉนวนทั้งตัวเพราะจะทำให้ค่าการสูญเสียในรูปความร้อนของฉนวนมีค่าสูงขึ้น

## 7.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองบทที่ 4 จะเห็นได้ว่าเครื่องต้นแบบที่จัดสร้างสามารถใช้งานได้จริง โดยสามารถปรับแรงดันและความถี่ได้ และการทดลองบทที่ 5 จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์ที่ออกแบบสามารถยกระดับแรงดันได้ตามที่ออกแบบ โดย ณ. ที่ความถี่สูงหม้อแปลงก็ไม่เกิดการอิ่มตัวของแกนยังสามารถใช้งานได้

การทดสอบเบรคความถี่ความถี่สูงขึ้น แรงดันที่ใช้ในการเบรคความถี่ จะมีค่าค่าน้อยกว่าความถี่ที่ 50 Hz เนื่อง ณ. ที่ความถี่สูงขึ้นกลไก ในการแตกตัวของประจุอิเล็กตรอนจะแตกตัวได้ง่าย ทำให้เกิดการเบรคความถี่ได้ง่ายขึ้น ไม่ต้องใช้แรงดันสูง และถ้าสามารถเพิ่มแรงดันสูงขึ้นได้อีก การทดสอบเบรคความถี่ฉนวนชนิดอื่นนอกจาก อากาศ ก็จะทำให้ได้อีกหลายชนิด ซึ่งอาจเป็นฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว ทำให้รู้ถึงผลความถี่ต่อการเบรคความถี่ฉนวนชนิดต่างๆ

จากการประยุกต์เครื่องต้นแบบไปใช้งานกับ "การศึกษาหาค่าการสูญเสียในฉนวนอีพ็อกซี เรซิน และ ซิลิโคน เรซิน ของหม้อแปลงความถี่สูงแรงดันสูงในแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง" พบว่ามีประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการออกแบบและสร้างหม้อแปลงความถี่สูงแรงดันสูงโดยเป็นแนวทางในการเลือกชนิดของฉนวน และขั้นตอน การฉนวนของหม้อแปลงความถี่สูงแรงดันสูง

## 7.5 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการทำคอนเวอร์เตอร์ การเลือกอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้งาน ควรเพื่อคิด กระแสที่ทนได้ ไว้หลายเท่า เพราะการใช้งานจริงจะเกิดสไปต์ ขึ้นสูง และความจุเคปตาม ตลอดเวลาที่ปรับแรงดัน ระวังมอเตอร์ที่ใช้งานเกิดการเปิดวงจรพร้อมกันจะทำให้ เกิดการลัดวงจรได้

ในการพันหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงนั้นมีข้อควรระวังหลายประการด้วยกัน เพื่อให้จะทำให้แรงดันแปรผันตามอัตราส่วนส่วนของแรงดัน รูปสัญญาณขาเข้าและขาออกต้องมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ ขยายหรือลดเฉพาะขนาดของแรงดันเท่านั้น โดยผู้เขียนจะบอกให้ทราบเป็นข้อๆ ซึ่งผู้เขียนอาศัยทฤษฎีผสมผสานกับประสบการณ์ที่ได้สร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงมาใช้ในการเขียน ดังนี้

1. หม้อแปลงไม่ควรม้ออัตราส่วน ไปเกิน 10 เท่า
2. การพันลวดควรพันให้เส้นลวดชิดกัน แน่น เรียบ มากที่สุด
3. แรงดันต่อรอบไม่ควรเกิน 20 เฟอร์เซ็นต์ของฉนวนเส้นลวด
4. พยายามให้ชั้นการพันขดลวดทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิมีเพียงอย่างละ ชั้นเดียวเท่านั้น จึงจะได้อัตราส่วนตรงตามที่ได้ออกแบบไว้
5. ไม่ควรพันลวดเต็มบ๊อบบิ้นเนื่องจากช่วงบนและล่างเมื่อพันขดลวดจะเป็นอากาศที่จะมาทำหน้าที่เป็นฉนวนแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การออกแบบฉนวนทุกครั้งต้องเผื่อค่าความปลอดภัย(safety factor)
7. ทุกครั้งที่มีการพันขดลวดคร่อมกันต้องมีการฉนวนที่ดี
8. การพันฉนวนควรพันให้แน่นเพื่อให้ส่วนที่เป็นอากาศมีน้อยที่สุด
9. การพันลวดควรให้เป็นส่วนโค้งไม่ให้เป็นการงอแบบมุมฉากเพราะความเครียดของลวดไฟฟ้าบริเวณนั้นจะมีค่าสูงมาก
10. การตีเกลียวลวดเพื่อลดผลกระทบที่ผิวของลวดควรตีเกลียวให้สม่ำเสมอมากที่สุด และแน่นมากที่สุด
11. ในกรณีที่ต้องการสร้างให้มีแรงดันสูงกว่านี้ควรเปลี่ยนเป็นแซในน้ำมัน

## 7.6 การพัฒนาโครงการต่อ

ในเครื่องต้นแบบนี้ สามารถที่พัฒนาต่อไปได้ โดยการออกแบบ หม้อแปลง ขั้วระดับ แรงดันให้สูงขึ้น โดยขึ้นอยู่กับ การ ออกแบบ และการหาฉนวนหม้อแปลง อีกทั้งขนาดแกนเฟอร์ไรท์ที่หาได้ รวมถึงอุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ ถ้าสามารถหาที่พิกัดกำลังสูงขึ้นได้ ก็จะสามารถ เพิ่มพิกัดการทดสอบแรงดันสูงความถี่สูงได้ ซึ่งในอนาคต ก็น่าจะสามารถทดแทน วงจรหม้อแปลงทดสอบค่าที่ใช้ในการทดสอบฉนวนอยู่ในปัจจุบันได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ST.Louis,1989."High Frequency Switching Power Supply" McGraw-Hill.
- [2] C. I.Hubert ,1991. "Electrical Machine," McGraw-Hill.
- [3] N. Mohan, T. M. Undeland, and William P. Robbins,1989."Power Electronics," John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Camilli, G. and Chapman, J.J. Gaseos,1947. "Insulation for High Voltage Apparatus," Trans. AIEE vol.66.
- [5] Craggs J.D,1945."High Voltage Measurement Testing and Design" John Wiley & Sons.
- [6] E.kuffel, and W.S Zaengl,1984."High Voltage Engineering Fundamental" Pergamon Press Oxford, 1<sup>st</sup> ed.
- [7] L.L ALSTON ,1968 " High-Voltage Technology ", Harwell Post-Graduate Series , Oxford University press.
- [8] Mc lyman, Colonel Em.T,1988. "Transfer and inductor design handbook", second edition,New York : Marcel Dekker.
- [9] Ozisik, M.Necati,1985."Heat transfer : a basic approach", New York : Mc Graw-Hill.
- [10] Hiroshi KURITA.1988 "Dielectric loss of high voltage / high frequency transformers use in switching power supply for space"1120-1126.PESC '88 RECORD,IEEE.
- [11] D.Y. Chen,1978"COMPARISONS OF HIGH FREQUENCY MAGNETIC CORE LOSSES UNDER TWO DIFFERENT DRIVING CONDITION;A SINUSODAL VOLTAGE AND A SQUARE-WAVE VOLTAGE" 237-242,IEEE.
- [12] S.Trerutpicharn,S.Potivejkul,V.kinnares,2000. "HIGH VOLTAGE AND HIGH FREQUENCY SWITCHING POWER SUPPLY FOR HIGH FREQUENCY SOLID INSULATOR TESTING" POWERCON2000, 4-7 December 2000, The University of Western Australia ,Perth , Australia.
- [13] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล,2537."ระบบไฟฟ้ากำลัง เล่ม2"ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [14] สำรวย สังข์สะอาด,2528."วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" ,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า,คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

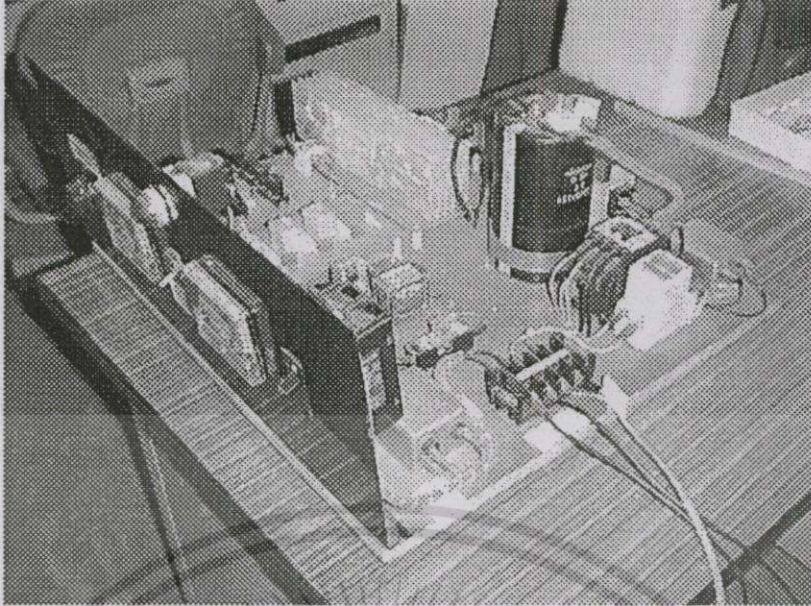
- [15] ศักดิ์ชัย ตริรัตน์พิจารณ์, แสนศักดิ์ ตีอ่อน, ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล 2537. "หม้อแปลงแรงดันแรงดันสูง ความถี่สูง สำหรับทดสอบฉนวนลูกถ้วย" ประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19, ขอนแก่น
- [16] ศักดิ์ชัย ตริรัตน์พิจารณ์ และศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2544. "เครื่องต้นแบบ สำหรับการทดสอบแรงดันสูง ความถี่สูง โดย ใช้อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง" วิศวกรรมลาดกระบัง, 30-35, ฉบับที่ 2 ปีที่ 18 มิถุนายน , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 ชุดอินเวอร์เตอร์ที่จัดสร้าง

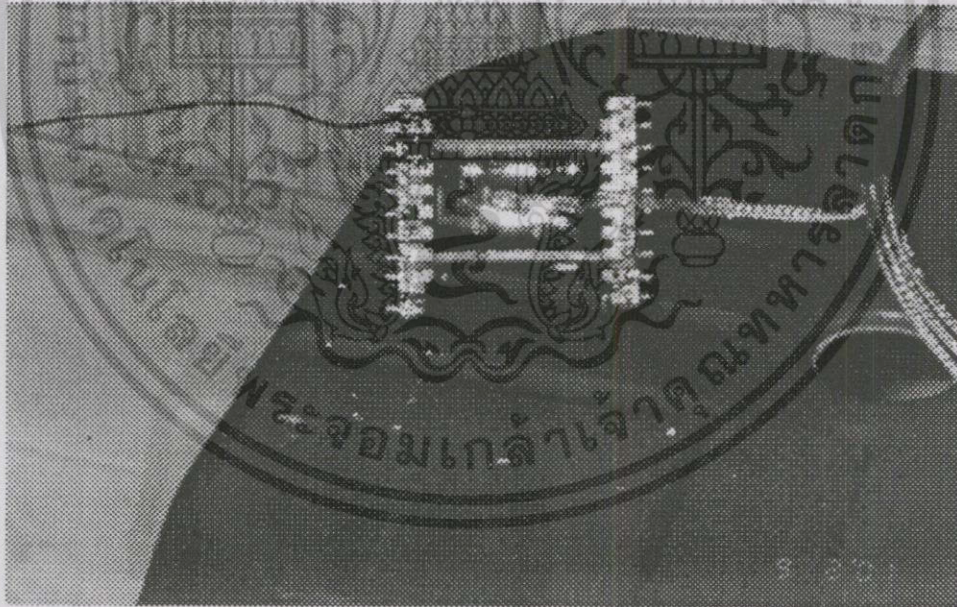


รูปที่ ก-2 หม้อแปลงความถี่สูงที่จัดสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

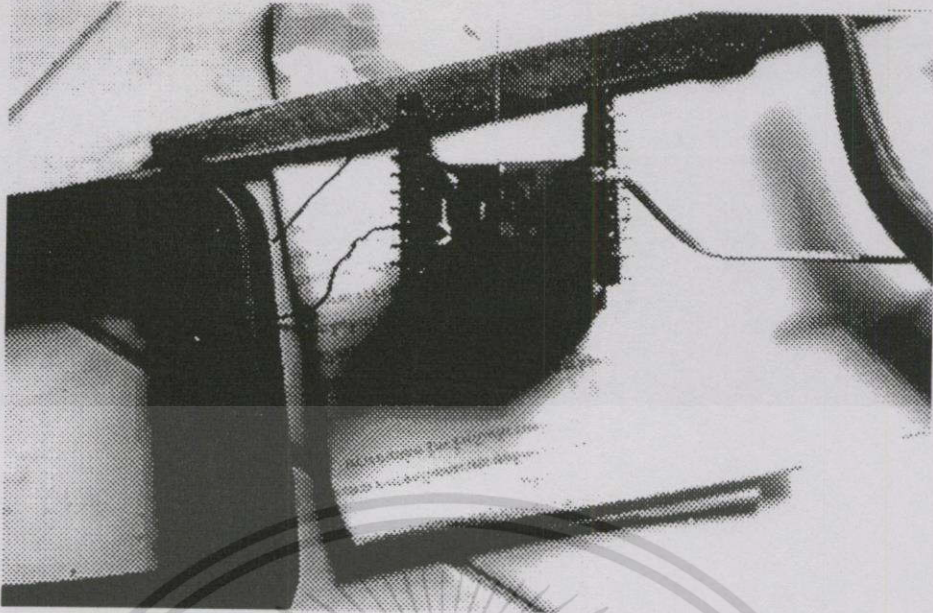


รูปที่ ก-3 สารฉนวน Epoxy Resin และ Silicone Resin

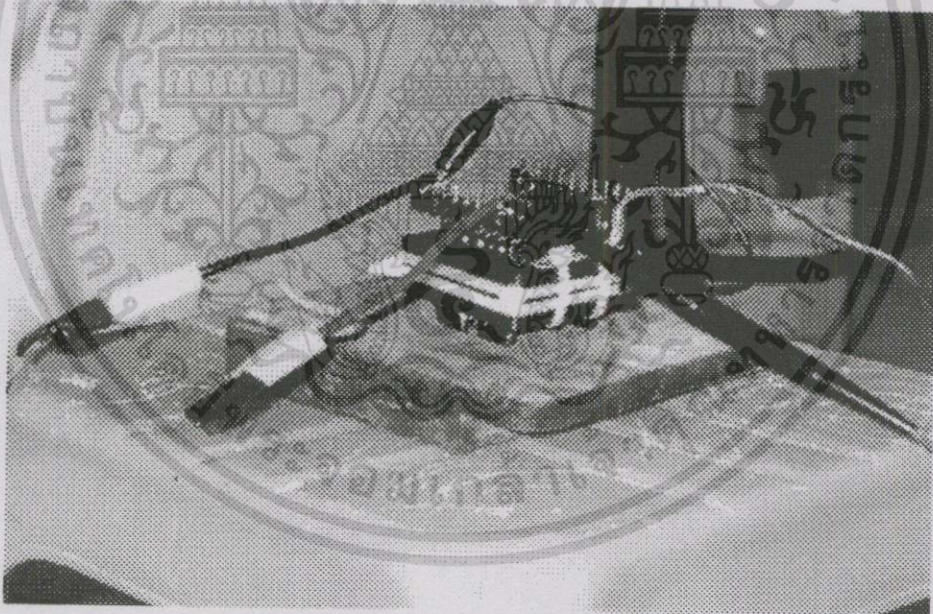


รูปที่ ก-4 การฉนวน Epoxy Resin โดยห่อทับขด Primary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

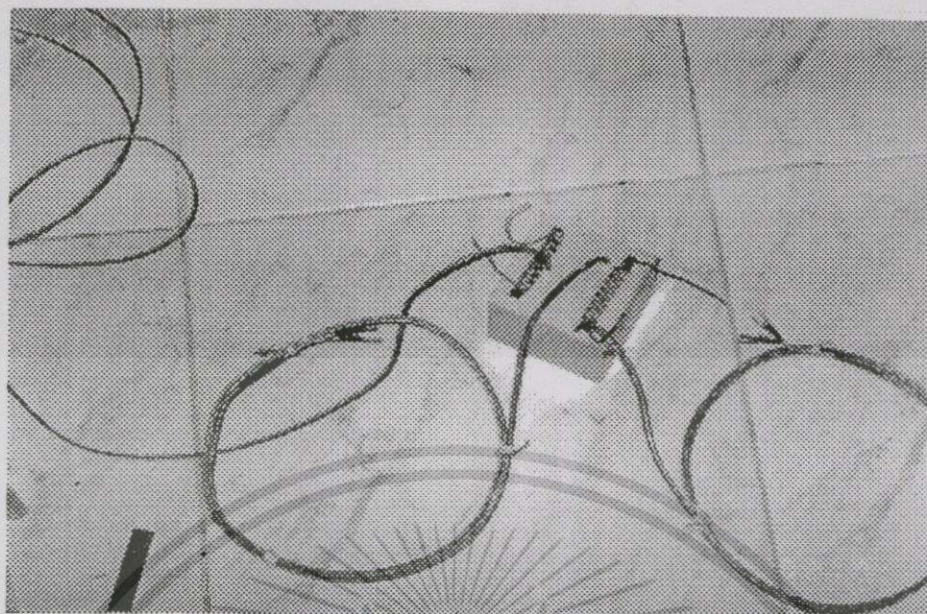


รูปที่ ก-5 การพันขดลวดทางด้าน Secondary

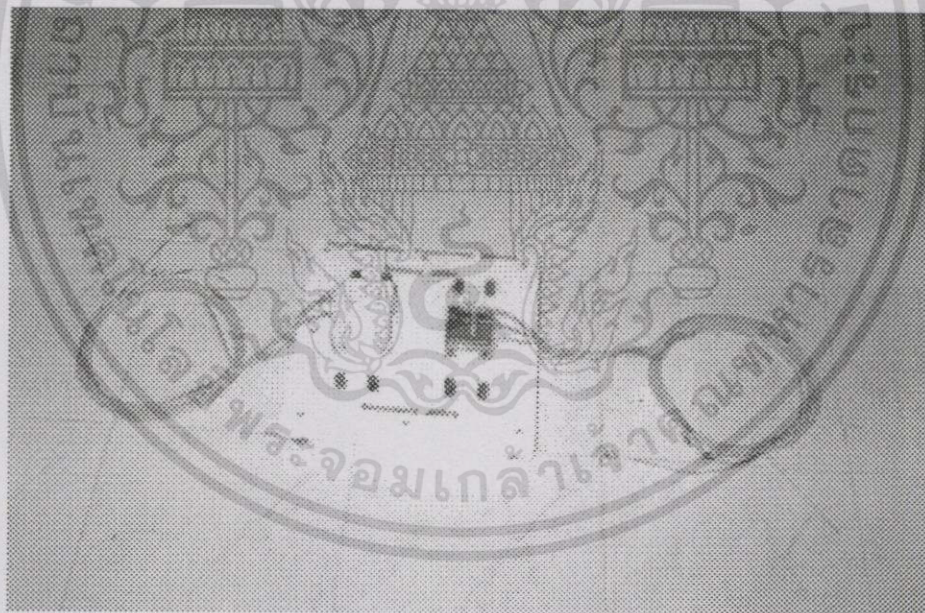


รูปที่ ก-6 หม้อแปลง case A ที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

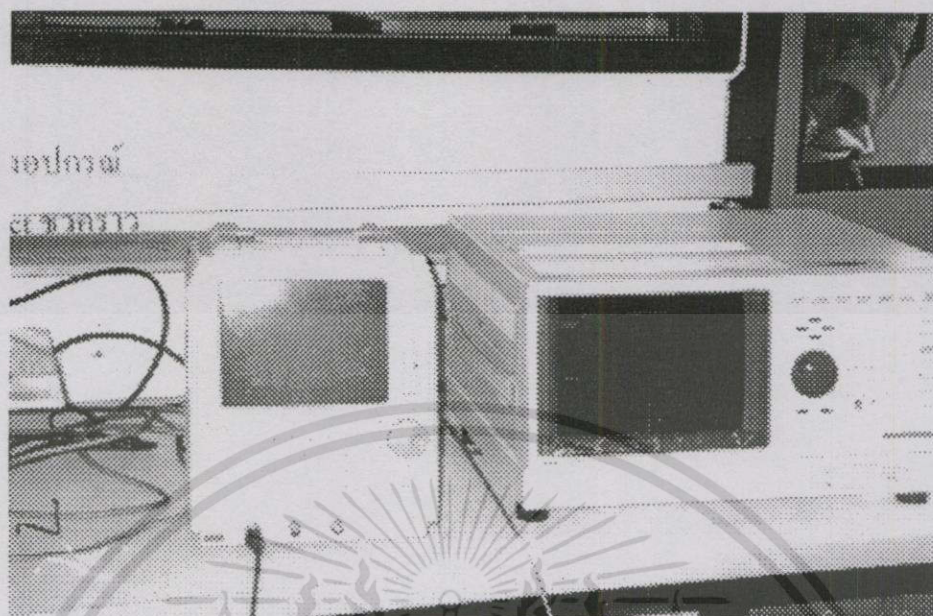


รูปที่ ก-7 หม้อแปลง case B ที่สมบูรณ์



รูปที่ ก-8 หม้อแปลง case A และ case B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

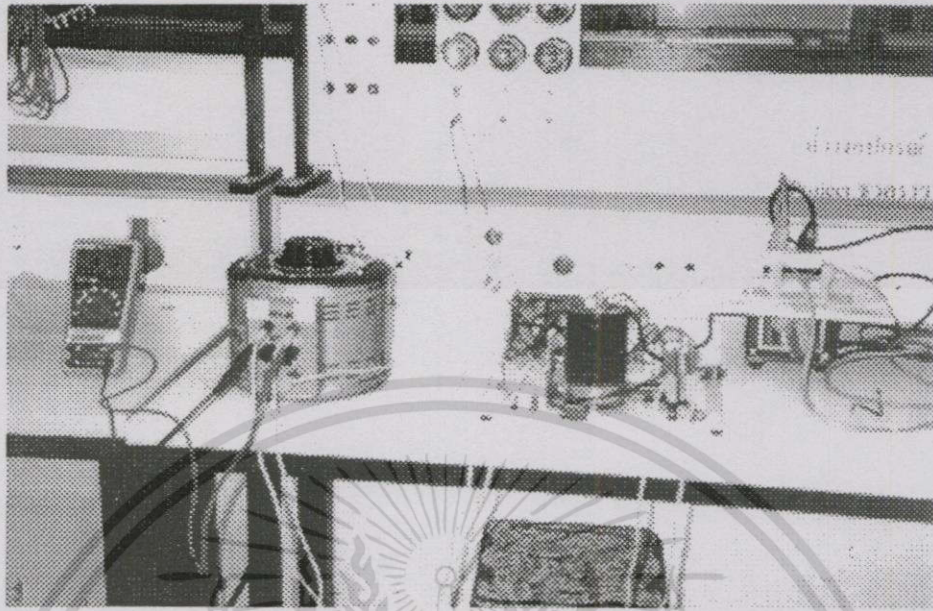


รูปที่ ก-9 Analyzing Recorder และ Oscilloscope



รูปที่ ก-10 การทดสอบหาการสูญเสียของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-11 การเซตเครื่องมือต่างๆ

เครื่องมือที่สำคัญที่ใช้ในการทดลอง

1. Chauvin Arnoux รุ่น C.A 8201 Made in France
2. YOKOGAWA 8 bits 200 m/s ,150 MHz
3. Fluke 41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลอง caseA ที่ความถี่ 160kHz และแรงดันอินพุต = 200V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary (°C)	อุณหภูมิที่ ฉนวน (°C)	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก (°C)
0	26.48	25.28	22.37
600	34.64	28.13	28.88
1200	39.78	31.96	33.27
1800	42.12	33.78	33.04
2400	44.63	35.15	35.90
3000	46.11	36.24	36.35
3600	48.11	37.66	38.86
4200	48.91	38.46	40.46
4800	49.65	38.81	39.26
5400	49.36	38.86	40.86
6000	50.33	39.03	39.78
6600	50.51	39.21	40.18
7200	49.36	38.81	39.49
7800	49.82	39.09	39.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลอง caseA ที่ความถี่ 180kHz และแรงดันอินพุต = 200V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary (°C)	อุณหภูมิที่ ฉนวน (°C)	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก (°C)
0	25.17	24.82	20.89
600	35.33	28.36	26.94
1200	40.52	31.96	30.19
1800	43.83	34.35	32.81
2400	45.31	35.90	33.38
3000	47.59	37.09	36.18
3600	47.65	37.61	35.95
4200	48.22	38.12	36.24
4800	50.05	39.38	38.75
5400	50.05	38.75	37.61
6000	50.33	38.69	37.66
6600	49.48	38.75	36.35
7200	49.93	38.63	37.38
7800	49.82	38.63	37.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลอง caseA ที่ความถี่ 200kHz และแรงดันอินพุต = 200V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ ฉนวน ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	26.82	25.74	23.34
600	38.98	30.99	29.68
1200	44.97	35.50	34.35
1800	49.02	38.86	36.87
2400	53.36	41.37	40.40
3000	55.98	43.26	42.86
3600	57.98	44.46	43.83
4200	59.46	46.62	46.51
4800	59.81	45.60	47.02
5400	60.38	45.77	46.34
6000	60.09	45.83	45.25
6600	59.69	45.43	46.00
7200	60.43	45.54	47.48
7800	59.58	45.54	45.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลอง caseA ที่ความถี่ 200kHz และแรงดันอินพุต = 160V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary (°C)	อุณหภูมิที่ ฉนวน (°C)	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก (°C)
0	25.85	23.68	21.8
600	33.56	27.62	25.17
1200	36.24	29.33	26.48
1800	38.41	30.53	27.68
2400	39.78	31.62	28.36
3000	41.15	32.13	30.99
3600	42.29	33.38	31.10
4200	41.72	33.33	30.65
4800	42.86	34.07	33.10
5400	43.14	33.96	32.99
6000	43.37	33.67	33.04
6600	43.71	33.96	32.64
7200	42.57	33.61	32.53
7800	43.77	33.84	33.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลอง caseA ที่ความถี่ 200kHz และแรงดันอินพุต = 120V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary (°C)	อุณหภูมิที่ ฉนวน (°C)	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก (°C)
0	24.03	23.23	22.31
600	26.31	23.23	22.09
1200	28.13	24.54	23.28
1800	29.79	25.68	25.00
2400	30.65	26.42	26.02
3000	31.10	26.76	26.02
3600	31.44	26.99	26.76
4200	31.79	27.22	26.48
4800	32.53	27.56	27.39
5400	31.79	27.45	26.02
6000	32.53	27.68	27.05
6600	32.36	27.68	26.82
7200	32.02	27.68	26.94
7800	32.02	27.45	27.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลอง caseA ที่ความถี่ 200kHz และแรงดันอินพุต = 80V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ ฉนวน ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	25.34	23.63	23.80
600	24.25	22.31	22.03
1200	25.62	22.83	23.68
1800	24.6	22.48	22.54
2400	25.51	23.28	23.80
3000	26.48	25.91	24.82
3600	28.08	26.99	26.19
4200	28.76	27.91	26.88
4800	29.22	28.19	27.34
5400	29.05	28.65	27.16
6000	30.07	28.93	28.19
6600	30.13	29.16	28.13
7200	30.02	28.93	28.02
7800	30.53	29.22	28.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 ผลการทดลอง caseA ที่ความถี่ 200kHz และแรงดันอินพุต = 40V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary (°C)	อุณหภูมิที่ ฉนวน (°C)	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก (°C)
0	21.46	20.49	20.94
600	23.85	23.23	23.28
1200	24.25	23.91	23.57
1800	24.31	23.97	23.57
2400	24.71	24.20	23.63
3000	24.77	24.37	23.91
3600	25.68	25.00	25.00
4200	25.34	24.94	24.25
4800	25.17	25.00	24.03
5400	25.45	25.11	24.31
6000	25.85	25.28	24.94
6600	25.68	25.17	24.65
7200	25.85	25.34	24.82
7800	25.62	25.05	24.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-8 ผลการทดลอง caseB ที่ความถี่ 160kHz และแรงดันอินพุต = 200V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ ฉนวน ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	26.82	24.54	21.40
600	37.61	29.28	22.54
1200	46.28	35.67	30.59
1800	50.79	39.72	34.41
2400	55.53	44.00	37.49
3000	57.92	46.34	40.69
3600	59.69	48.56	41.89
4200	61.06	49.99	44.63
4800	61.86	50.90	45.14
5400	62.66	51.36	46.57
6000	64.14	52.50	49.59
6600	64.32	52.84	49.76
7200	64.26	52.9	49.59
7800	64.14	52.73	48.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 ผลการทดลอง caseB ที่ความถี่ 180kHz และแรงดันอินพุต = 200V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary (°C)	อุณหภูมิที่ ฉนวน (°C)	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก (°C)
0	25.11	23.45	20.94
600	38.41	29.79	23.97
1200	47.42	36.01	29.50
1800	52.33	41.03	33.50
2400	56.67	44.68	37.95
3000	58.04	47.02	38.86
3600	59.46	48.74	41.55
4200	61.35	50.33	43.49
4800	61.63	50.73	44.34
5400	62.20	51.53	45.08
6000	62.60	51.99	46.62
6600	63.17	52.56	47.48
7200	65.11	53.64	50.96
7800	64.54	53.24	48.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-10 ผลการทดลอง caseB ที่ความถี่ 200kHz และแรงดันอินพุต = 200V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary (°C)	อุณหภูมิที่ ฉนวน (°C)	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก (°C)
0	23.57	23.06	15.64
600	43.60	32.07	25.00
1200	53.19	40.18	34.3
1800	57.01	45.14	38.01
2400	60.78	48.68	42.97
3000	61.92	50.68	44.4
3600	64.71	52.79	48.62
4200	66.94	53.99	50.11
4800	67.63	55.18	50.85
5400	66.88	55.41	48.56
6000	68.14	55.98	51.08
6600	67.34	55.93	49.53
7200	68.77	56.61	51.36
7800	68.25	56.44	50.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-11 ผลการทดลอง caseB ที่ความถี่ 200kHz และแรงดันอินพุท = 160V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ ฉนวน ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	24.37	23.63	20.32
600	35.38	28.19	22.71
1200	40.8	32.41	26.59
1800	44	35.61	29.16
2400	47.42	38.58	32.81
3000	49.31	40.35	32.64
3600	52.27	42.69	35.95
4200	53.87	44.34	38.01
4800	54.5	45.25	37.61
5400	56.67	46.57	39.09
6000	56.95	47.2	40.58
6600	58.1	48.05	41.72
7200	59.12	48.79	42.12
7800	60.21	49.31	42.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-12 ผลการทดลอง caseB ที่ความถี่ 200kHz และแรงดันอินพุต = 120V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ ฉนวน ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	24.14	23.68	20.43
600	29.96	25.62	22.31
1200	33.44	28.02	23.8
1800	34.98	29.96	25.11
2400	36.3	31.22	26.65
3000	37.84	32.41	27.85
3600	38.98	33.38	29.16
4200	40.46	34.41	30.3
4800	40.97	35.15	29.79
5400	42.4	36.01	31.27
6000	42.4	36.3	31.56
6600	42.92	36.92	31.16
7200	44.28	37.66	33.56
7800	44.06	37.61	32.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-13 ผลการทดลอง caseB ที่ความถี่ 200kHz และแรงดันอินพุต = 80V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary (°C)	อุณหภูมิที่ ฉนวน (°C)	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก (°C)
0	25.17	24.08	23.57
600	25.51	23.68	22.09
1200	27.39	24.77	23.8
1800	27.96	25.51	24.31
2400	28.71	26.02	25
3000	29.16	26.37	24.65
3600	29.45	26.65	25.45
4200	28.71	26.31	24.31
4800	29.85	27.11	26.14
5400	29.68	26.94	25.62
6000	29.5	26.99	25.11
6600	29.96	27.22	25.45
7200	29.73	27.11	25.28
7800	30.53	27.45	26.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-14 ผลการทดลอง caseA ที่ความถี่ 120kHz และแรงดันอินพุท = 40V

No. (sec/2)	อุณหภูมิที่ขด Primary ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ ฉนวน ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิที่ แกนเหล็ก ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	23.91	23.28	23.45
600	22.77	22.03	21.86
1200	23.11	22.37	21.74
1800	23.06	22.37	21.91
2400	23.4	22.6	22.31
3000	23.85	22.77	22.88
3600	23.11	22.43	21.97
4200	22.83	22.2	21.74
4800	23.23	22.37	22.09
5400	23.4	22.37	22.48
6000	23.45	22.54	22.2
6600	23.06	22.2	21.8
7200	22.94	22.14	21.63
7800	23.45	22.43	22.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**International**  
**IR Rectifier**

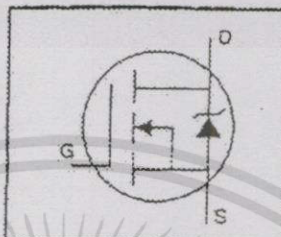
IRFP460

PD-9.512B

**IRFP460**

HEXFET® Power MOSFET

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



$$V_{DSS} = 500V$$

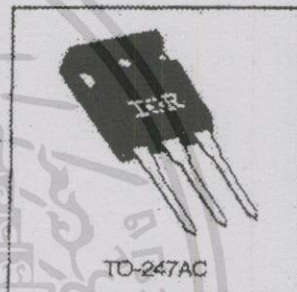
$$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$$

$$I_D = 20A$$

### Description

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

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



DATA SHEET

### Absolute Maximum Ratings

Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	20	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	13	
$I_{DM}$	80	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	280	W
Linear Derating Factor	2.2	W/°C
$V_{GS}$	$\pm 20$	V
$E_{AS}$	960	mJ
$I_{AR}$	20	A
$E_{AR}$	28	mJ
$dv/dt$	3.5	V/ns
$T_J$	-55 to +150	°C
$T_{STG}$		
Soldering Temperature, for 10 seconds		
Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1 N·m)	

### Thermal Resistance

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

1025

J-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## IRFP460

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

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	$V_{GS}=0V, I_D=250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}$ , $I_D=1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	$\Omega$	$V_{GS}=10V, I_D=12A$ ①
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	13	—	—	S	$V_{DS}=50V, I_D=12A$ ①
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	$\mu A$	$V_{DS}=500V, V_{GS}=0V$
		—	—	250	$\mu A$	$V_{DS}=400V, V_{GS}=0V, T_J=125^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS}=20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS}=-20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	210	nC	$I_D=20A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	29	nC	$V_{DS}=400V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110	nC	$V_{GS}=10V$ See Fig. 6 and 13 ②
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	$V_{DD}=250V$
$t_r$	Rise Time	—	69	—	ns	$I_D=20A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	110	—	ns	$R_G=4.3\Omega$
$t_f$	Fall Time	—	58	—	ns	$R_D=13\Omega$ See Figure 10 ②
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact
$L_S$	Internal Source Inductance	—	13	—	nH	
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	4200	—	pF	$V_{GS}=0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	870	—	pF	$V_{DS}=25V$
$C_{rss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—	pF	$f=1.0MHz$ See Figure 5

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80	A	
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=20A, V_{GS}=0V$ ②
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	$T_J=25^\circ\text{C}, I_F=20A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	$\mu C$	$di/dt=100A/\mu s$ ②
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S+L_D$ )				

## Notes:

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

②  $V_{DD}=50V$ , starting  $T_J=25^\circ\text{C}$ ,  $L=4.3mH$ ,  $R_G=25\Omega$ ,  $I_{AS}=20A$  (See Figure 12)

③  $I_{SD}\leq 20A$ ,  $di/dt\leq 160A/\mu s$ ,  $V_{DD}\leq V_{(BR)DSS}$ ,  $T_J\leq 150^\circ\text{C}$

④ Pulse width  $\leq 300\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

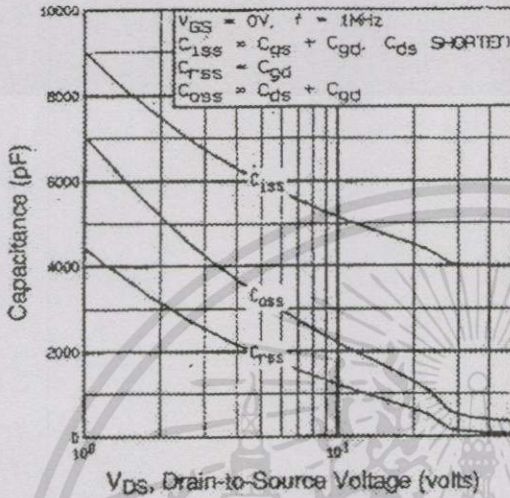


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

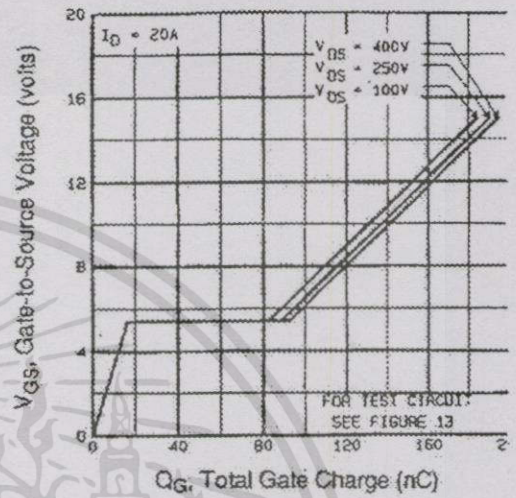


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

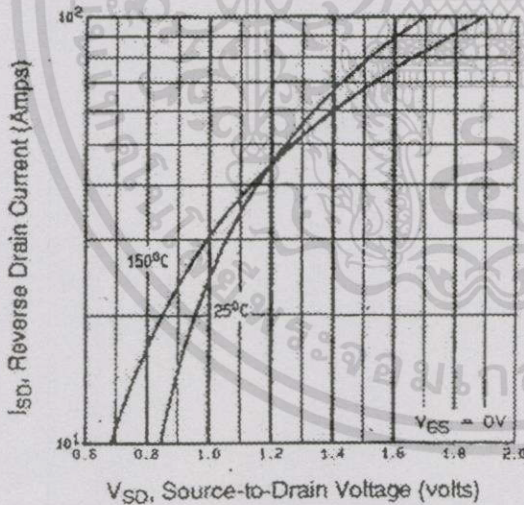


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

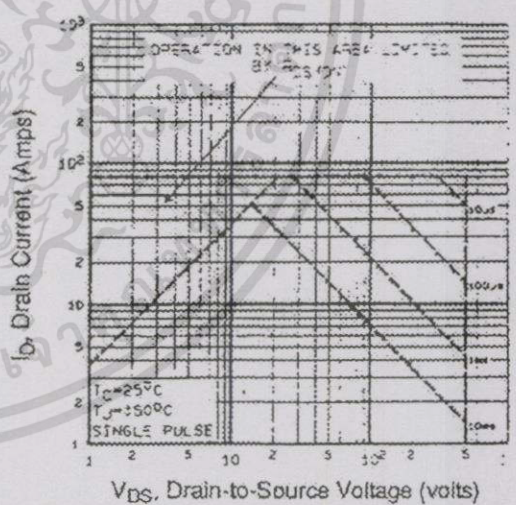


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# IRFP460

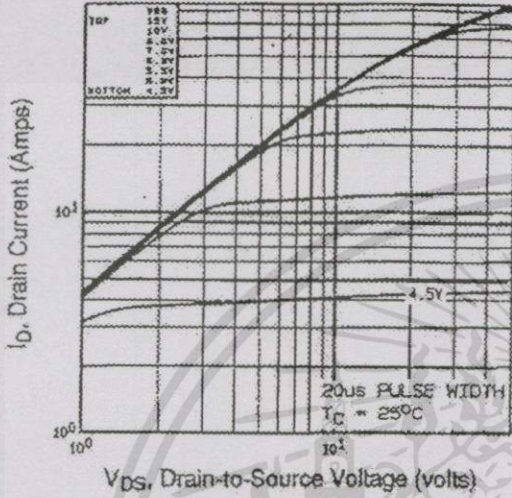


Fig 1. Typical Output Characteristics,  $T_C=25^\circ\text{C}$

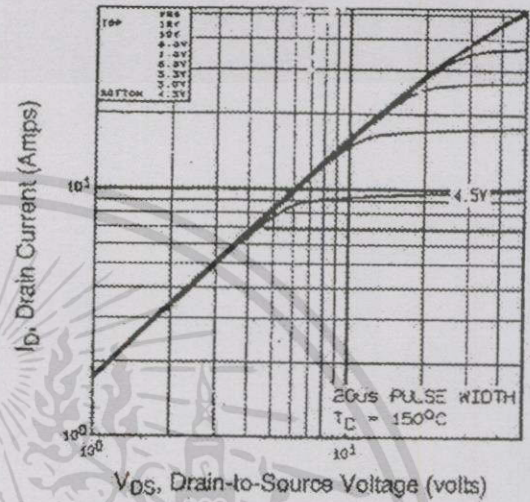


Fig 2. Typical Output Characteristics,  $T_C=150^\circ\text{C}$

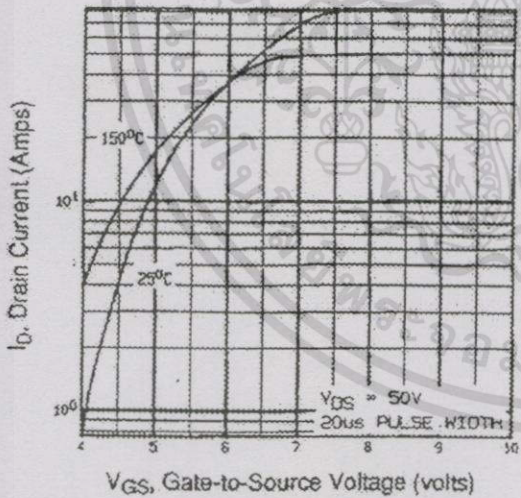


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

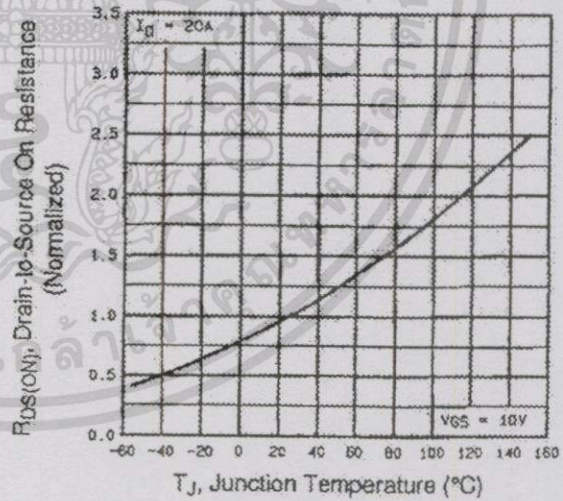


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# IRFP460

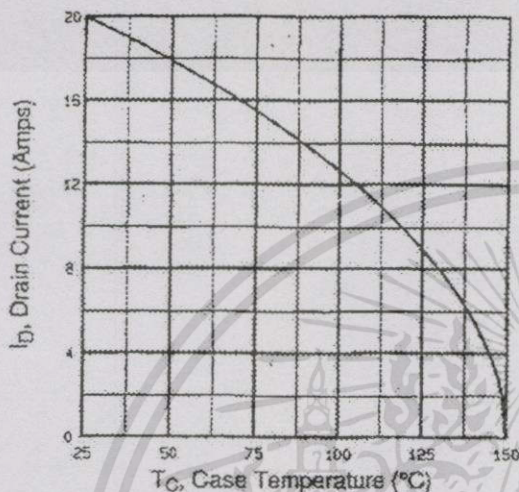


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

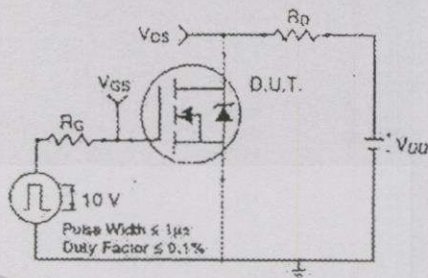


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

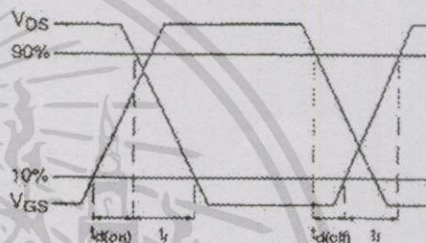


Fig 10b. Switching Time Waveforms

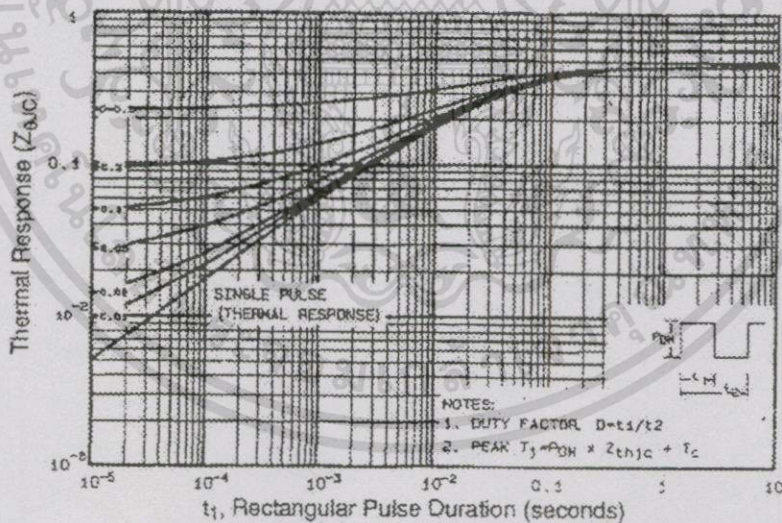


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

DATA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IRFP460

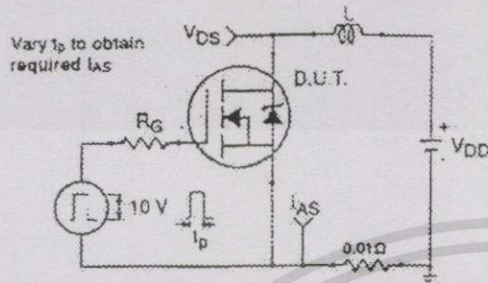


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

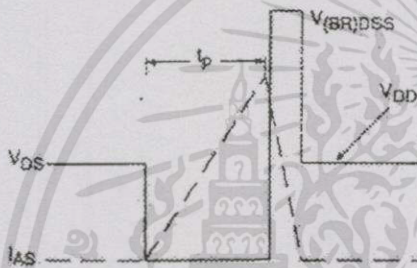


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

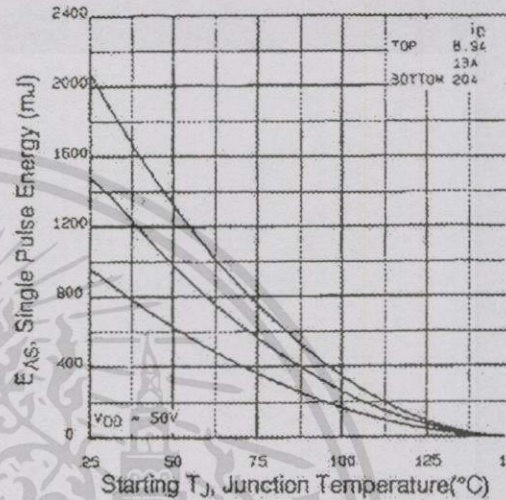


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

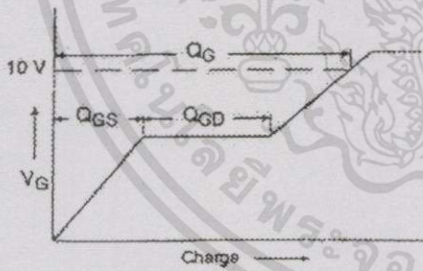


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

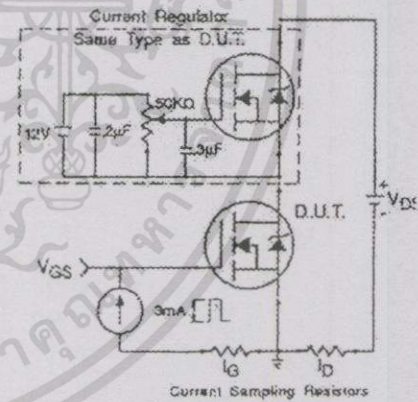


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

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

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

Appendix C: Part Marking Information – See page 1517



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TL494

## SWITCHMODE™ Pulse Width Modulation Control Circuit

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

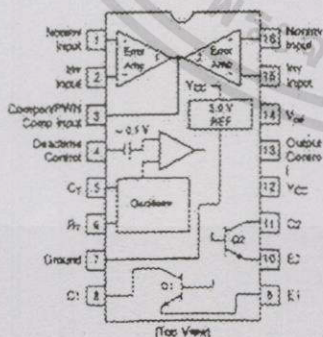
- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator with Master or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5.0 V Reference
- Adjustable Deadtime Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source or Sink
- Output Control for Push-Pull or Single-Ended Operation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

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

Rating	Symbol	TL494C	TL494I	Unit
Power Supply Voltage	$V_{CC}$	42		V
Collector Output Voltage	$V_{C1}, V_{C2}$	42		V
Collector Output Current (Each transistor) (Note 1.)	$I_{C1}, I_{C2}$		500	mA
Amplifier Input Voltage Range	$V_{IR}$	-0.3 to +42		V
Power Dissipation @ $T_A \leq 45^\circ\text{C}$	$P_D$		1000	mW
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$		80	$^\circ\text{C/W}$
Operating Junction Temperature	$T_J$		125	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{STG}$		-55 to +125	$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	$T_A$			$^\circ\text{C}$
TL494C		0 to +70		
TL494I		-40 to +85		
Derating Ambient Temperature	$T_A$		45	$^\circ\text{C}$

1. Maximum thermal limits must be observed.

### PIN CONNECTIONS



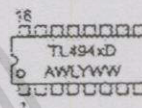
ON Semiconductor

http://onsemi.com

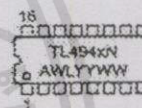
### MARKING DIAGRAMS



SO-16  
D SUFFIX  
CASE 7518



PDIP-16  
N SUFFIX  
CASE 648



x = C or I  
A = Assembly Location  
WL L = Water Lot  
YY, Y = Year  
YW, W = Work Week

### ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
TL494CD	SO-16	48 Units/Rail
TL494CDR2	SO-16	2500 Tape & Reel
TL494CN	PDIP-16	500 Units/Rail
TL494IN	PDIP-16	500 Units/Rail

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TL494

## RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Voltage	$V_{CC}$	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	$V_{C1}, V_{C2}$	—	30	40	V
Collector Output Current (Each transistor)	$I_{C1}, I_{C2}$	—	—	200	mA
Amplified Input Voltage	$V_{in}$	-0.3	—	$V_{CC} - 2.0$	V
Current into Feedback Terminal	$I_b$	—	—	0.3	mA
Reference Output Current	$I_{ref}$	—	—	10	mA
Timing Resistor	$R_T$	1.8	30	500	k $\Omega$
Timing Capacitor	$C_T$	0.0047	0.001	10	$\mu$ F
Oscillator Frequency	$f_{osc}$	1.0	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = 15$  V,  $C_T = 0.01$   $\mu$ F,  $R_T = 12$  k $\Omega$ , unless otherwise noted.)

For typical values  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , for min/max values  $T_A$  is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>REFERENCE SECTION</b>					
Reference Voltage ( $I_b = 1.0$ mA)	$V_{ref}$	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation ( $V_{CC} = 7.0$ V to 40 V)	$R_{regline}$	—	2.0	25	mV
Load Regulation ( $I_b = 1.0$ mA to 10 mA)	$R_{regload}$	—	3.0	15	mV
Short Circuit Output Current ( $V_{ref} = 0$ V)	$I_{sc}$	15	35	75	mA
<b>OUTPUT SECTION</b>					
Collector Off-State Current ( $V_{CC} = 40$ V, $V_{CE} = 40$ V)	$I_{C(off)}$	—	2.0	100	$\mu$ A
Emitter Off-State Current ( $V_{CC} = 40$ V, $V_C = 40$ V, $V_E = 0$ V)	$I_{E(off)}$	—	—	-100	$\mu$ A
Collector-Emitter Saturation Voltage (Note 2.) Common-Emitter ( $V_E = 0$ V, $I_C = 100$ mA) Emitter-Follower ( $V_C = 15$ V, $I_E = -200$ mA)	$V_{sat(C)}$ $V_{sat(E)}$	—	1.1 1.5	1.3 2.5	V
Output Control Pin Current Low State ( $V_{OC} \leq 0.4$ V) High State ( $V_{OC} = V_{in}$ )	$I_{OC(L)}$ $I_{OC(H)}$	—	10 0.2	— 3.5	$\mu$ A mA
Output Voltage Rise Time Common-Emitter (See Figure 12) Emitter-Follower (See Figure 13)	$t_r$	—	100 100	200 200	ns
Output Voltage Fall Time Common-Emitter (See Figure 12) Emitter-Follower (See Figure 13)	$t_f$	—	25 40	100 100	ns

2. Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperature as possible.

## TL494

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_{CC} = 15\text{ V}$ ,  $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ ,  $R_T = 12\ \text{k}\Omega$  unless otherwise noted.)For typical values  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , for min/max values  $T_A$  is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>ERROR AMPLIFIER SECTION</b>					
Input Offset Voltage ( $V_O$ (Pin 3) = 2.5 V)	$V_{IO}$	—	2.0	+0	mV
Input Offset Current ( $V_O$ (Pin 3) = 2.5 V)	$I_{IO}$	—	5.0	250	nA
Input Bias Current ( $V_O$ (Pin 3) = 2.5 V)	$I_{IB}$	—	-0.1	-1.0	$\mu\text{A}$
Input Common Mode Voltage Range ( $V_{CC} = 40\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$V_{ICR}$	-0.3 to $V_{CC}-2.0$			V
Open Loop Voltage Gain ( $\Delta V_O = 3.0\text{ V}$ , $V_O = 0.5\text{ V}$ to $3.5\text{ V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$A_{VOL}$	70	95	—	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ( $V_O = 0.5\text{ V}$ to $3.5\text{ V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$f_c$	—	350	—	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ( $V_O = 0.5\text{ V}$ to $3.5\text{ V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$\phi_m$	—	65	—	deg
Common Mode Rejection Ratio ( $V_{CC} = 40\text{ V}$ )	CMRR	85	90	—	dB
Power Supply Rejection Ratio ( $\Delta V_{CC} = 33\text{ V}$ , $V_O = 2.5\text{ V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	PSRR	—	100	—	dB
Output Sink Current ( $V_O$ (Pin 3) = 0.7 V)	$I_{OL}$	0.3	0.7	—	mA
Output Source Current ( $V_O$ (Pin 3) = 3.5 V)	$I_{OS}$	2.0	-4.0	—	mA
<b>PWM COMPARATOR SECTION</b> (Test Circuit Figure 11)					
Input Threshold Voltage (Zero Duty Cycle)	$V_{TH+}$	—	2.5	4.5	V
Input Sink Current ( $V_{Pin 3} = 0.7\text{ V}$ )	$I_{-}$	0.3	0.7	—	mA
<b>DEADTIME CONTROL SECTION</b> (Test Circuit Figure 11)					
Input Bias Current (Pin 4) ( $V_{Pin 4} = 0\text{ V}$ to $5.25\text{ V}$ )	$I_{B4}$ (DT)	—	-2.0	-1.0	$\mu\text{A}$
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ( $V_{Pin 4} = 0\text{ V}$ , $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ ) ( $V_{Pin 4} = 0\text{ V}$ , $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	DC <sub>max</sub>	45	48	50	%
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	$V_{TH}$	0	2.8	3.3	V
<b>OSCILLATOR SECTION</b>					
Frequency ( $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	$f_{osc}$	—	40	—	kHz
Standard Deviation of Frequency* ( $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	$\sigma_{osc}$	—	3.0	—	%
Frequency Change with Voltage ( $V_{CC} = 7.0\text{ V}$ to $40\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$\Delta f_{osc} (\Delta V)$	—	0.1	—	%
Frequency Change with Temperature ( $\Delta T_A = T_{low}$ to $T_{high}$ ) ( $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ )	$\Delta f_{osc} (\Delta T)$	—	—	12	%
<b>UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION</b>					
Turn-On Threshold ( $V_{CC}$ increasing, $I_{ref} = 1.0\ \text{mA}$ )	$V_{in}$	5.5	5.43	7.0	V
<b>TOTAL DEVICE</b>					
Standby Supply Current (Pin 6 at $V_{in}$ , All other inputs and outputs open) ( $V_{CC} = 15\text{ V}$ ) ( $V_{CC} = 40\text{ V}$ )	$I_{CC}$	—	5.5	10	mA
Average Supply Current ( $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ , $V_{Pin 4} = 2.0\text{ V}$ ) ( $V_{CC} = 15\text{ V}$ ) (See Figure 12)		—	7.0	—	mA

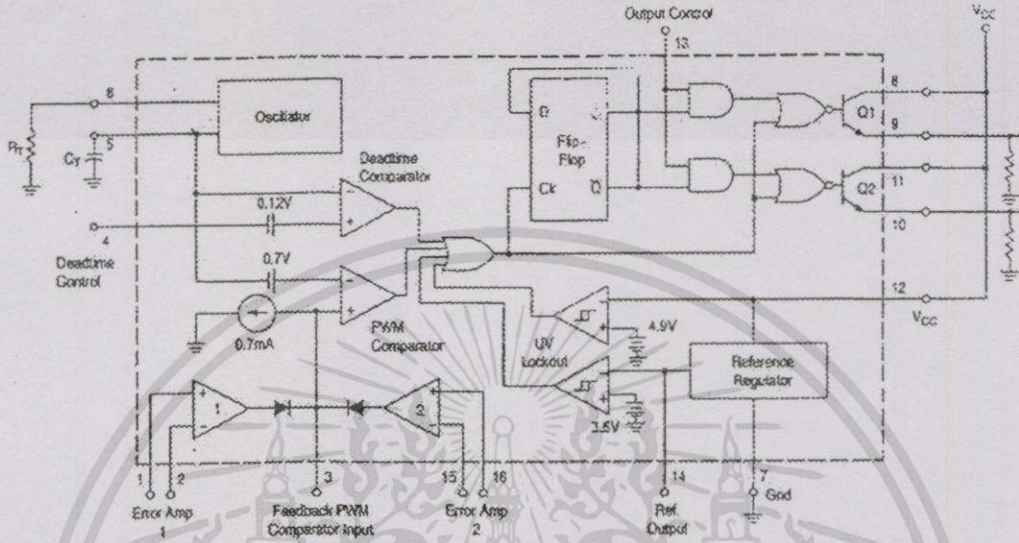
\* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula,  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}{N-1}}$ <http://onsemi.com>

3

9-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494



This device contains 46 active transistors.  
 Figure 1. Representative Block Diagram

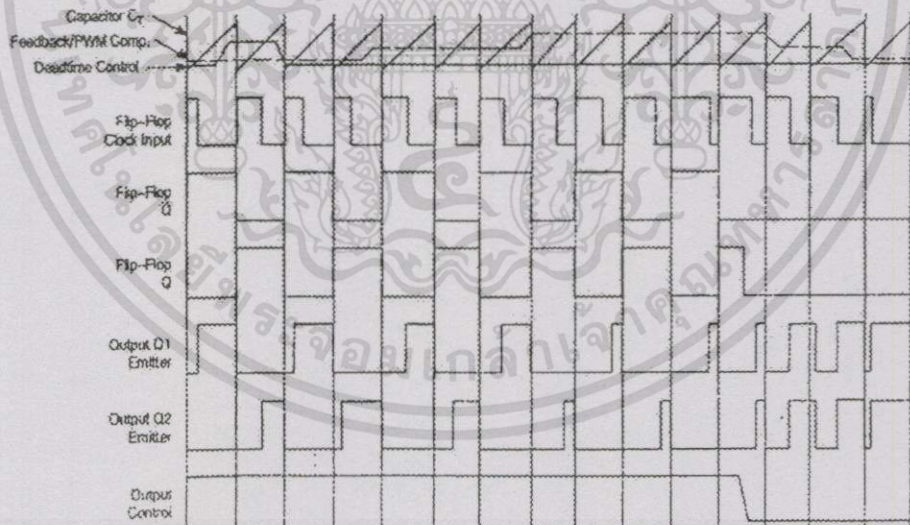


Figure 2. Timing Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

APPLICATIONS INFORMATION

Description

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

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

For more information refer to Figure 3.

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

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

Functional Table

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

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the deadtime control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 V to 3.5 V. Both error amplifiers have a

common mode input range from -0.3 V to ( $V_{CC} - 2V$ ), and may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the noninverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

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

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

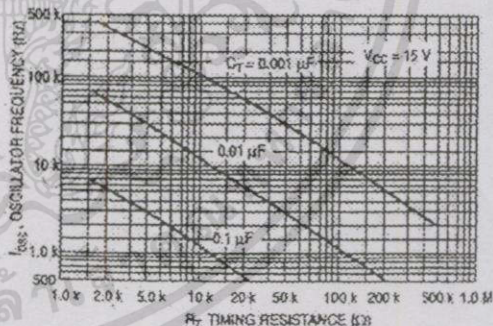


Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance

TL494

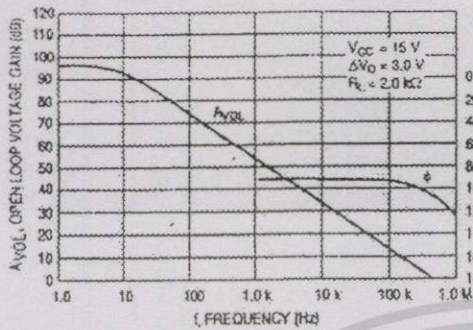


Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

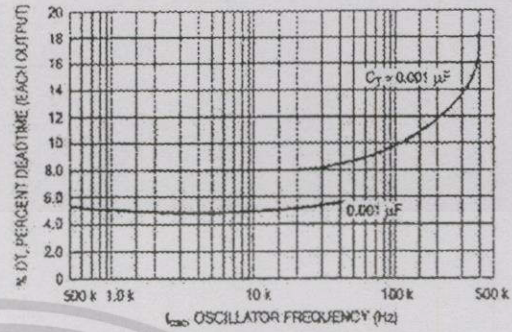


Figure 5. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

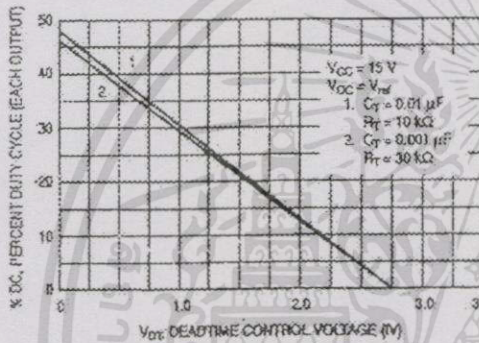


Figure 6. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

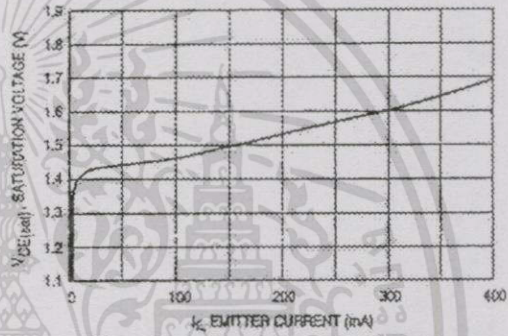


Figure 7. Emitter-Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

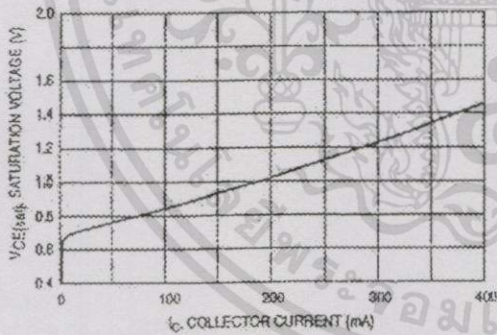


Figure 8. Common-Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

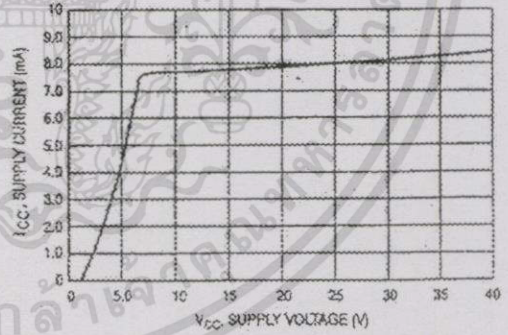


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage\*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

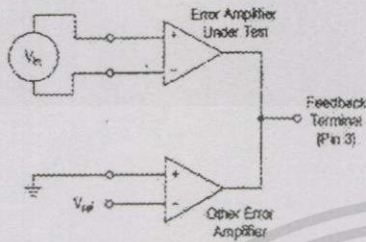


Figure 10. Error-Amplifier Characteristics

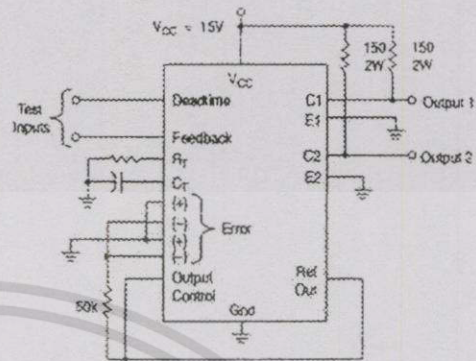


Figure 11. Deadtime and Feedback Control Circuit

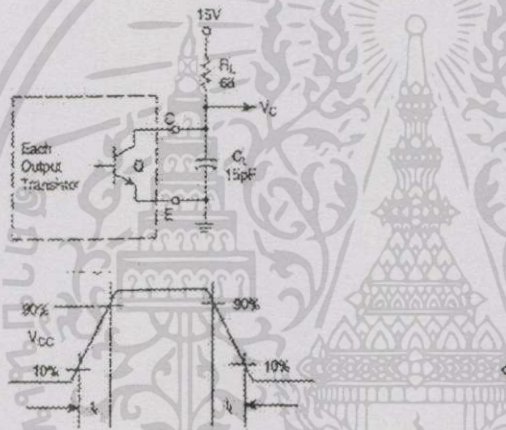


Figure 12. Common-Emitter Configuration Test Circuit and Waveform

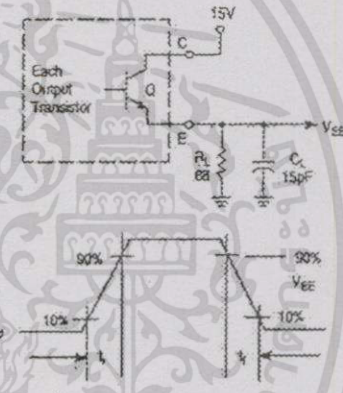


Figure 13. Emitter-Follower Configuration Test Circuit and Waveform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

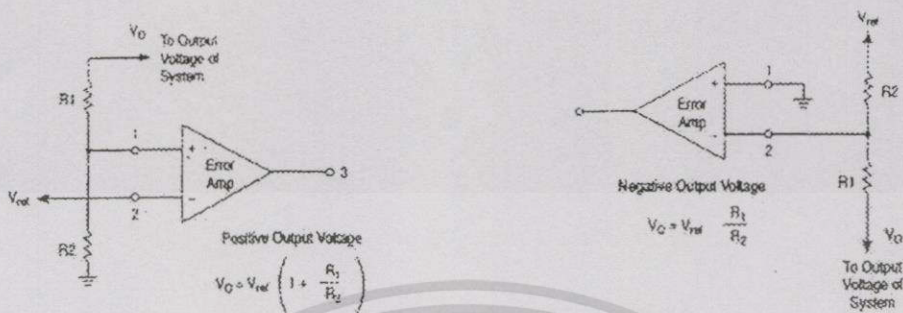


Figure 14. Error-Amplifier Sensing Techniques

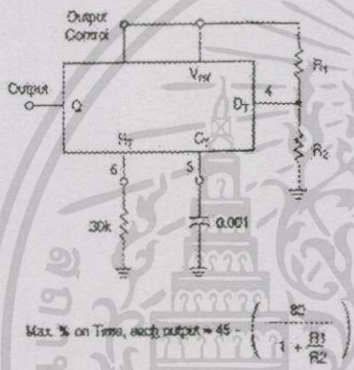


Figure 15. Deadtime Control Circuit

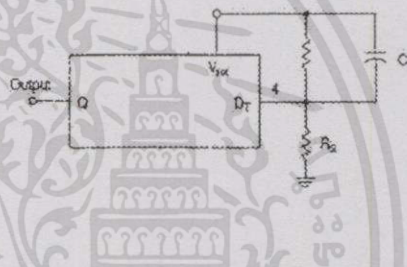


Figure 16. Soft-Start Circuit

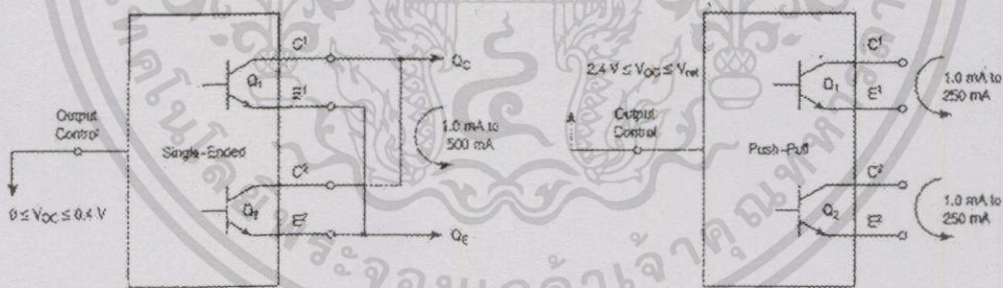


Figure 17. Output Connections for Single-Ended and Push-Pull Configurations

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

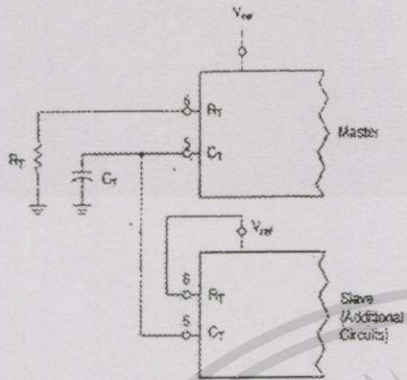


Figure 18. Slaving Two or More Control Circuits

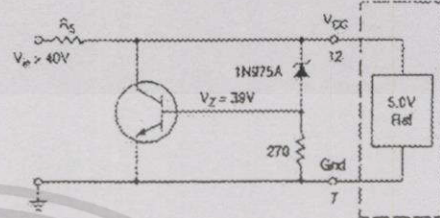


Figure 19. Operation with  $V_{in} > 40\text{ V}$  Using External Zener

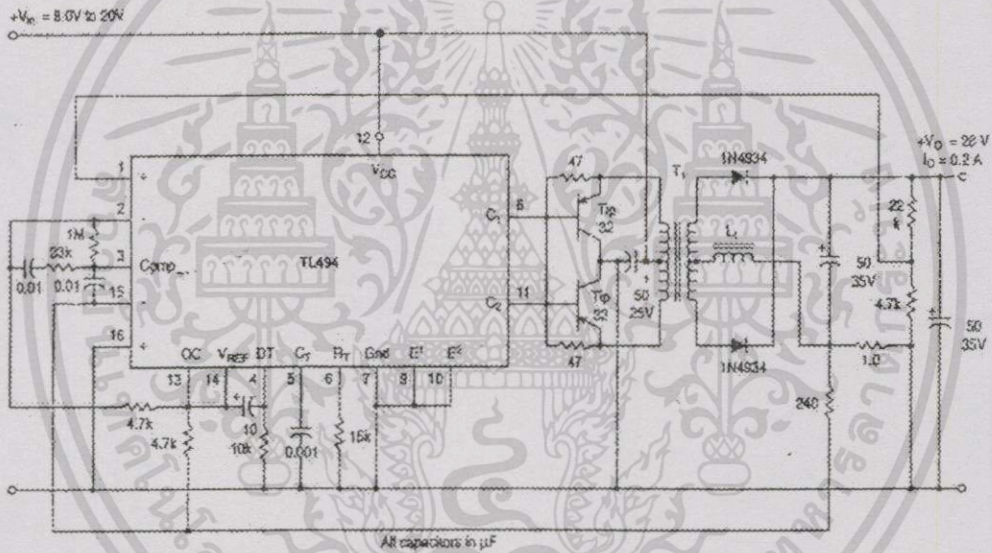


Figure 20. Pulse Width Modulated Push-Pull Converter

Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 10\text{ V to }40\text{ V}$	14 mV 0.28%
Load Regulation	$V_{in} = 28\text{ V, } I_o = 1.0\text{ mA to }1.0\text{ A}$	3.0 mV 0.06%
Output Ripple	$V_{in} = 28\text{ V, } I_o = 1.0\text{ A}$	65 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 26\text{ V, } R_L = 0.1\ \Omega$	1.8 A
Efficiency	$V_{in} = 25\text{ V, } I_o = 1.0\text{ A}$	71%

L1 - 3.5 mH @ 0.3 A  
 T1 - Primary: 20T C.T. #28 AWG  
 Secondary: 120T C.T. #36 AWG  
 Core: Ferroxcube 140B<sup>®</sup>-LDC-3C8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

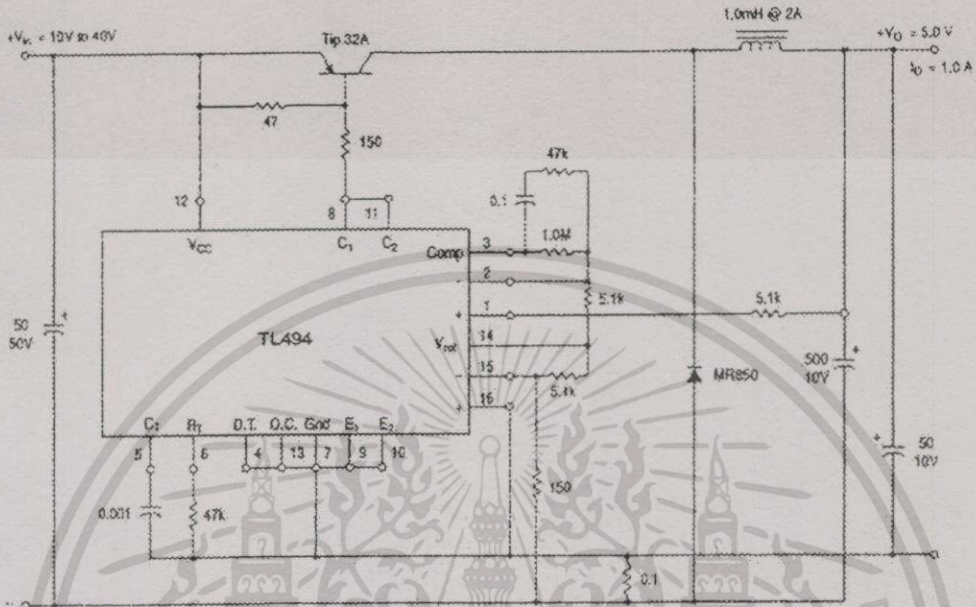


Figure 21. Pulse Width Modulated Step-Down Converter

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

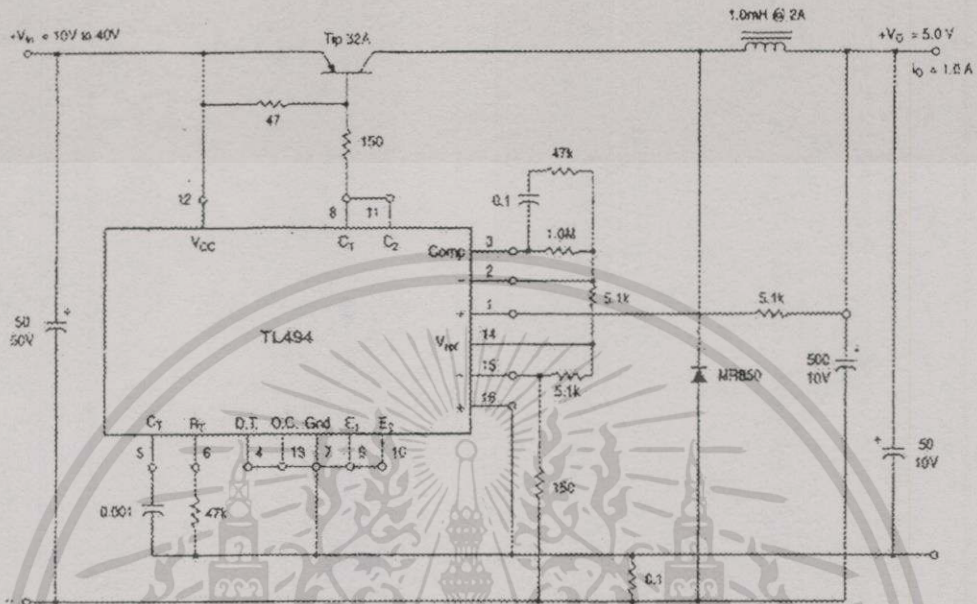


Figure 21. Pulse Width Modulated Step-Down Converter

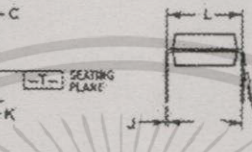
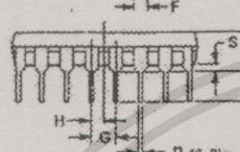
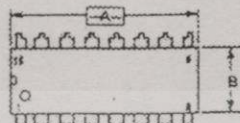
Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 8.0 \text{ V to } 40 \text{ V}$	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_o = 0.2 \text{ mA to } 200 \text{ mA}$	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_o = 200 \text{ mA}$	40 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in}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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

PACKAGE DIMENSIONS

PDIP-16  
N SUFFIX  
CASE 648-08  
ISSUE R



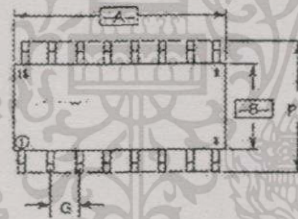
⊕ 0.25 (0.010) ⊖ T A ⊕
------------------------

NOTES:

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

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.180	0.270	4.60	6.85
B	0.250	0.270	6.35	6.85
C	0.145	0.175	3.68	4.44
D	0.615	0.621	15.62	15.77
F	0.040	0.070	1.02	1.77
G	0.100 BSC	0.154 BSC	2.54	3.91
H	0.050 BSC	0.070 BSC	1.27	1.78
J	0.500	0.615	12.7	15.62
K	0.110	0.130	2.79	3.30
L	0.295	0.295	7.50	7.50
M	0°	10°	0°	10°
P	0.220	0.240	5.61	6.10

SO-16  
D SUFFIX  
CASE 751B-05  
ISSUE J



⊕ 0.25 (0.010) ⊖ T B ⊕
------------------------



⊕ 0.25 (0.010) ⊖ T B ⊕ A ⊕
----------------------------


NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1992.
2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETERS.
3. DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION: 0.15 (0.006) PER SIDE.
5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF THE D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	3.80	10.00	0.149	0.393
B	3.20	4.00	0.126	0.157
C	1.20	1.25	0.047	0.049
D	0.35	0.42	0.014	0.017
F	0.40	1.75	0.016	0.069
G	1.27 BSC	3.91 BSC	0.050	0.154
H	0.13	0.25	0.005	0.009
J	0.12	0.25	0.004	0.009
M	0°	7°	0°	7°
P	3.20	8.20	0.126	0.323
R	0.25	0.50	0.010	0.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TL494

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

## PUBLICATION ORDERING INFORMATION

**NORTH AMERICA Literature Fulfillment:**  
Literature Distribution Center for ON Semiconductor  
P.O. Box 3183, Denver, Colorado 80217 USA  
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada  
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada  
Email: [ONlit@hibbertco.com](mailto:ONlit@hibbertco.com)  
Fax Response Line: 303-675-2167 or 800-344-3810 Toll Free USA/Canada

**N. American Technical Support:** 800-282-9855 Toll Free USA/Canada

**EUROPE: LOC for ON Semiconductor – European Support:**  
German: Phone: (+1) 303-308-7140 (Mon-Fri 2:30pm to 7:00pm CET)  
Email: [ONlit-german@hibbertco.com](mailto:ONlit-german@hibbertco.com)  
French: Phone: (+1) 303-308-7141 (Mon-Fri 2:00pm to 7:00pm CET)  
Email: [ONlit-french@hibbertco.com](mailto:ONlit-french@hibbertco.com)  
English: Phone: (+1) 303-308-7142 (Mon-Fri 12:00pm to 5:00pm GMT)  
Email: [ONlit@hibbertco.com](mailto:ONlit@hibbertco.com)

**EUROPEAN TOLL-FREE ACCESS\*** 800-800-4422-3781  
\*Available from: Germany, France, Italy, England, Ireland

**CENTRAL/SOUTH AMERICA:**  
Spanish: Phone: 303-308-7143 (Mon-Fri 6:00am to 5:00pm MST)  
Email: [ONlit-spanish@hibbertco.com](mailto:ONlit-spanish@hibbertco.com)

**ASIA/PACIFIC: LOC for ON Semiconductor – Asia Support:**  
Phone: 303-675-2121 (Tue-Fri 9:00am to 1:00pm, Hong Kong Time)  
Toll Free from Hong Kong & Singapore:  
001-800-4422-3781  
Email: [ONlit-ess@hibbertco.com](mailto:ONlit-ess@hibbertco.com)

**JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center**  
4-32-1 Nishi-Gotanda, Shinagawa-Ku, Tokyo, Japan 141-0031  
Phone: 81-3-5740-2745  
Email: [r145256@onsemi.com](mailto:r145256@onsemi.com)

**ON Semiconductor Website:** <http://onsemi.com>

For additional information, please contact your local Sales Representative.

TL494/D

9 - 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ฉ

Optocouplers

Schmitt Trigger Output: GaAs Input

6-Pin DIP Package

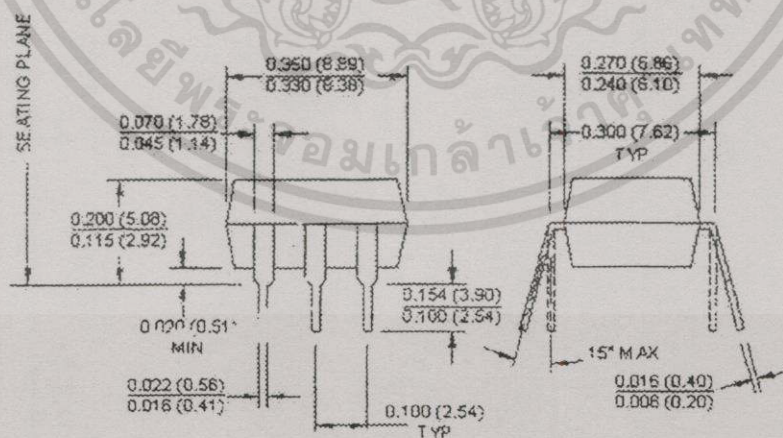
## H11L2

Use this menu or scroll through this page to see the following information:

- [Download Datasheet in PDF Format 444Kb \(Acrobat Reader 3.0 required\)](#)
- [Download Adobe Acrobat Reader 3.0](#)
- [Package Drawings](#)
- [Electrical Schematics](#)
- [Agency Approval Information](#)
- [Ordering Options](#)
- [Tape and Reel Packaging](#)
- [Back to Table of 6-Pin Schmitt Trigger Output: GaAs Input](#)
- [Bottom of Page: Main QT Opto Web Site Menu](#)

## Package Outlines

## Standard Package

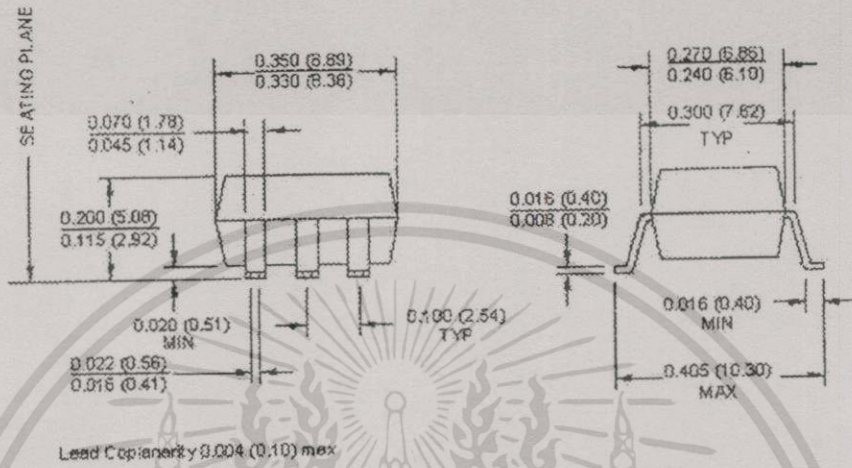


<http://www.qtopto.com/ov/00901k.pi5?H11L2&H11LX.pdf&444>

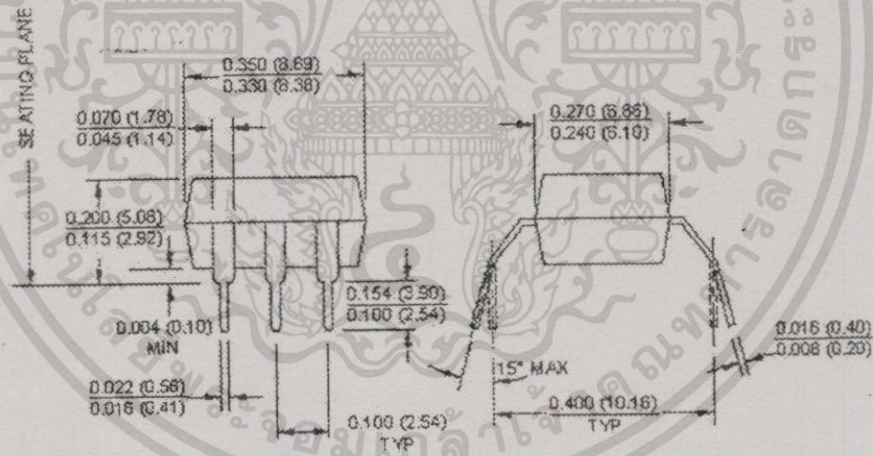
๑ - 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Standard Package; Surface Mount Lead Bend (Option S)



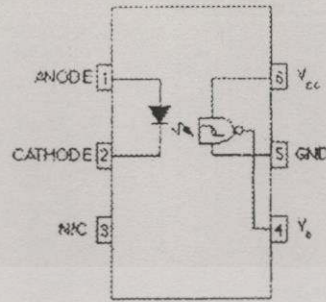
Standard Package; 10 mm Lead Bend (Option W)



Top of Page

Electrical Schematic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Open-drain inverter output

[Top of Page](#)

### Agency Approval Information

The following agency approvals have been obtained for this part.

CSA	Canadian Standards Association
BSI	British Standards Institute
Demko	Danish Safety Agency
Fimko	Finnish Safety Agency
Nemko	Norwegian Safety Agency
Semko	Swedish Safety Agency
BABT	British Approvals Board for Telecommunications
UL	Underwriters Laboratory
VDE 0884	Option 300

[Top of Page](#)

### Ordering Options

The following options can be ordered with this part:

<http://www.qtopio.com/oi/00901k.pl5?H11L28H11LX.pdf&444>

Q-3

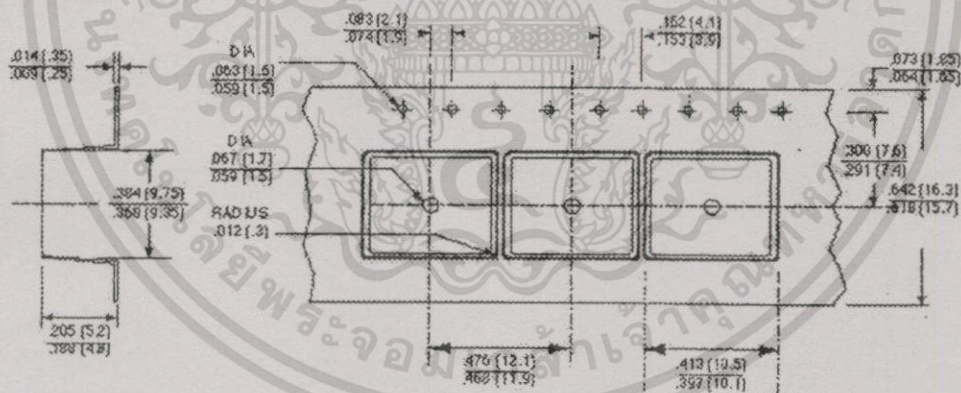
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Option	Order Entry Identifier	Description
300	.300	VDE 0884
300W	.300W	VDE 0884; 0.4" Lead Bend
3S	.3S	Option S (see below); VDE 0884
3SD	.3SD	Option S (see below); VDE 0884; Tape and Reel
R2	.R2	Opto Plus 2 Reliability Conditioning
S	.S	Surface-Mount Lead Bend
SD	.SD	Option S; Tape and Reel
W	.W	0.4" Lead Bend

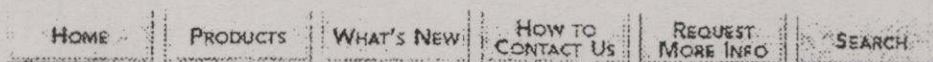
Top of Page

### Tape and Reel Packaging

#### Options SD and 3SD



Top of Page



[Home](#) / [Products](#) / [How to Contact Us](#) / [What's New](#) / [About QT Opto](#)  
[Request More Information](#) / [Search](#)

*This page was last updated on August 26, 1999*



<http://www.qtopto.com/oi/p0901k.pl5?H11L2&H111.X.pdf&444>

๑ - 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฏหมาย ก ข

## MC14049UB

## Hex Buffers

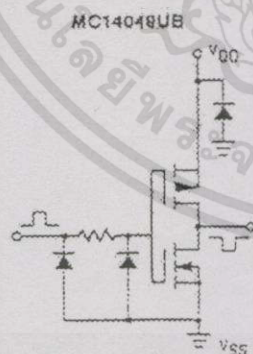
The MC14049UB hex inverter/buffer is constructed with MOS P-channel and N-channel enhancement mode devices in a single monolithic structure. This complementary MOS device finds primary use where low power dissipation and/or high noise immunity is desired. This device provides logic-level conversion using only one supply voltage,  $V_{DD}$ . The input-signal high level ( $V_{IH}$ ) can exceed the  $V_{DD}$  supply voltage for logic-level conversions. Two TTL/DTL Loads can be driven when the device is used as CMOS-to-TTL/DTL converters ( $V_{DD} = 5.0\text{ V}$ ,  $V_{OL} \leq 0.4\text{ V}$ ,  $I_{OL} \geq 3.2\text{ mA}$ ). Note that pins 13 and 16 are not connected internally on this device; consequently connections to these terminals will not affect circuit operation.

- High Source and Sink Currents
- High-to-Low Level Converter
- Supply Voltage Range = 3.0 V to 18 V
- Meets JEDEC UB Specifications
- $V_{IH}$  can exceed  $V_{DD}$
- Improved ESD Protection on All Inputs

MAXIMUM RATINGS\* (Voltages Referenced to  $V_{SS}$ )

Rating	Symbol	Value	Unit
DC Supply Voltage	$V_{DD}$	-0.5 to +18	V
Input Voltage (DC or Transient)	$V_{in}$	-0.5 to +18	V
Output Voltage (DC or Transient)	$V_{out}$	-0.5 to $V_{DD} + 0.5$	V
Input Current (DC or Transient), per Pin	$i_{in}$	$\pm 10$	mA
Output Current (DC or Transient), per Pin	$i_{out}$	+45	mA
Power Dissipation, per Package†	$P_D$	Plastic/Ceramic	825
		SOIC	740
Storage Temperature	$T_{stg}$	-65 to +150	$^{\circ}\text{C}$
Lead Temperature (6-Second Soldering)	$T_L$	260	$^{\circ}\text{C}$

\* Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur.  
† Temperature Derating: All Packages: See Figure 4.

CIRCUIT SCHEMATIC  
(1/6 OF CIRCUIT SHOWN)

L SUFFIX  
CERAMIC  
CASE 620



P SUFFIX  
PLASTIC  
CASE 645

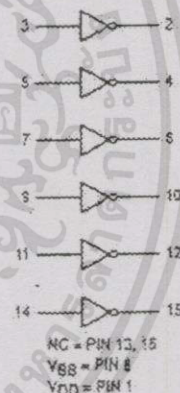


D SUFFIX  
SOIC  
CASE 751B

## ORDERING INFORMATION

MC14049UBCP Plastic  
MC14049UBCL Ceramic  
MC14049UBD SOIC

$T_A = -55^{\circ}$  to  $125^{\circ}\text{C}$  for all packages.

LOGIC DIAGRAM  
MC14049UB

REV 3  
1/84

© Motorola, Inc. 1995

MOTOROLA

ก - 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Voltages Referenced to  $V_{SS}$ )

Characteristic	Symbol	$V_{DD}$ Vdc	-55°C		25°C			125°C		Unit	
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max		
Output Voltage $V_{in} = V_{DD}$ or 0  $V_{in} = 0$ or $V_{DD}$	"0" Level	$V_{OL}$	5.0	---	0.05	---	0	0.05	---	0.05	Vdc
			10	---	0.05	---	0	0.05	---	0.05	
			15	---	0.05	---	0	0.05	---	0.05	
	"1" Level	$V_{OH}$	5.0	4.95	---	4.95	5.0	---	4.95	---	Vdc
			10	9.95	---	9.95	10	---	9.95	---	
			15	14.95	---	14.95	15	---	14.95	---	
Input Voltage ( $V_O = 4.5$ Vdc) ( $V_O = 9.0$ Vdc) ( $V_O = 13.5$ Vdc)  ( $V_O = 0.5$ Vdc) ( $V_O = 1.0$ Vdc) ( $V_O = 1.5$ Vdc)	"0" Level	$V_{IL}$	5.0	---	1.0	---	2.25	1.0	---	1.0	Vdc
			10	---	2.0	---	4.50	2.0	---	2.0	
			15	---	2.5	---	6.75	2.5	---	2.5	
	"1" Level	$V_{IH}$	5.0	4.0	---	4.0	2.75	---	4.0	---	Vdc
			10	8.0	---	8.0	5.50	---	8.0	---	
			15	12.5	---	12.5	8.25	---	12.5	---	
Output Drive Current ( $V_{OH} = 2.5$ Vdc) ( $V_{OH} = 9.5$ Vdc) ( $V_{OH} = 13.5$ Vdc)  ( $V_{OL} = 0.4$ Vdc) ( $V_{OL} = 0.5$ Vdc) ( $V_{OL} = 1.5$ Vdc)	Source	$I_{OH}$	5.0	-1.6	---	-1.25	-2.5	---	-1.0	---	mAdc
			10	-1.6	---	-1.3	-2.6	---	-1.0	---	
			15	-4.7	---	-3.75	-10	---	-3.0	---	
	Sink	$I_{OL}$	5.0	3.75	---	3.2	6.0	---	2.6	---	mAdc
			10	10	---	8.0	16	---	6.6	---	
			15	30	---	24	40	---	19	---	
Input Current	$I_{in}$	15	---	$\pm 0.1$	---	$\pm 0.00001$	$\pm 0.1$	---	$\pm 1.0$	$\mu$ Adc	
Input Capacitance ( $V_{in} = 0$ )	$C_{in}$	---	---	---	---	10	20	---	---	pF	
Quiescent Current (Per Package)	$I_{DD}$	5.0	---	1.0	---	0.002	1.0	---	30	$\mu$ Adc	
		10	---	2.0	---	0.004	2.0	---	60		
		15	---	4.0	---	0.006	4.0	---	120		
Total Supply Current**f (Dynamic plus Quiescent, Per Package) ( $C_L = 50$ pF on all outputs, all buffers switching)	$I_T$	5.0	$I_T = (1.8 \mu A/kHz) f + I_{DD}$ $I_T = (3.5 \mu A/kHz) f + I_{DD}$ $I_T = (5.3 \mu A/kHz) f + I_{DD}$								$\mu$ Adc
		10									
		15									

# Data labelled "Typ" is not to be used for design purposes but is intended as an indication of the IC's potential performance.

\*\*The formulas given are for the typical characteristics only at 25°C.

f To calculate total supply current at loads other than 50 pF:

$$I_T(C_L) = I_T(50 \text{ pF}) + (C_L - 50) V_{ik}$$

where:  $I_T$  is in  $\mu A$  (per package),  $C_L$  in pF,  $V_{ik} = (V_{DD} - V_{SS})$  in volts,  $f$  in kHz is input frequency, and  $k = 0.002$ .

SWITCHING CHARACTERISTICS\* (C<sub>L</sub> = 50 pF, T<sub>A</sub> = 25°C)

Characteristic	Symbol	V <sub>DD</sub> Vdc	Min	Typ #	Max	Unit
Output Rise Time $t_{rHL} = (0.8 \text{ ns/pF}) C_L + 60 \text{ ns}$ $t_{rHL} = (0.3 \text{ ns/pF}) C_L + 35 \text{ ns}$ $t_{rHL} = (0.27 \text{ ns/pF}) C_L + 26.5 \text{ ns}$	t <sub>rHL</sub>	5.0 10 15	— — —	100 50 40	160 100 60	ns
Output Fall Time $t_{fHL} = (0.3 \text{ ns/pF}) C_L + 25 \text{ ns}$ $t_{fHL} = (0.12 \text{ ns/pF}) C_L + 14 \text{ ns}$ $t_{fHL} = (0.1 \text{ ns/pF}) C_L + 10 \text{ ns}$	t <sub>fHL</sub>	5.0 10 15	— — —	40 20 15	60 40 30	ns
Propagation Delay Time $t_{pLH} = (0.38 \text{ ns/pF}) C_L + 61 \text{ ns}$ $t_{pLH} = (0.20 \text{ ns/pF}) C_L + 30 \text{ ns}$ $t_{pLH} = (0.11 \text{ ns/pF}) C_L + 24.5 \text{ ns}$	t <sub>pLH</sub>	5.0 10 15	— — —	80 40 30	120 85 50	ns
Propagation Delay Time $t_{pHL} = (0.38 \text{ ns/pF}) C_L + 11 \text{ ns}$ $t_{pHL} = (0.12 \text{ ns/pF}) C_L + 9 \text{ ns}$ $t_{pHL} = (0.11 \text{ ns/pF}) C_L + 4.5 \text{ ns}$	t <sub>pHL</sub>	5.0 10 15	— — —	30 15 10	60 30 20	ns

\* The formulas given are for the typical characteristics only at 25°C.

# Data labelled "Typ" is not to be used for design purposes but is intended as an indication of the IC's potential performance.

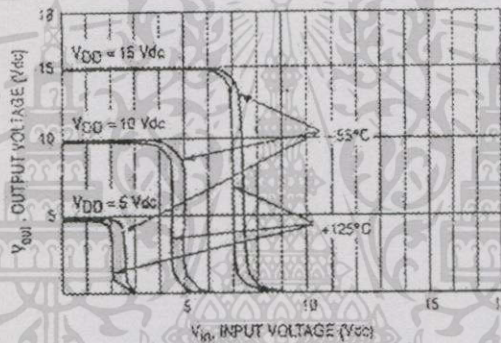
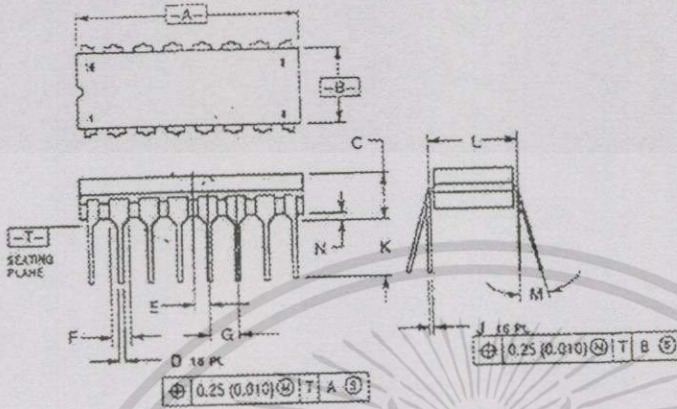


Figure 1. Typical Voltage Transfer Characteristics versus Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OUTLINE DIMENSIONS

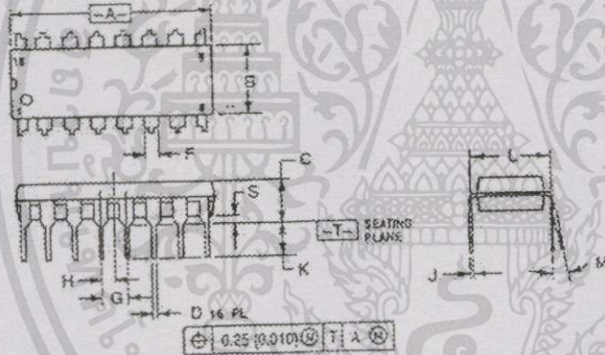
L SUFFIX  
CERAMIC DIP PACKAGE  
CASE 620-10  
ISSUE V



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1992.
  2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
  3. DIMENSION L TO CENTER OF LEAD WHEN FORMED PARALLEL.
  4. DIMENSION F MAY NARROW TO 0.18 (0.007) WHERE THE LEAD ENTERS THE CERAMIC BODY.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.750	0.785	19.02	19.92
B	0.240	0.295	6.10	7.52
C	—	0.200	—	5.08
D	0.014	0.020	0.35	0.50
E	0.020 BSC	—	0.27 BSC	—
F	0.265	0.265	1.20	1.90
G	0.180 BSC	—	0.54 BSC	—
H	0.308	0.315	0.21	0.30
K	0.125	0.178	3.18	4.51
L	0.300 BSC	—	7.62 BSC	—
M	0°	15°	0°	15°
N	0.620	0.648	0.51	1.61

P SUFFIX  
PLASTIC DIP PACKAGE  
CASE 648-08  
ISSUE R



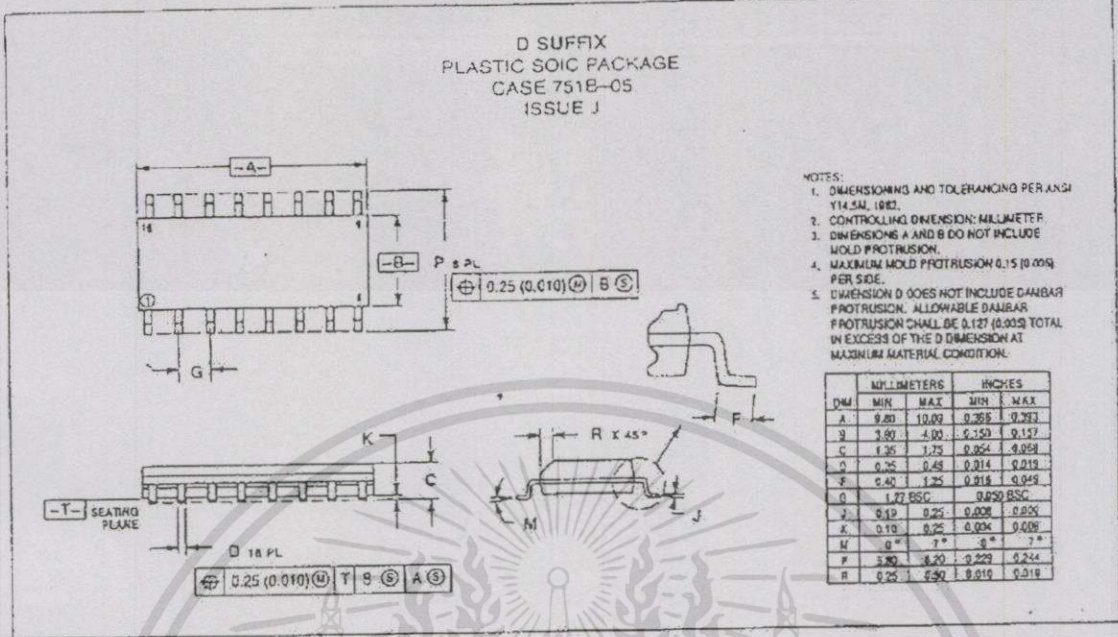
- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1992.
  2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
  3. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
  4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
  5. ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.748	0.770	18.80	19.55
B	0.258	0.270	6.55	6.85
C	0.345	0.375	8.75	9.52
D	0.015	0.021	0.38	0.53
E	0.040	0.10	1.01	1.77
F	0.190 BSC	—	4.81 BSC	—
G	0.660 BSC	—	1.67 BSC	—
H	0.008	0.015	0.21	0.38
K	0.110	0.130	2.80	3.30
L	0.222	0.295	5.60	7.52
M	0°	10°	0°	10°
S	0.020	0.040	0.51	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OUTLINE DIMENSIONS

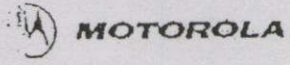
D SUFFIX  
PLASTIC SOIC PACKAGE  
CASE 751B-05  
ISSUE J



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

How to reach us:  
USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;  
P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85038. 1-800-441-2447 or 602-303-5454  
MFAX: RMFAX0 @ email.sps.mot.com - TOUCHTONE 602-244-6606  
INTERNET: http://Design-NET.com

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tsukumi-SPD-JLDC, 6F Setbu-Buisyuu-Center,  
3-14-2 Tsukumi-Ku, Tsukumi, 565, Japan. 03-81-3521-8315  
ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 6B Tai Ping Industrial Park,  
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629296



MC14049UB/D  
T - 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

# ลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยลาดกระบัง สำนักพิมพ์วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

## LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 18 ฉบับที่ 2

มิถุนายน 2544

1. การวิเคราะห์ไฟในอาคารที่มีปริมณฑลสำหรับปัญหาการไหลของของไหลสองเฟสการก่อตัวและรวมตัว	1
กานตว ราชภัฏวชิรเวศน์ จงวิไล เจริญสุข	
2. คุณลักษณะของวัสดุคอมโพสิตชนิดหนึ่งซึ่งทำเป็นเส้นใยของใยโกลด์ในรูปใยแก้ว อันเสริมกับกึ่งตัวนำโพลีเมอร์	7
สิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
3. การเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรควบคุม PID และ Fuzzy หรือของเหลววิดิ (FLM) สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ	13
กฤษณ กฤษณะเดชา วิเชียร กนิษฐา เศรษฐกิจวิเชียร วิภา จันทรมณีโชติ ไร่โต อรรณพวิทย์	
4. วิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับปัญหาการไหลของของไหลในท่อโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข	19
ศิริวัฒน์ บุญทวี ประภากร ไชยศิริวัฒน์ กฤษณ กฤษณ	
5. การไหลของของเหลวที่เชื่อมกันของเส้นใยของเหลวสองเฟสของไหลโพลีเมอร์และของเหลวไอออนิก	25
กฤษณ กฤษณะเดชา วิเชียร กนิษฐา เศรษฐกิจวิเชียร วิภา จันทรมณีโชติ ไร่โต อรรณพวิทย์	
6. การวัดอุณหภูมิที่แม่นยำของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์	30
ศิริโชค นุชพิบูลย์ ศิริวิวัฒน์ ไชยศิริวัฒน์	
7. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	36
ศิริโชค นุชพิบูลย์ สุวิวัฒน์ ไชยศิริวัฒน์	
8. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	42
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
9. การวัดอุณหภูมิที่แม่นยำของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์	48
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
10. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	54
ศิริโชค นุชพิบูลย์ ประภากร ไชยศิริวัฒน์	
11. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	60
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
12. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	66
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
13. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	72
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
14. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	78
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
15. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	84
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
16. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	90
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
17. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	96
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
18. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	102
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
19. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	108
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
20. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	114
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
21. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	120
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
22. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	126
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
23. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	131
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	
24. การวิเคราะห์การไหลของของเหลวในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด	136
ศิริโชค นุชพิบูลย์ มงคล มงคลวงวิจิตร	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เครื่องต้นแบบสำหรับการทดสอบแรงดันสูงความถี่สูง

## A Prototype for High Voltage High and Frequency Testing

ศักดิ์ชัย ศรีรัตนพิจารณ์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนำเสนอหลักการใหม่ ที่ใช้สำหรับทดสอบแรงดันสูงความถี่สูง โดยเสนอการออกแบบและ จัดสร้าง เครื่องต้นแบบ ทดแทนหลักการเดิมซึ่งใช้หลักการ หม้อแปลงทดสอบ ซึ่งมีข้อจำกัดที่ใช้หลักการแอสซี เรโซแนนซ์ ในการผลิตความถี่สูง ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ น้ำหนักจึงเพิ่มตามไปด้วย รูปสัญญาณที่ได้ จะมีการหน่วงของสัญญาณ ทำให้แรงดันไม่คงที่ การปรับการควบคุมความถี่ค่อนข้างยาก โดยหลักการของเครื่องต้นแบบใหม่ที่น่าเสนอจะใช้อุปกรณ์ อิเลคทรอนิกส์กำลัง เข้ามาแทนโดยใช้เพาเวอร์มอสเฟตสร้างความถี่ ทำให้ลดปัญหาที่เกิดจากหลักการหม้อแปลงทดสอบได้ โดยมีพิกัด 3 kVA ด้านเข้า 0-220V, 50Hz, หนึ่งเฟส ด้านออก 0-3 kV, 150 kHz-200 kHz และประสิทธิภาพมากกว่า80% ผลการทดสอบ จะพบว่าหลักการใหม่ที่น่าเสนอสามารถใช้ได้จริง

### Abstract

This paper presents a design and construction of a high voltage and high frequency switching source. The attempt of developing a prototype has been made in order to replace a conventional Tesla transformer method based on L-C resonance which has some disadvantage such as a large size, a heavy weight, a problem of damping signal, an unstable voltage and the control difficulties. A design technique of power electronic used power MOSFET device and testing method will be fully given in this paper. The prototype has maximum power rated 3 kVA, 0-220 V input, 50 Hz single phase and 0-3kV output, 150kHz-200kHz frequency and more than 80%. The results show that a new principle which can be applied in practical.

### 1. บทนำ

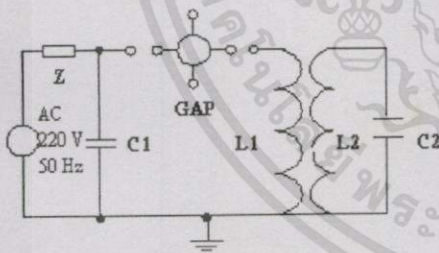
ในปัจจุบันการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมาไปยังโหลดที่ใช้งาน ต้องใช้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยระบบสายส่ง และส่วนประกอบที่สำคัญสิ่งหนึ่งที่เป็นในระบบสายส่งก็คือ ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า จะเป็นอุปกรณ์ที่ฉนวนระหว่างสายส่ง กับเสาไฟฟ้า ดังนั้นในการนำลูกถ้วยฉนวนมาใช้งานได้จะต้องผ่านการทดสอบ

[1] เพื่อรับรองว่าลูกถ้วย สามารถนำไปใช้งานอย่างปลอดภัย ซึ่งต้องมีการทดสอบประจำ (Routine Test) โดยการทดสอบการวางไฟตามผิวความถี่สูง เพื่อทดสอบจุดบกพร่องภายในของอุปกรณ์ฉนวน ว่าดีหรือเสียอย่างไร เหมาะที่จะนำไปใช้งานหรือไม่

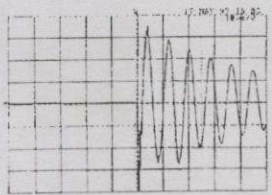
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการทดสอบนี้ปัจจุบัน เราต้องใช้แหล่งจ่ายที่สามารถผลิตแรงดันสูงความถี่สูงได้ เราใช้แหล่งจ่ายที่เรียกว่าหม้อแปลง เทสค่า[2] ( Tesla Transformer) ซึ่งสามารถผลิตความถี่สูงได้จากหลักการ แอลซี เรโซแนนซ์ (LC Resonant) และการผลิตแรงดันสูงได้จากการใช้หม้อแปลงแกนอากาศยกระดับแรงดัน

ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้หลักการแอลซี เรโซแนนซ์ (LC Resonant) ในการผลิตความถี่สูงในการเลือกใช้ ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)จะต้องใช้ขนาดใหญ่ และการปรับการควบคุมความถี่ยากเพราะจะทำการปรับจากรอบของตัวเหนี่ยวนำ รวมทั้งในการเลือกใช้ ตัวเก็บประจุ ที่สามารถรับแรงดันสูงได้ทำให้ ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ ส่วนการผลิต แรงดันสูงโดยใช้หม้อแปลงแกนอากาศที่สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง ทำให้ขนาดของหม้อแปลงมีขนาดใหญ่ น้ำหนักจึงเพิ่มตามไปด้วยการเคลื่อนย้ายลำบากทั้งในด้านพื้นที่การติดตั้งต้องใช้พื้นที่มากและรูปสัญญาณที่เกิดจากการวาวไฟตามผิวที่ได้ จะมีการหน่วงของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2 ทำให้การวาวไฟตามผิวไม่ต่อเนื่องและราคาอุปกรณ์ทั้งหมดค่อนข้างแพงจริงจะเป็นดังแสดงรูปที่ 1.



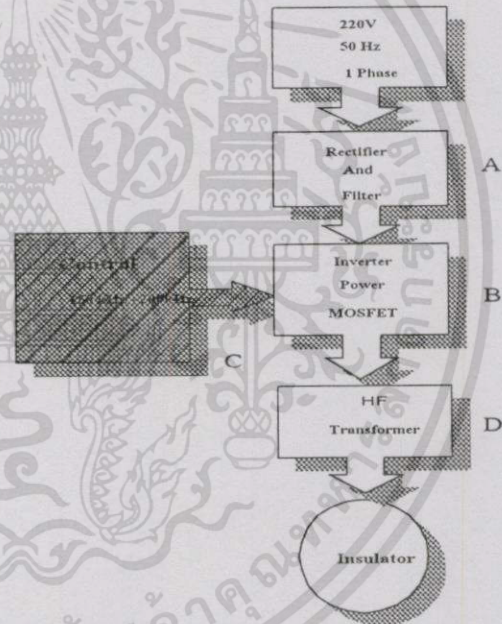
รูปที่ 1. หลักการของหม้อแปลงเทสค่า



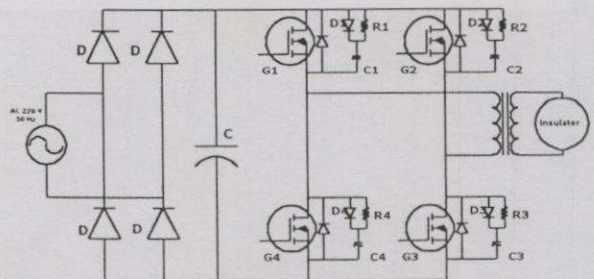
รูปที่ 2. สัญญาณความถี่สูงแบบหน่วงจากหม้อแปลงเทสค่า ( 5  $\mu$ s/Div )

## 2. หลักการใหม่ที่นำเสนอ

เป็นการนำเอาอุปกรณ์ อิเลคทรอนิกส์กำลัง ( Power Electronic)มาใช้งานแทนหลักการเดิมที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น เพื่อให้ได้ความถี่สูง สัญญาณไม่มีการหน่วง และการควบคุมสะดวกกว่า หลักการของระบบคือ เมื่อจ่ายไฟ หนึ่งเฟส 220 โวลต์ กระแสสลับ 50 เฮิร์ต เข้ามาในเครื่อง ก็จะแปลงไฟให้เป็นกระแสตรง หนึ่งเฟส 310 โวลต์ โดยผ่านชุดเรกติไฟเลอร์ (Rectifier) เพื่อผ่านไปยังชุดแปลงเป็นไฟกระแสสลับ โดยใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ แปลงเป็นสัญญาณไฟกระแสสลับความถี่สูง 150 กิโลเฮิร์ต- 200 กิโลเฮิร์ต ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการวาวไฟ[2] ซึ่งได้แรงดันสูงสุด 310 โวลต์ และผ่านไปยังหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อยกระดับแรงดันให้ได้ 3 kV<sub>p</sub>



รูปที่ 3. หลักการทำงานของระบบที่ได้นำเสนอ



รูปที่ 4. วงจรที่จัดสร้างโดยใช้หลักการที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.การออกแบบและจัดสร้าง

#### 3.1 การออกแบบ เรคตีไฟร์ และ ฟิลเตอร์(Block A)

การหาขนาดของตัวเก็บประจุฟิเตอร์เพื่อลดแรงดันกระเพื่อม โดยปกติแรงดันกระเพื่อมจะไม่เกิน 10% กำหนดให้ค่าแรงดันกระเพื่อมเท่ากับ 5% จากสมการ(1)[ 3]

$$C = \frac{I_e \times \Delta t}{\Delta V_{ripple}} \quad (1)$$

เมื่อ C = ค่าตัวเก็บประจุ ( $\mu\text{F}$ )

$I_e$  = กระแสที่ใช้ (A)

$\Delta t$  = เวลาที่ตัวเก็บประจุต้องจ่ายกระแส (ms)

$\Delta V_{ripple}$  = แรงดันกระเพื่อม หน่วยเป็น (V)

ดังนั้นเลือกค่าตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ทนแรงดันที่พิกัดไฟฟ้ากระแสตรงได้ 1.5 เท่าจะได้ขนาดตัวเก็บประจุ(C) 6800  $\mu\text{F}$  และ ทนแรงดัน  $V_{dc}$  ได้ 450 V และเลือกไดโอดเรคตีไฟร์(D)ที่ทนกระแสกระชากได้ 15A

#### 3.2การออกแบบอินเวอร์เตอร์(Block B)

##### 3.2.1การออกแบบอินเวอร์เตอร์

จากหลักการใหม่ที่น่าเสนอเลือกวงจรเป็นแบบฟูลบริดจ์[5]ที่ ให้กำลังไฟฟ้าสูง โดยใช้เพาเวอร์มอสเฟต[5] ที่สามารถสร้างความถี่สูง และทนกำลังไฟฟ้าสูง จากวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์มีแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตเพียงค่าแรงดันไฟกระแสตรงอินพุต เพื่อแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตไว้อีก 20% ดังนั้นเลือกเพาเวอร์มอสเฟตที่ทนแรงดันได้ออย่างน้อย 370V การคำนวณหาค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต โดยกำหนดให้ค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80 %จากสมการ(2)[3]

$$I_c = \frac{1.6P_{out}}{V_{in}} \quad (2)$$

เมื่อ  $I_c$  = กระแสที่มอสเฟตทนได้(A)

$P_{out}$  = กำลังไฟฟ้าของวงจร(W)

$V_{in}$  =แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(V)

ดังนั้นควรเลือกเพาเวอร์มอสเฟตที่สามารถทนแรงดันได้ไม่ต่ำกว่า 370 V และทนกระแสได้ไม่ต่ำกว่า 15.48 A ในบทความนี้ใช้เพาเวอร์มอสเฟตเบอร์ IRFP 460 ซึ่งสามารถทนแรงดันได้ 500 V และทนกระแสสูงสุดได้ 20 A

##### 3.2.2การออกแบบวงจร snubber

วงจรถนั้บเบอร์เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อลดการเกิดกำลังสูญเสียและป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเพาเวอร์มอสเฟต ในโครงงานนี้ใช้วงจรถนั้บเบอร์แบบป้องกันกระแสเกิน (RCD Snubber) จากข้อมูลของเพาเวอร์มอสเฟต IRFP 460 ใช้ค่าตัวเก็บประจุ (C1-C4 )4.1 nF และ ได้ค่าความต้านทาน(R1-R4)8.17  $\Omega$  ดังแสดงในรูปที่4.

#### 3.3การออกแบบชุดขับเคลื่อนเพาเวอร์มอสเฟต(Block C)

ในการออกแบบชุดขับเคลื่อนเพาเวอร์มอสเฟต ในบทความนี้จะใช้ไอซี TL 494 เป็นวงจรถนั้บคุมความกว้างของพัลส์ทางด้านเอาต์พุต โดยกำหนดค่า  $C_1$  เท่ากับ 1 nF สามารถคำนวณหาค่า  $R_1 = 5.5 \text{ k}\Omega - 7.34 \text{ k}\Omega$

ดังนั้นเลือกค่า  $R_1$  เป็นค่าความต้านทานแบบปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 - 10  $\text{k}\Omega$  และเลือกแบบชนิดไว้วางใจเนื่องจากสามารถปรับค่าได้เป็นแบบเชิงเส้น

#### 3.4การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง(Block D)

การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงสำหรับวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ทำให้รูปสัญญาณมีความต่อเนื่อง กำหนดให้( $E_{in}$ )แรงดันด้านขดลวดปฐมภูมิ 310V,( $E_{out}$ )แรงดันขดลวดทุติยภูมิ 3kV,( $I_{in}$ )กระแสขดลวดทุติยภูมิ1A,(  $\pm \Delta V_{in}$ ) แรงดันกระเพื่อมด้านขดลวดปฐมภูมิ  $\pm 20\text{V}$ , ( $P_{out}$ )กำลังไฟฟ้า 3 kVA ,(f ) ความถี่หม้อแปลง200 kHz,( $T_m / T$ ) Maximum duty 40 %

##### 3.4.1เลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์

ในการเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์เพื่อให้มีความเหมาะสมกับกำลังไฟฟ้าขาออก และสามารถถนนวนระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิโดยเลือกแกนเฟอร์ไรต์ BU79/129 ได้ค่า  $B_{sat}$  เป็น 5200 Gauss และสามารถหาลำดับไฟฟ้าได้ดังนี้จากสมการ (3)[3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

$$P_{out} = \frac{(1.47 f B_{max} A_e A_c) 10^{-3}}{D} \quad (3)$$

เมื่อ  $P_{out}$  = Power handling capability of core (W)

$B_{max}$  = Peak operating flux density = 2600 G

$D$  = Current density of wire = 400 A/m<sup>2</sup>

$A_e$  = Core effective area (cm<sup>2</sup>) = 7.07 cm<sup>2</sup>

$A_c$  = Bobbin winding area (cm<sup>2</sup>) = 29.75 cm<sup>2</sup>

แทนค่าได้  $P_{out}$  401 kW เมื่อพิจารณาจากค่า  $P_{out}$  ของแกนเฟอร์ไรต์ BU 79 / 129 สามารถใช้ในการออกแบบได้

3.4.2เลือก  $\Delta B_{max}$  (Changing width of magnetic flux density) จากสมการที่(4)[4]

$$B_{max} = \frac{B_{sat}}{2} \quad (4)$$

โดยค่าสูงสุดของ  $B_{max}$  จะต้องมีค่าไม่เกิน 80% ของค่า  $B_{sat}$  สามารถคำนวณค่า  $\Delta B_{max}$  ได้ดังนี้จากสมการที่(5)[4]

$$\Delta B_{max} = B_{max} - B_r = 260 - 120 = 140 \text{ mT} \quad (5)$$

เมื่อ

$\Delta B_{max}$  = Changing width of magnetic flux density (mT)

$B_r$  = Residual magnetic flux density (mT)

3.4.3จำนวนรอบขดลวดทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิจากสมการ (6)

$$N_p = \frac{E_{m(max)}}{A_e \times \Delta B_{max}} \times tm \times 10^3 \quad (6)$$

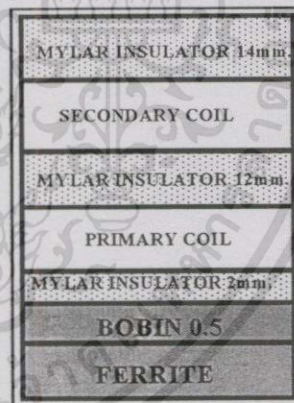
เมื่อ  $tm$  = Maximum pulse width ( $\mu$ s)

หาคาบเวลาการทำงาน จาก  $tm = 0.4 T$  ได้ 2 ( $\mu$ s) แทนค่าจะได้  $N_p$  6.8  $\approx$  7 รอบหาจำนวนรอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิ  $N_s$  70รอบ เมื่อ ค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง  $E_{m(max)} = \sqrt{2} \times (V_m + \Delta V) = 339 \text{ V}$  และ แรงดันทางด้านทุติยภูมิ 3000 V จะหาค่ากระแสเฉลี่ยทางด้านปฐมภูมิ ( $I_p$ ) 10 A หาค่ากระแสเฉลี่ยทางด้านทุติยภูมิ ( $I_s$ ) 1 A หาขนาดลวดด้านทุติยภูมิจะได้ลวดเบอร์ 23 เนื่อง

ด้วยหม้อแปลงที่ทำการออกแบบนี้เป็นหม้อแปลงความถี่สูง จึงมีผลกระทบจากปรากฏการณ์บนพื้นผิวของตัวนำ ( skin effect ) ดังนั้นจึงเลือกที่จะใช้การนำลวดตัวนำมาตีเกลียวโดยใช้ลวดเบอร์ 23 จำนวน 10 เส้นมาตีเกลียวกันเพื่อลดผลกระทบบนพื้นผิวของตัวนำอีกทั้งยังเป็นการรักษาอัตราส่วนของกระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิให้สมมาตรกันได้อีกทางด้วย

### 3.4.4หาความหนาของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า

กำหนดชนิดของฉนวน ในการสร้างหม้อแปลงความถี่สูงนั้นฉนวนที่เหมาะสมคือ ไมลาร์ (MYLAR)[6] ซึ่งมีความสามารถในการทนแรงดันได้ประมาณ 7.5kV - 10kV ต่อความหนา 1 มม.แรงดันระหว่างชั้น 3000 V ความหนาของฉนวน  $(3000/7.5) = 0.4 \text{ mm}$  เนื่องจากเป็นหม้อแปลงความถี่สูงควรเผื่อค่าความปลอดภัย (SAFETY FACTOR) 300% จะได้ ความหนาของฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับแกนเหล็ก ขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำและระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูงเอง ซึ่งในที่นี้เท่ากับ  $3 \times 0.4 = 1.2 \text{ mm}$ . ดังรูปที่ 5

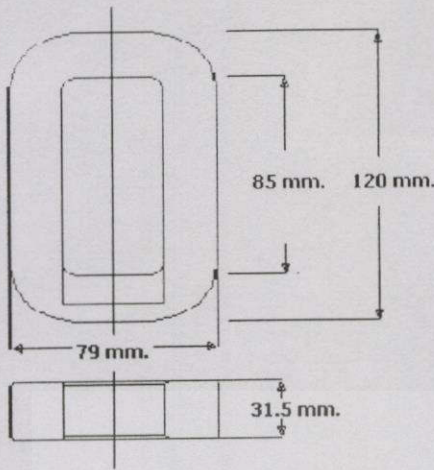


รูปที่ 5. การพันหม้อแปลงความถี่สูง

### 3.5 การสร้างหม้อแปลงความถี่สูง

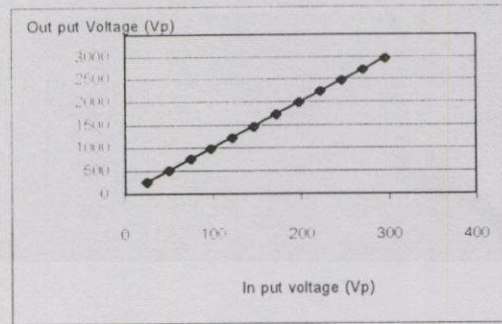
การสร้างบ็อบบิ้นในบทความนี้ผู้จัดทำเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์แบบ BU79 ซึ่งจะไม่มีบ็อบบิ้นมาให้จึงต้องทำการออกแบบและสร้างขึ้นมาใช้เอง โดยใช้นะเกกไกด์ [6] เป็นวัสดุในการทำ ในบทความนี้เป็นหม้อแปลงแรงดันสูงด้วยการพันแยกขดนั้นจะค่อนข้างเป็นการยากในการออกแบบและการฉนวนจึงเลือกการพันแบบขดทับขดบนแกนข้างเดียวกันโดยแกนที่ใช้จะมีขนาดดังรูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6. ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แบบ UU79

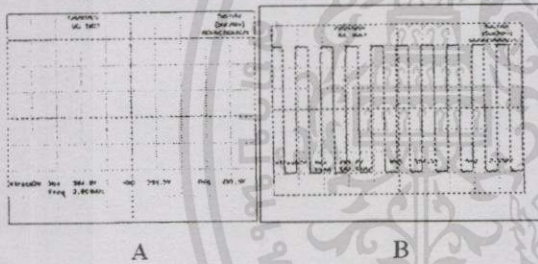
4.3 การทดสอบวัดแรงดันทางด้านขดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ที่ความถี่ 200 kHz



รูปที่ 9. แสดงความสัมพันธ์แรงดันทางด้านขดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ที่ความถี่ 200 kHz

4. การทดสอบ

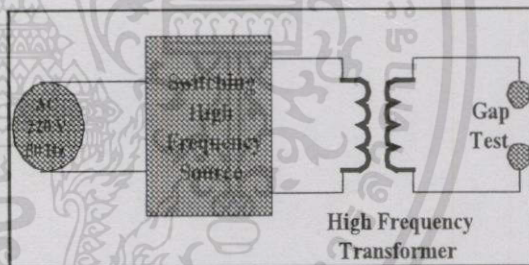
4.1 การทดสอบวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้ชุดอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 7.A และการทดสอบวัดสัญญาณไฟฟ้าที่ออกจากชุดอินเวอร์เตอร์ เพื่อจ่ายให้หม้อแปลงความถี่สูง ดังรูปที่ 7.B



รูปที่ 7.A สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่เข้าอินเวอร์เตอร์  
รูปที่ 7.B สัญญาณไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์  
(5  $\mu$ s/Div)

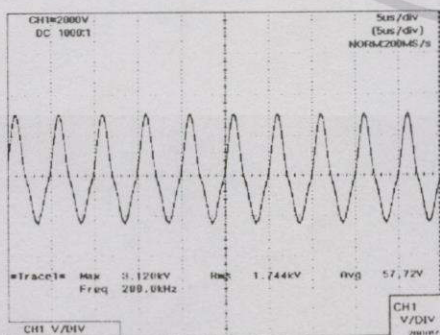
4.5 การทดสอบเบรคความถี่ที่ความถี่สูงผ่านฉนวนอากาศ

โดยทำการต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 10. โดยทำการปรับแกปทดสอบที่ 2.5 mm และปรับความถี่ที่ 200 kHz และปรับแรงดันเพื่อทำการเบรคความถี่ผ่านอากาศ และทำการบันทึกค่าแรงดันเบรคความถี่จำนวนห้าครั้ง

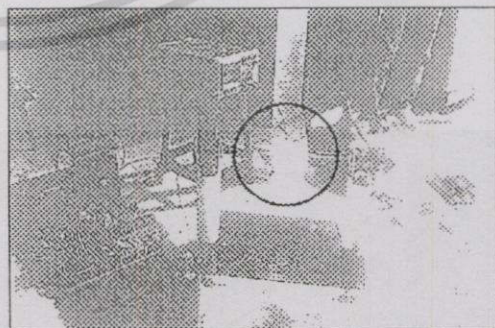


รูปที่ 10. วงจรทดสอบเบรคความถี่ที่ความถี่สูง

4.2 การทดสอบวัดรูปสัญญาณที่ออกจากหม้อแปลง



รูปที่ 8. สัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตหม้อแปลงแรงดัน

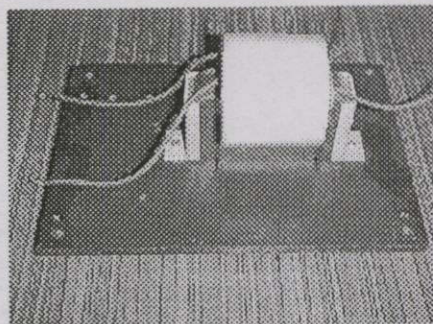


รูปที่ 11. ขณะทำการทดสอบเบรคความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สรุปผลการทดลอง เบรคดาวน์ที่ความถี่สูง

เมื่อนำค่า Breakdown voltage ในการทดลอง แต่ละครั้งมาหาค่าเฉลี่ยห้าครั้ง[7]จะได้เท่ากับ 2.16kV เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 50kHz อากาศจะมีค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเท่ากับ 25kV/cm[8]และเมื่อมีระยะห่างเท่ากับ 2.5 m.m. จะมีค่า Breakdown voltage เท่ากับ 6.25 kV ถ้านำค่าเฉลี่ย Breakdown voltage ที่ความถี่ 200 kHz และที่ความถี่ 50 Hz มาเปรียบเทียบกับกันจะเห็นว่าที่ความถี่ 200 kHz นั้นสามารถเกิดการเบรคดาวน์ได้ง่ายกว่า



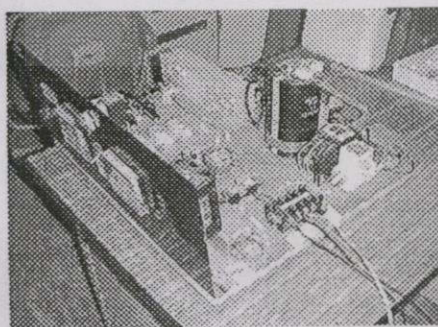
รูปที่ 13. หม้อแปลงความถี่สูงที่จัดสร้าง

### 5.สรุปผลงาน

การออกแบบและสร้างชุดต้นแบบสำหรับการทดสอบฉนวนแรงดันสูงความถี่สูง สามารถใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจ่ายความถี่สูงสุด 200 kHz และแรงดันสูงสุด 3 kV โดยส่วนประกอบหลักจะมีชุดสร้างความถี่สูงหรืออินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 12. และ หม้อแปลงยกระดับ ความถี่สูงดังรูปที่ 13. โดยใช้ แกนเฟอร์ไรท์ BU79/129 H63 เป็นแกนร่วม ซึ่งชุดต้นแบบชุดทดสอบฉนวน จะมีที่กีดดังนี้

- อินพุต 220 V ความถี่ 50 Hz หนึ่งเฟส
- เอาท์พุต 3 kV ความถี่ 150 kHz-200 kHz หนึ่งเฟส

และจากการทดสอบเบรคดาวน์ผ่านอากาศจะเห็นได้ว่า ณ.ที่ระยะเท่ากัน ที่ความถี่แรงดันที่ใช้ในการเบรคดาวน์จะมีค่าน้อยกว่าที่ความถี่ต่ำ ซึ่งจะเป็นแนวทางต่อไปได้ในการทดสอบฉนวนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในโครงการวิจัยต่อไปในอนาคต



รูปที่ 12. ชุดอินเวอร์เตอร์ที่จัดสร้าง

### 6.ข้อเสนอแนะ

ข้อจำกัดของหม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้ต้องเป็นแกนเฟอร์ไรท์ แต่การที่ต้องการแรงดันสูงด้วย จะต้องใช้แกนที่มีขนาดใหญ่ เพื่อทำการฉนวนระหว่างขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ซึ่งแกนขนาดใหญ่ค่อนข้างจะหาได้ยากในประเทศไทย อาจทำได้โดยการนำเอาแกนขนาดเล็กมาประกบกัน ซึ่งอาจพอแก้ปัญหาได้บ้าง

### 7.เอกสารอ้างอิง

- [1] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล “ระบบไฟฟ้ากำลังเล่ม 2” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537.
- [2] ศักดิ์ชัย ตรีรัตน์พิจารณา,แสนศักดิ์ คืออิน,ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล “หม้อแปลงแรงดันความถี่สูงสำหรับทดสอบฉนวนลูกถ้วย”ประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 ขอนแก่น 2537.
- [3] ST.Louis “High Frequency Switching Power Supply,” McGraw-Hill, 1989.
- [4] C. I.Hubert “Electrical Machine,” McGraw-Hill, 1991.
- [5] N. Mohan, T. M. Undeland, and William P. Robbins, “Power Electronics,” John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [6] Camilli, G. and Chapman, J.J. Gaseos, “Insulation for High Voltage Apparatus,” Trans. AIEE vol.66, 1947.
- [7] Craggs J.D. “High Voltage Measurement Testing and Design,” John Wiley & Sons, 1945.
- [8] E.kuffel, and W.S Zaengl. “High Voltage Engineering Fundamental,” Pergamon Press Oxford, 1<sup>st</sup> ed., 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# POWERCON 2000

## Proceedings

4 - 7 December 2000

The University of Western Australia

Perth, Australia

2000 International  
Conference on  
Power System  
Technology

Volume III

General Chair/Editors

Kit Po Wong

Qi Su

Bob Stewart

Xiaoxin Zhou



IEEE Catalogue Number 00E4109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# HIGH VOLTAGE AND HIGH FREQUENCY SWITCHING POWER SUPPLY FOR HIGH FREQUENCY SOLID INSULATION TESTING

**S.Trerutpicharn**

Department of Electrical Engineering  
Mahanakorn University  
of Technology, Thailand.

**S.Potivejkul**

Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute  
of Technology  
Ladkrabang, Thailand

**V.Kinnares**

Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute  
of Technology  
Ladkrabang, Thailand

**Abstract** This paper presents the design and construction of a high voltage and high frequency switching source for defective insulation testing. The attempt of developing a prototype has been made in order to replace a conventional tesla transformer method based on L-C resonance which has some limitations such as large size, heavy weight, damping signal, unstable voltage and control difficulties. With the inherent characteristics of high frequency source, defective insulator surface can be easily detected. A design technique and testing method will be fully given. A prototype has been tested and used in a student laboratory for studying insulating material characteristics.

**Keyword:** prototype, high frequency insulation testing.

## I. INTRODUCTION

In a transmission line system, insulating materials play an important role in supporting lines and towers. Therefore insulating properties must be tested before being used in such applications. One of such properties is flashover testing in order to verify material deflection such as tiny hole, crack, etc. Generally, this test is well established on the basis of a conventional tesla principle. It requires a high frequency, high voltage generator using a combination of LC components for resonance and a high voltage transformer.

This technique is more likely to encounter large size of L/C and transformer components and difficulties in frequency control. Discontinuous flashover cannot be avoided. Moreover it needs large installation area and it is costly. Figure 1 shows a tesla transformer principle. Modified rotating gap is introduced in order to limit capacitor charging current and to reduce discharging time of a capacitor. Figure 2 shows typically measured waveform of the tesla transformer.

Clearly, sinusoidal damping is present. This oscillated voltage level is high enough to enable flashover on test insulating materials. This occurs every a quarter cycle of ac supply voltage resulting in discontinuous flashover. It is noted that sinusoidal voltage decays rapidly depending on LC values.

Due to some limitations of a tesla method, higher frequency and lower voltage level may be safer for operators. Continuous flashover may be proper for defective insulation testing since we can find out easily the defective location on test material surface. Therefore alternative techniques should be studied and developed in order to overcome such problems.

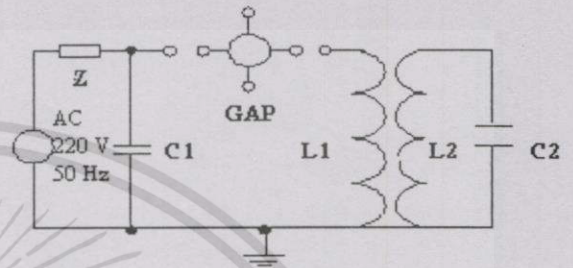


Fig.1. Tesla transformer principle

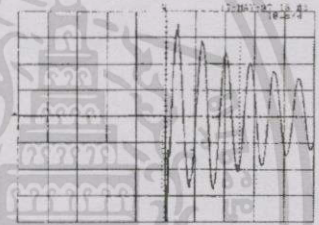


Fig.2 Measured waveform of the Tesla Transformer.

## II. A PROPOSED TECHNIQUE

A high voltage and high frequency generator was constructed based on a switched mode power supply technique. Block diagrams a and main power circuit are shown in Figure 3 and Figure 4, respectively. The power circuit consists of a diode bridge rectifier with a capacitor filter, a full bridge inverter with 150 kHz – 200 kHz switching frequency and a high frequency transformer. This range of switching frequency is found suitable for flashover occurrence. A design technique of these components will be given in the next section.

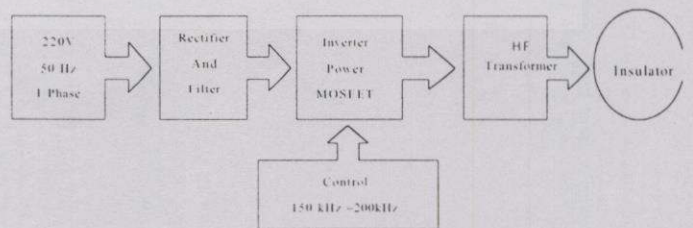


Fig.3. A proposed method.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

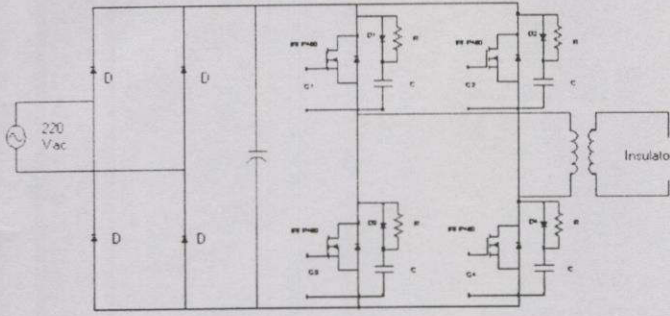


Fig.4. A High frequency and high voltage source

III. DESIGN EXAMPLE

The following components were selected and designed corresponding to load testing requirements. The system specifications are as follows:

- Rated load VA rating = 3 kVA
- Rated load voltage = 3 kV
- Rated load frequency = 200 kHz
- Rated dc link voltage = 310 V
- AC mains supply = 220 V, 50 Hz, 1  $\phi$
- Ripple of dc link voltage < 5%
- Efficiency > 80 %

Capacitor filter

In order to obtain ripple of dc link voltage within the specified level, electrolytic capacitor with 6800  $\mu$ F and 450 V was chosen

Power mosfet rating and snubber components

Power mosfets were used as switching devices for the inverter since the required switching frequency is considerable high in the range of 150-200kHz. Power mosfet must handle peak current of 15.12A and withstand peak dc link voltage of 370 V. The required efficiency is more than 80 %, switching period is 5  $\mu$  sec and maximum device turn on time is 2  $\mu$  sec. Therefore, IRFP 460 with rating of 500 V, 20 A was chosen. In addition, RCD snubber circuit (C = 410 nF, R = 8.17  $\Omega$  according to IRFP460 data sheet) was used in order to

reduce switching losses and  $\frac{dv}{dt}$  protection.

Design of a High Frequency Transformer.

- Specifications for design
- $E_{in}$  = Input voltage (V) = 310 V,
- $E_{out}$  = Output voltage (V) = 3 kV,
- $I_{out}$  = Output current (A) = 1 A,
- $P_{out}$  = Output power (w) = 3 kW,
- $f$  = Switching frequency (kHz) = 200 kHz,
- $\tau_m / T$  = Maximum duty (%) = 40 %
- ( $\Delta B_{max}$ ) Changing width of magnetic flux density = 140 mT

Maximum input voltage.  $E_{in(max)} = 339$  V  
 Number of turns for primary winding can be determined as follows.

When  $\tau_m$  = Maximum pulse width ( $\mu$ sec)  
 $\tau_m = 0.4 T = 0.4 \times 5 \times 10^{-6} = 2 \mu$ sec  

$$N_p = \frac{E_{in(max)}}{A_e \times \Delta B_{max}} \times \tau_m \times 10^3 = 6.8 \approx 7$$
 turns

Since  $E_s$  output voltage at secondary side of the transformer with rated voltage of 3100 V, number of turns for secondary coil  $N_s$  is equal to 70 turns.

Since the ratio of output voltage to input voltage is 1/10 ( 310/3100 ), rated currents of primary side and secondary side are 10 A and 1 A respectively.

Then, we chose 23 AWG conductors for both windings. Ten lines, of 23 AWG conductors are twisted in order to reduce skin effects.

Transformer insulator

Milar is suitable for high frequency transformers since it can withstand approximately 7.5kV-10kV per 1 mm. In this work, the thickness of insulator is 0.4mm ( 3 kV/7.5 kV ). For the safety factor of 300 %, insulator between primary and secondary windings is  $3 \times 0.4 = 1.2$  mm.

High frequency transformer construction

UU79 ferrite core was used because it provides a big area for windings and insulators. Figure 5 and Figure 6 show size and shape of such ferrite core and corresponding layers of windings and insulators, respectively.

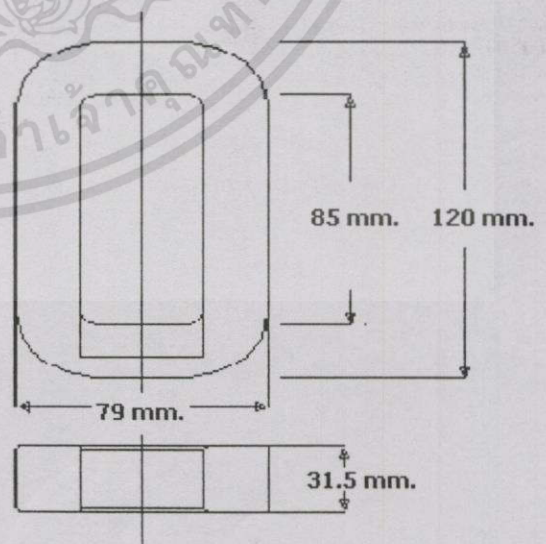


Fig 5. Size of ferrite coil UU79.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

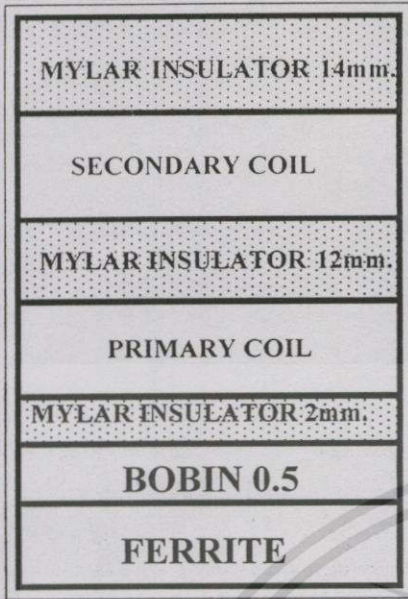


Fig.6.Layers of winding for the high frequency transformer

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

A. Output voltage with variations of input voltage and switching frequency

Fig.7 and Fig.8 illustrate dc link voltage waveform and inverter output waveform, respectively.

Fig.9 and Fig.10 show the relationship between output voltage and input voltage at switching frequency of 200 kHz and 150 kHz respectively.

These confirm that constant voltage ratio of the high frequency transformer is obtained and closed to the ratio of winding turns.

Fig.11 illustrates a sinusoidal waveform of output voltage at a switching frequency of 200 kHz.

Fig.12 shows block diagram of testing.

Fig.13.shows corresponding experimental breakdown testing setup. In the indicated circle of this figure, breakdown is shown clearly during a testing.

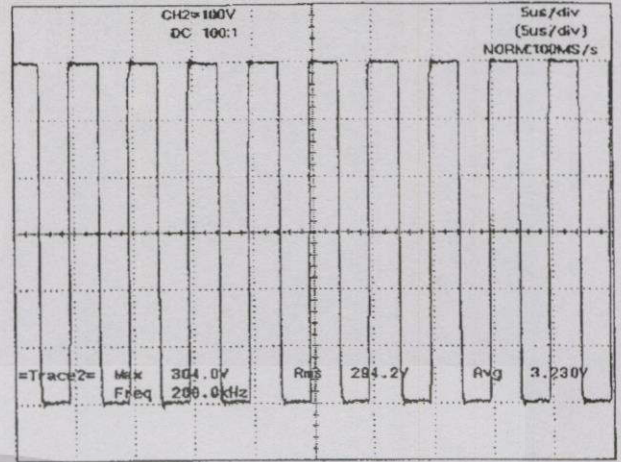


Fig.8.Waveform of inverter at 300 V<sub>p</sub>, 200 kHz.

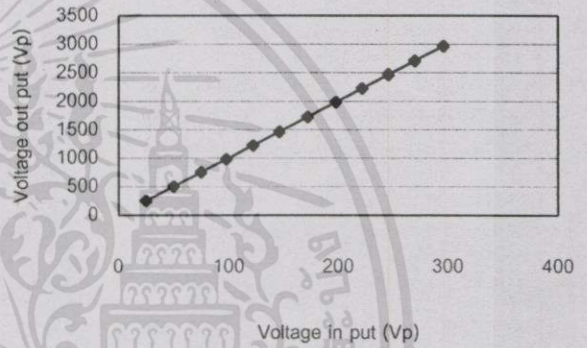


Fig.9. Relationship between output voltage and input voltage at switching frequency of 200 kHz.

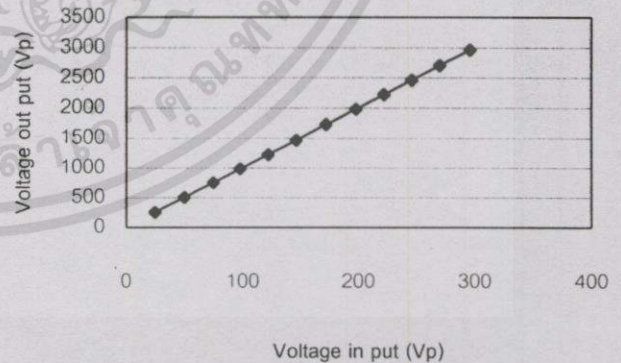


Fig.10. Relationship between output voltage and input voltage at switching frequency of 150 kHz

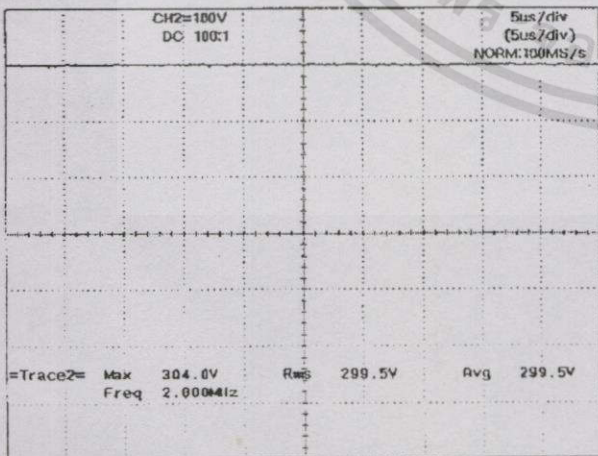


Fig.7. Waveform of DC link to inverter at 300 V<sub>p</sub>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

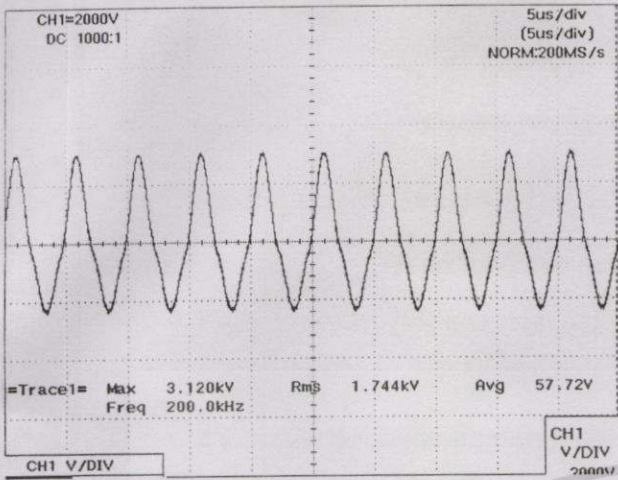


Fig.11. Output voltage waveforms

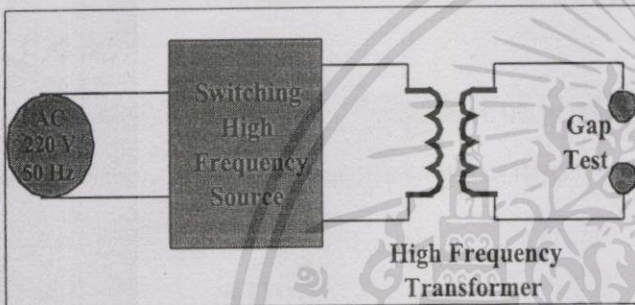


Fig.12. Block diagram of air gap test.

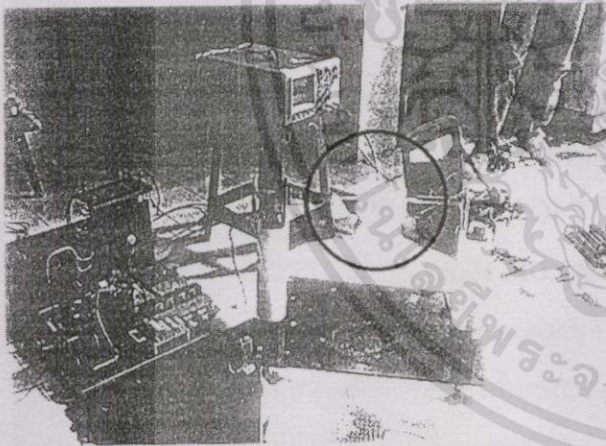


Fig.13. Photograph overall experimental setup

**B. Breakdown testing**

Table.1. Results of output voltage. when testing with pointed electrodes with air gap of 2.5 mm.

Number of test	Voltage (kV)
1	1.8
2	2.2
3	2.4
4	2.1
5	2.3

**V. DISCUSSION**

From test results when applying the proposed source to electrodes with switching frequency of 200 kHz and gap distance of 2.5mm, the breakdown voltage for each test is inconsistent since various factors affect breakdown phenomena such as electrode shape, dust and particles contamination, and relative humidity, etc. However the average breakdown voltage is approximately 2.16 kV. When comparing to 50 Hz ac high voltage source which electric field is approximately 25 kV/cm or 6.25 kV for 2.5mm, the proposed source provides 2.16kV for 2.5mm, at 200 kHz. This confirms that high frequency source offers lower voltage level for breakdown for air gap. The breakdown phenomena are susceptible to high frequency.

**VI. CONCLUSIONS**

This paper has dealt with design and construction of a high frequency high voltage supply for insulator material testing. This work is just an initial stage for developing a prototype. A number of attempts have been made to carry out a research project. Higher frequency and lower voltage for breakdown may be safer for insulation testing. Continuous flashover may be achieved for the proposed technique. Some results show a satisfied potential for further development.

**VII. REFERENCES**

- [1] Camilli, G. and Chapman, J.J. Gaseos, "Insulation for High Voltage Apparatus" Tran. IEE vol.66, 1947,pp.1463-70
- [2] Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins, "Power Electronics" John Wiley & Sons, INC., 1989
- [3] IEC. Publication 60-2, 1994, "High Voltage Test Techniques-Part, 2 : Measuring System."
- [4] John Wiley & Sons, "High Voltage Measurement Testing and Design,"
- [5] kuff, E. and Zaengl W.S. "High Voltage Engineering Fundamental" Pergamon Press Oxford, 1<sup>st</sup> ed., 1984.
- [6] Charles I. Hubert "ELECTRIC MACHINES" Maxwell , 1991
- [7] S.Trerutpicham, S.Deeon, S.Potiviejkul "High voltage high frequency transformer for testing insulator" Electrical Engineering Conference 19<sup>th</sup>, 2539, Thailand

**VIII. BIOGRAPHIES**

Sakchai Trerutpicham received the B.Eng. degree from Mahanakorn University of Technology Bangkok Thailand. He is also working towards M.Eng. degree at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok Thailand. His research interests include high voltage and power system engineering. Currently, he is a lecturer at Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology Bangkok Thailand.

Assoc. Prof. Siriwat Protiviejkul received the B.Eng. degree and the M.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok Thailand. His research interests include high voltage and power system engineering and power electronics applied to power system.

Currently, he is working as an Associate Professor with Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok Thailand. e-mail :kpsiriva@kmitl.ac.th

Dr. Vijit Kinnares received the B.Eng. degree and the M.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok Thailand and the Ph.D. degree from the University of Nottingham UK. His research interests include power electronics and electric drives. Currently, he is a lecturer at Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok Thailand. e-mail: kkwijit@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายศักดิ์ชัย ตรีรัตน์พิจารณ์ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “เครื่องต้นแบบสำหรับการทดสอบแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง”

กำเนิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อ วันอาทิตย์ ที่ 5 สิงหาคม พ.ศ. 2516 เวลา 16.05 น.

สำเร็จการศึกษา ระดับ ปฐมศึกษา ณ โรงเรียนอนุบาล จ.ลำพูน ปี พ.ศ. 2528

สำเร็จการศึกษา ระดับ มัธยมศึกษา ณ โรงเรียนจักรคำคณาทร จ.ลำพูน ปี พ.ศ. 2534

สำเร็จการศึกษา ระดับ ปริญญาตรี ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร พ.ศ. 2538

ปี พ.ศ. 2539 ถึงปัจจุบัน เป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

### ผลงานที่ผ่านมา

1. บทความเรื่อง “หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง สำหรับการทดสอบลูกถ้วยฉนวน” การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น
2. บทความเรื่อง “แหล่งจ่ายกระแสสูงอัตโนมัติ” การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 วันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2543 โรงแรม ดิเอ็มเพรส เชียงใหม่
3. บทความเรื่อง “HIGH VOLTAGE AND HIGH FREQUENCY SWITCHING POWER SUPPLY FOR HIGH FREQUENCY SOLID INSULATOR TESTING” POWERCON2000, 4-7 December 2000, The University of Western Australia, Perth, Australia.
4. บทความเรื่อง “เครื่องต้นแบบ สำหรับการทดสอบแรงดันสูง ความถี่สูง โดยใช้อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง” วิศวกรรมลาดกระบัง, ฉบับที่ 2 ปีที่ 18 มิถุนายน 2544 , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้