

การศึกษาการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

STUDY OF WIRELESS ELECTRIC ENERGY



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของ การศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๖

การศึกษาการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

STUDY OF WIRELESS ELECTRIC ENERGY



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

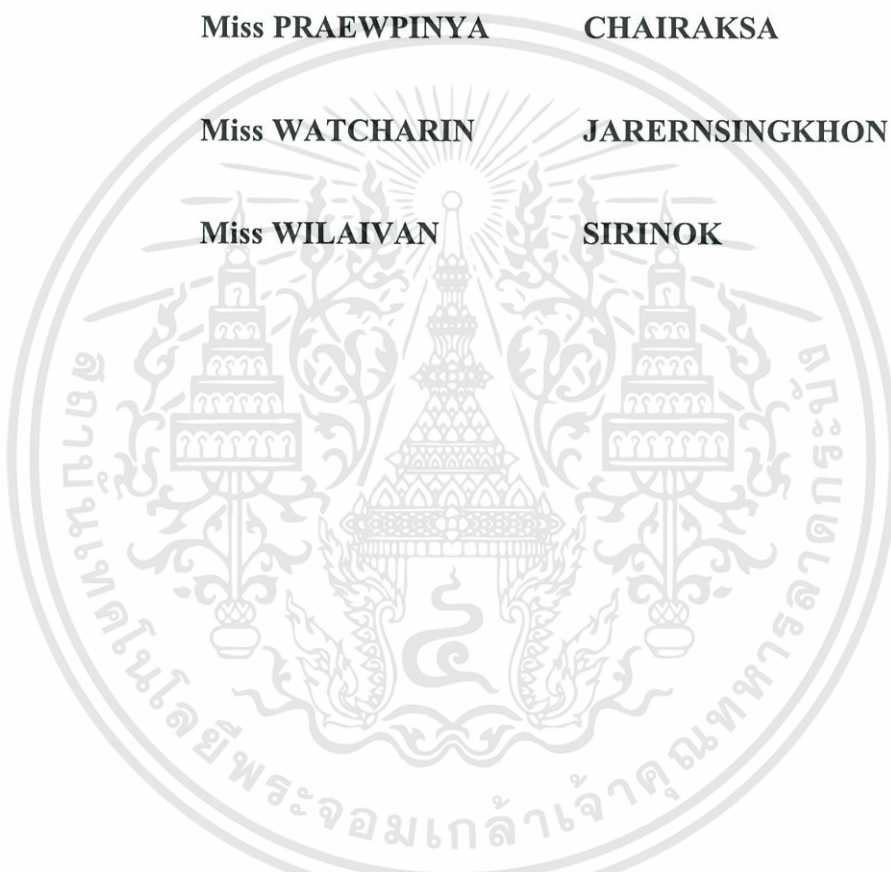
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# STUDY OF WIRELESS ELECTRIC ENERGY

Miss PRAEWPINYA CHAIRAKSA

Miss WATCHARIN JARERNSINGKON

Miss WILAIVAN SIRINOK



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OR SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





หัวข้อโครงการพิเศษ การส่งผ่านพลังงานแบบไร้สาย  
 STUDY OF WIRELESS ELECTRIC ENERGY

ชื่อนักศึกษา นางสาวแพรวกัญญา ฉายรักษา  
 นางสาววัชรินทร์ เจริญสิงขรณ์  
 นางสาววิไลวรรณ ศีรินอก

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต  
 สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์  
 ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.อากาศรณ์ สกฤตกระเวก	
ดร.พิชชานันท์ ศรีเศรษฐ์โสภณ	พิชชานันท์ 
อ.ชนภรณ์ ลีลาวัดนานนท์	
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การส่งผ่านพลังงานแบบไร้สาย STUDY OF WIRELESS ELECTRIC ENERGY
ชื่อนักศึกษา	นางสาวแพรวกัญญา ฉายรักษา นางสาววัชรินทร์ เจริญสิงขรณ์ นางสาววิไลวรรณ ศิรินอก
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้า ความถี่สูง คอยล์ตัวส่งทำงานผ่านวงจรกำเนิดสัญญาณที่ความถี่อยู่ในช่วง 1.2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยผ่านวงจรขยายสัญญาณ และคอยล์ตัวรับผ่านวงจรเรียงกระแส พบว่า ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้ประมาณ 10.4 เปอร์เซ็นต์

**คำสำคัญ :** การส่งผ่านพลังงานแบบไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	STUDY OF WIRELESS ELECTRIC ENERGY
<b>Students</b>	Miss. Praewpinya Chairaksa Miss. Watcharin Jarernsingkhon Miss. Wilaiwan Sirinok
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Physics
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Assist Prof. Wichan Techitdheera



### ABSTRACT

This special has been studied an electric power transfer using inductive coils. The transmitting coil was supplied by oscillator circuit through amplifiers. The receiving coil including with rectified circuit used. The maximum efficiency 10.4% was obtained.

**Keywords :** Wireless, Power Transfer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดและเสนอแนวทางแก้ปัญหาเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.อนุพงศ์ สรงประภา ที่ให้ความสะดวกในการใช้ห้องทดลอง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตลอดจนเครื่องมือวัดต่างๆ ตลอดจนการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณพี่รัฐชนนที่ มั่นจันทร์ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำต่างๆเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ขอขอบพระคุณพี่ๆในภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีที่ให้คำปรึกษา ตลอดจนการช่วยเหลือในด้านต่างๆที่ทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณผลงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่างๆที่ข้าพเจ้าใช้เป็นเอกสารอ้างอิงและทำการศึกษาจนทำให้การทำงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จ ซึ่งคาดว่ารายงานโครงการพิเศษนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ

สุดท้ายขอคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่บิดามารดาที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า

นางสาวแพรววิญญา ฉายรักษา

นางสาววัชรินทร์ เจริญสิงขรณ์

นางสาววิไลวรรณ ศิรินอก

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญตาราง (ต่อ)	VIII
สารบัญตาราง (ต่อ)	IX
สารบัญรูป	X
สารบัญรูป(ต่อ)	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 กระแสเหนี่ยวนำ	3
2.1.1 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนเส้นลวดตัวนำที่เคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก	3
2.1.2 กฎของฟาราเดย์	5
2.1.3 การหาทิศของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด	6
2.2 ตัวเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็ก	8
2.2.1 ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ	10
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ	13
2.3 วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)	16
2.3.1 ชนิดของวงจรเรียงกระแส	16
2.4 วงจรออสซิลเลเตอร์	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 Oscillator เชิงเส้น	26
2.4.2 Oscillator ไม่เชิงเส้น	27
2.5 ทฤษฎี Highly Resonance Wireless Power Transfer	30
2.5.1 การเรโซแนนซ์ของวงจรเดียว	30
2.5.2 ตัวกำทอนคู่	31
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 ศึกษาหลักการเหนี่ยวนำของขดลวด	34
3.2 ศึกษาหลักการการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สายโดยการใช้ ขดลวดเป็นตัวส่งและตัวรับพลังงาน	35
3.3 การสร้างขดลวด	35
3.4 ทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวดโดยป้อนความถี่จาก เครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator)	36
3.5 การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์	39
3.6 การออกแบบวงจรขยาย	39
3.7 ทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวดโดยป้อนความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์	41
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	
4.1 ผลการทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวดโดยป้อนความถี่จาก เครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา	43
4.2 ผลการทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวดโดยป้อนความถี่จาก เครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา โดยละเอียด	59
4.3 ผลทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวดโดยป้อนความถี่ จากวงจรออสซิลเลเตอร์	67
4.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเดือนระยะห่างระหว่างขดลวด โดยป้อนความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์	71
4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวด	74
4.5.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวด โดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา	74

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	หน้า
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก	79
	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความชื้นซาบได้ของแกนชนิดต่างๆ	15
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าองค์ประกอบของการสร้างขดลวด	35
ตารางที่ 4.1 : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง	43
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง	44
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง	45
ตารางที่ 4.2 : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง	45
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง	46
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง	47
ตารางที่ 4.3 : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	47
ตารางที่ 4.3 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	48
ตารางที่ 4.3 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	49
ตารางที่ 4.3 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	50
ตารางที่ 4.4 : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	50
ตารางที่ 4.4 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	51
ตารางที่ 4.4 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	52
ตารางที่ 4.5 : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง	52
ตารางที่ 4.5 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง	53
ตารางที่ 4.5 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง	54
ตารางที่ 4.6 : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	54
ตารางที่ 4.6 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	55
ตารางที่ 4.6 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	56
ตารางที่ 4.6 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง	57
ตารางที่ 4.7 : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด	57
ตารางที่ 4.7 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด	58
ตารางที่ 4.7 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด	59
ตารางที่ 4.8 : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์และค่ากระแสของสัญญาณขาออก ของขดลวดตัวส่ง และสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	59

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.8 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์และค่ากระแสของสัญญาณขาออก ของขดลวดตัวส่งละสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	60
ตารางที่ 4.8 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์และค่ากระแสของสัญญาณขาออก ของขดลวดตัวส่งละสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	61
ตารางที่ 4.9 : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง และสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	61
ตารางที่ 4.9 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง และสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	62
ตารางที่ 4.10 : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด	63
ตารางที่ 4.11 : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวดโดยป้อน ความถี่จาก เครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) โดยละเอียด	64
ตารางที่ 4.11 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวด โดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) โดยละเอียด	65
ตารางที่ 4.11 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวด โดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) โดยละเอียด	66
ตารางที่ 4.11 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวด โดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) โดยละเอียด	67
ตารางที่ 4.12 : ตารางบันทึกผลค่ากระแสและความต่างศักย์ของสัญญาณขาออก ของขดลวดตัวส่ง	68
ตารางที่ 4.13 : ตารางบันทึกผลค่ากระแสและความต่างศักย์ของสัญญาณขาออก ของขดลวดตัวรับ	68
ตารางที่ 4.13 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสและความต่างศักย์ของสัญญาณขาออก ของขดลวดตัวรับ	69
ตารางที่ 4.14 : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง และสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	69

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.14 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวด ตัวส่งและสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ	70
ตารางที่ 4.15 : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด	70
ตารางที่ 4.15 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด	71
ตารางที่ 4.16 : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวด โดยป้องกันความถี่จาก วงจรออสซิลเลเตอร์	71
ตารางที่ 4.16 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวด โดยป้องกันความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์	72
ตารางที่ 4.17 : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวด โดยป้องกันความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์	73
ตารางที่ 4.17 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวด โดยป้องกันความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์	74

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นเลือดตัวนำ	4
รูปที่ 2.2 ขดลวดตัวนำหมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็ก	4
รูปที่ 2.3 แสดงการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์	5
รูปที่ 2.4 แสดงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวด PQRS เมื่อระนาบขดลวดทำมุมต่างๆ กับสนามแม่เหล็ก	6
รูปที่ 2.5 ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้กฎของเลนซ์	7
รูปที่ 2.6 การเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก	7
รูปที่ 2.7 แสดงทิศของ $\Delta \vec{B}$ กับ $\vec{B}$	8
รูปที่ 2.8 การเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	8
รูปที่ 2.9 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็ก	9
รูปที่ 2.10 ลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ	11
รูปที่ 2.11 แสดงผลของจำนวนรอบของขดลวดที่มีต่อความเหนี่ยวนำ	14
รูปที่ 2.12 แสดงผลของพื้นที่ของขดลวดที่มีต่อความเหนี่ยวนำ	14
รูปที่ 2.13 แสดงผลของความยาวของขดลวดที่มีต่อความเหนี่ยวนำ	15
รูปที่ 2.14 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	16
รูปที่ 2.15 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นบวก	17
รูปที่ 2.16 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟตรงเมื่อใช้ตัวเก็บประจุกรองแรงดัน	18
รูปที่ 2.17 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นลบ	18
รูปที่ 2.18 แสดงรูปคลื่นเมื่อใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง	19
รูปที่ 2.19 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น	19
รูปที่ 2.20 แสดงการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น	20
รูปที่ 2.21 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	21
รูปที่ 2.22 ไดโอด D1 และ D2 ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ )	22
รูปที่ 2.23 ไดโอด D3 และ D4 ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ )	22
รูปที่ 2.24 รูปคลื่น $V_{out}$ เปรียบเทียบกับ $V_{in}$ ของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์	22
รูปที่ 2.25 แสดงค่าแรงดันไฟตรงกับค่าแรงดันไฟสูงสุด $V_p$ ของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น	23
รูปที่ 2.26 แสดงค่าแรงดันสูงสุดด้านกลับที่เกิดกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	23
รูปที่ 2.27 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นใช้ตัวเก็บประจุกรอง	24
รูปที่ 2.28 รูปสัญญาณวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นก่อนและหลังใส่ตัวเก็บประจุ	24

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.29 ลักษณะของรูปสัญญาณที่จะได้จากการออกแบบวงจรผลิตความถี่	25
รูปที่ 2.30 ลักษณะผลตอบสนองของวงจรผลิตความถี่ในแบบโดเมนทางเวลา	29
รูปที่ 2.31 ลักษณะผลตอบสนองของวงจรผลิตความถี่ในแบบโดเมนทางความถี่	29
รูปที่ 2.31 วงจร RLC	30
รูปที่ 2.33 วงจรที่เกิดการคล่ปปลิง	31
รูปที่ 2.34 ประสิทธิภาพมากที่สุด ( $\eta_{opt}$ ) เป็นฟังก์ชันกับ U (figure-of-merit)	33
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของ ขดลวดกับความถี่ ที่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ต่างๆ โดยป้อนความถี่จาก เครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator)	74
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของ ขดลวดกับความถี่ ที่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ต่างๆ อย่างละเอียด โดยป้อนความถี่ จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) (เพิ่มความถี่ครั้งละ 50 kHz)	75
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของ ขดลวดกับระยะห่างระหว่างขดลวดตัวส่งกับขดลวดตัวรับ โดยป้อนความถี่จาก เครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator)	76
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของ ขดลวดกับความถี่ที่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ต่างๆ โดยป้อนความถี่ จากวงจรออสซิลเลเตอร์	77
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของ ขดลวดกับระยะห่างระหว่างขดลวดตัวส่งกับขดลวดตัวรับ โดยป้อนความถี่ จากวงจรออสซิลเลเตอร์	77

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันทรัพยากรน้ำมัน แก๊ส ได้ถูกนำมาใช้ในการขนส่งเป็นจำนวนมากมหาศาล ซึ่งทรัพยากรเหล่านั้น เป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป จึงควรมีพลังงานทดแทน และพลังงานทดแทนที่น่าสนใจในปัจจุบันคือพลังงานไฟฟ้า ปัจจุบันนี้ได้เริ่มนำระบบไฟฟ้าเข้ามาใช้ในระบบขนส่งมากขึ้น เช่น รถไฟฟ้า รถยนต์ระบบไฮบริด จักรยานไฟฟ้า รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น ในอนาคตอาจมีการพัฒนาให้รถยนต์ใช้พลังงานไฟฟ้าแทนการใช้เชื้อเพลิง และอาจมีการสร้างสถานีชาร์จไฟฟ้าให้กับรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งระบบชาร์จไฟฟ้าด้วยสนามแม่เหล็กจะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาพแวดล้อมรอบข้าง เพราะสนามแม่เหล็กจะเกิดแค่ในวงจำกัด และไม่มีการต่อสายเคเบิลซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ ซึ่งถ้ามีการพัฒนาในขั้นสูงวิธีการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สายจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย
- 1.2.2 สร้างอุปกรณ์การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย
- 1.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงาน

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 นำหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดคมาศึกษาและสร้างอุปกรณ์ทดลองการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย
- 1.3.2 การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ความถี่ 200 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ จากเครื่อง function generator
- 1.3.3 การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ความถี่ไม่เกิน 1.5 เมกะเฮิร์ตซ์ จากวงจรเจนเนอเรเตอร์ที่สร้างขึ้น
- 1.3.4 การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าภายใต้การทำงานของ MOSFET และ Op-am ที่ทำงานที่ไฟเลี้ยงเป็น 10 โวลต์ และไม่เกิน 20 โวลต์

- 1.3.5 ระยะในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายโดยใช้ความถี่จากเครื่อง function generator และ วงจรเจอนอร์เรเตอร์ที่สร้างขึ้น

#### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการต่างๆที่เกี่ยวข้อง  
 1.4.2 ออกแบบและคำนวณหาค่าของอุปกรณ์  
 1.4.3 จัดซื้ออุปกรณ์  
 1.4.4 จัดสร้างอุปกรณ์  
 1.4.5 ทดลองและบันทึกผล  
 1.4.6 สรุปและวิเคราะห์ผล  
 1.4.7 จัดทำรูปเล่ม

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจถึงหลักการเหนี่ยวนำของขดลวด  
 1.5.2 ได้ศึกษาเรียนรู้ของการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สาย  
 1.5.3 ได้เรียนรู้การสัมพันธ์กันระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก  
 1.5.4 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์  
 1.5.6 พัฒนาเพื่อให้มีการส่งผ่านพลังงานที่มีกำลังงานสูงขึ้น  
 1.5.7 นำไปพัฒนาเป็นที่ชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สาย  
 1.5.8 พัฒนาเชิงการพาณิชย์

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

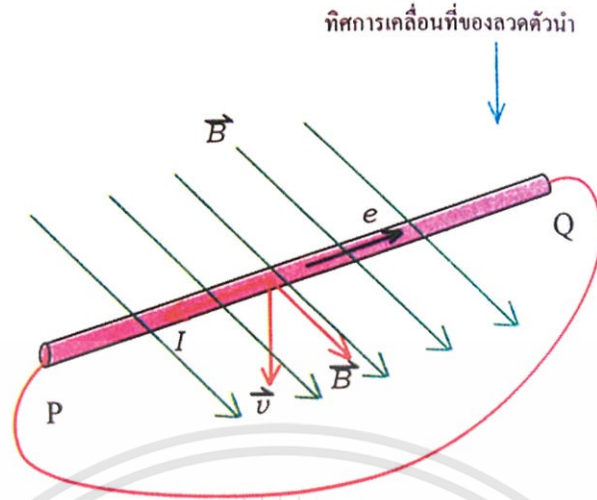
### 2.1 กระแสเหนี่ยวนำ

จากการศึกษาเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหรือฟลักซ์แม่เหล็กที่ลวดตัวนำนั้น ในทางกลับกันฟลักซ์แม่เหล็กก็จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งความคิดนี้ Michael Faraday นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษได้ค้นพบและสรุปผลว่า“ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ณ บริเวณใด การเปลี่ยนฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในตัวนำที่วางอยู่ในบริเวณนั้น” เรียกผลที่เกิดขึ้นว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic induction) และเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากวิธีการนี้ว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

#### 2.1.1 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนเส้นลวดตัวนำที่เคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก

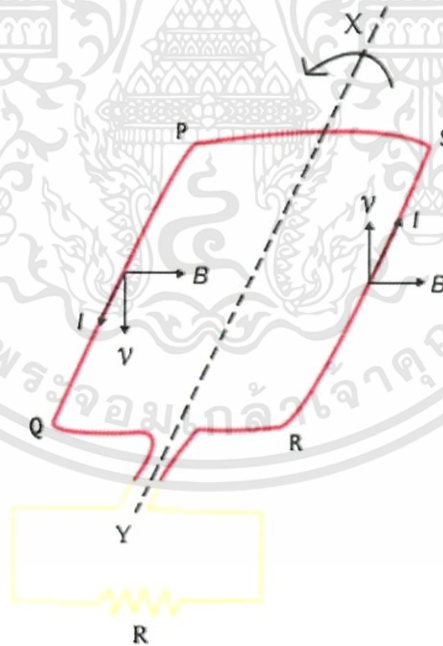
กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านลวดตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง เรียกว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic induction) และเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากวิธีการนี้ว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced current) ดังรูปที่ 1 เมื่อเคลื่อนที่ลวดตัวนำในสนามแม่เหล็ก เส้นลวดตัวนำ PQ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ดังนั้น จะมีแรงแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระในเส้นลวดตัวนำในทิศตั้งฉากกับระนาบของ และ ซึ่งจะอยู่ในแนวเส้นลวด PQ มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างปลาย PQ หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ปลายทั้งสองของเส้นลวดตัวนำมีความต่างศักย์  $V_{PQ}$  ดังนั้น ถ้าต่อเส้นลวดตัวนำนี้ให้ครบวงจร ก็จะมีกระแสไฟฟ้าในวงจร แสดงว่า ปลายทั้งสองของเส้นลวดตัวนำทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced electromotive force) จากการทดลองและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง พบว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ

1. อัตราเร็วของลวดตัวนำ
2. ขนาดของสนามแม่เหล็ก
3. ความยาวของเส้นลวด



รูปที่ 2.1 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นลวดตัวนำ

จากที่กล่าวมาแล้ว เป็นการใช้เส้นลวดตัวนำตรงเคลื่อนที่ตัดฟลักซ์แม่เหล็ก ถ้าให้ขดลวดตัวนำรูปสี่เหลี่ยมหมุนจาก หมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็ก จะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.2 ขดลวดตัวนำหมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็ก

ให้ขดลวด PQRS หมุนรอบแกน XY ในทิศทวนเข็มนาฬิกา เมื่อเราพิจารณาลวดตัวนำ PQ และ RS จะเห็นว่า ลวด PQ และ RS เคลื่อนที่ตัดกับฟลักซ์แม่เหล็กในทิศลงและขึ้นตามลำดับจะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ I ดังรูป 2.2 โดยทิศของกระแสไฟฟ้าจะอยู่ในทิศจาก P ไป Q และจาก R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไป S ตามลำดับ สำหรับลวดส่วน PS และ QR นั้นเคลื่อนที่ขนานกับทิศสนามโดยไม่ตัดฟลักซ์แม่เหล็ก จึงไม่เกิดกระแสเหนี่ยวนำบนลวดส่วนนี้ แต่เนื่องจากลวด PS และ QR เป็นตัวนำที่ต่อกับส่วน PQ และ RS กระแสเหนี่ยวนำบน PQ และ RS จึงผ่านจาก S ไป P และ Q ไป R ด้วยอัตราคงที่ภายนอกครบวงจร

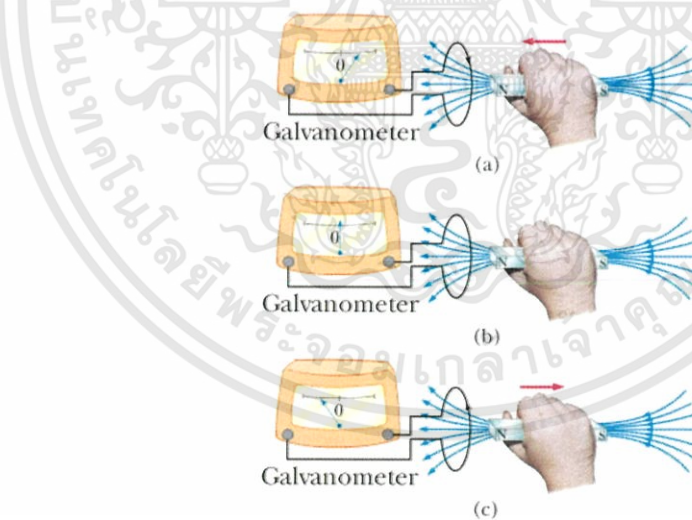
### 2.1.2 กฎของฟาราเดย์

ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและฟลักซ์แม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลง และสรุปได้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดนั้น เมื่อเทียบกับเวลาข้อความนี้เรียกว่ากฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Induction) เรียกสั้นๆ ว่า “กฎของฟาราเดย์” ซึ่งเป็นกฎพื้นฐานของไฟฟ้าและแม่เหล็กแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด  
 $\Phi_B$  คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.2)$$

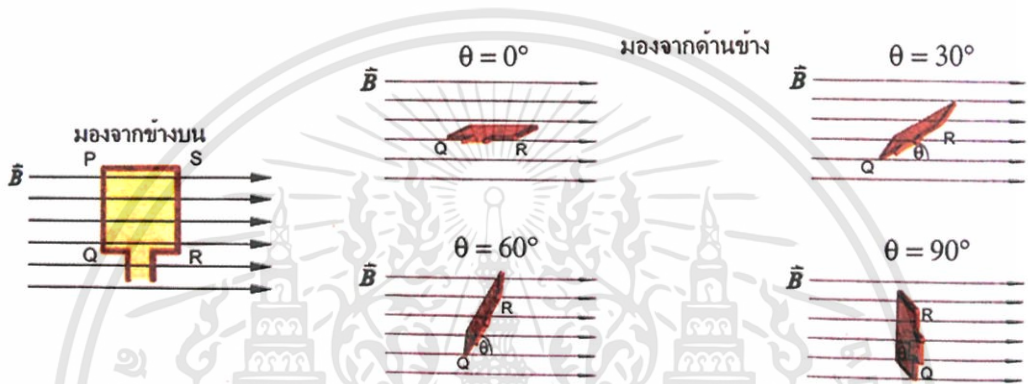


รูปที่ 2.3 แสดงการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

- เมื่อแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาห้วงซึ่งติดอยู่กับกัลวานมิเตอร์เข็มของมันจะเบนไปดังรูป แสดงว่ามีการเหนี่ยวนำกระแสในห้วง
- เมื่อถือแท่งแม่เหล็กนิ่งๆ ไม่มีการเหนี่ยวนำกระแสในห้วง
- เมื่อแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ห่างจากห้วงมีการเหนี่ยวนำกระแสในทิศตรงข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

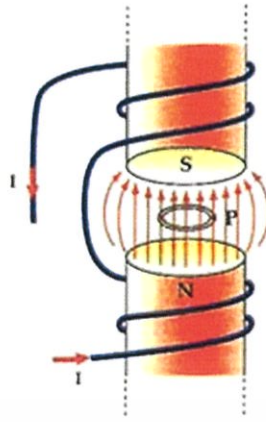
เราสามารถใช้อีกของฟาราเดย์อธิบายการเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดสี่เหลี่ยม ซึ่ง หมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็ก โดยเริ่มพิจารณาจาก เมื่อระนาบของ ขดลวดอยู่ในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดมีค่าเป็นศูนย์ และยังไม่มีการ เปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวด เมื่อขดลวดหมุนจากตำแหน่งเริ่มต้นระนาบของขดลวด จะทำมุมกับสนามแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าสูงสุดเมื่อ ระนาบของขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก สรุปก็คือในช่วงการหมุนของขดลวดที่ระนาบขดลวด กวาดมุมไป 90 องศาจากตำแหน่งเริ่มต้นนี้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดจะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่า ศูนย์ถึงค่าสูงสุด ดังนั้นจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด



รูปที่ 2.4 แสดงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวด PQRS เมื่อระนาบขดลวดทำมุมต่างๆกับสนามแม่เหล็ก

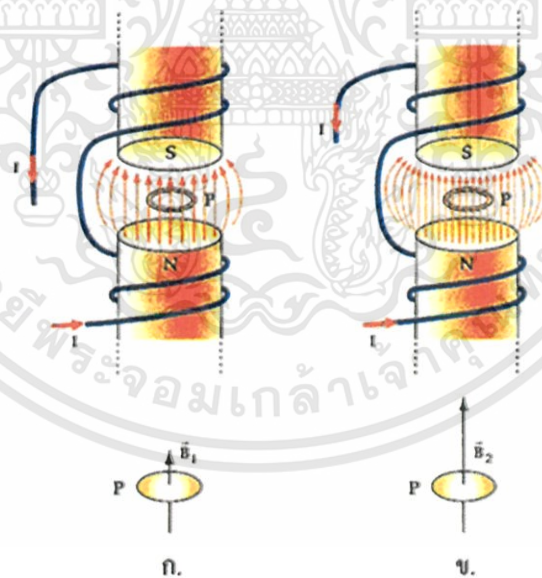
### 2.1.3 การหาทิศของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด

การหาทิศของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำ หาได้จาก กฎของเลนซ์ (Lenz's law) ซึ่งมีใจความว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในทิศที่ จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ขึ้นมาต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเดิมที่ตัดผ่านขดลวด นั้น”



รูปที่ 2.5 ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้กฎของเลนซ์

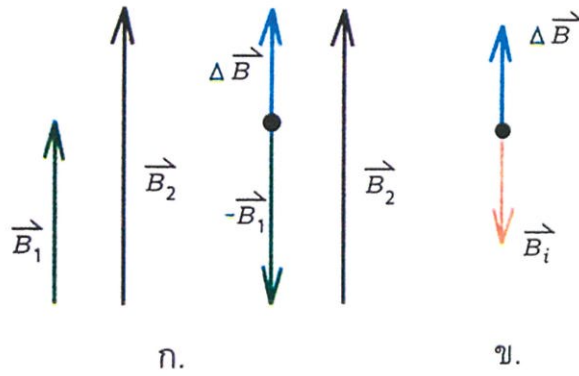
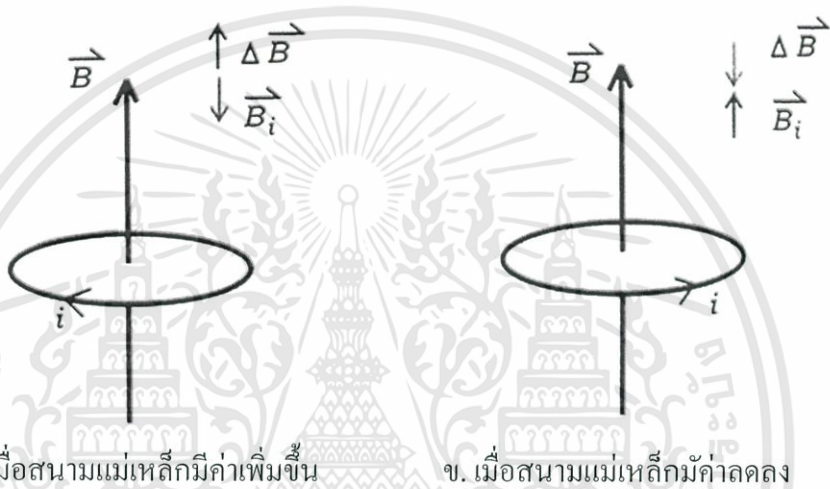
ขดลวดตัวนำ P อยู่ระหว่างขั้วของแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.6(ก.) ถ้าสนามแม่เหล็กในบริเวณขดลวดมีค่าสม่ำเสมอเท่ากับ เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า ทำให้สนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น ดังรูปที่ 2.6(ข.)



รูปที่ 2.6 การเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ  $\Delta \vec{B} = \vec{B}_2 - \vec{B}_1$  ดังรูปที่ 2.7 แสดงว่าฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวด P มีค่าเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำในขดลวด P นี้ และกระแสเหนี่ยวนำจะทำให้เกิด  $\Delta \vec{B}$  ดังรูปที่ 2.8(ก.) ในทำนองเดียวกันถ้าสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูป 2.8(ข.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 แสดงทิศของ  $\Delta \vec{B}$  กับ  $\vec{B}$ 

ก. เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น

ข. เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง

รูปที่ 2.8 การเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

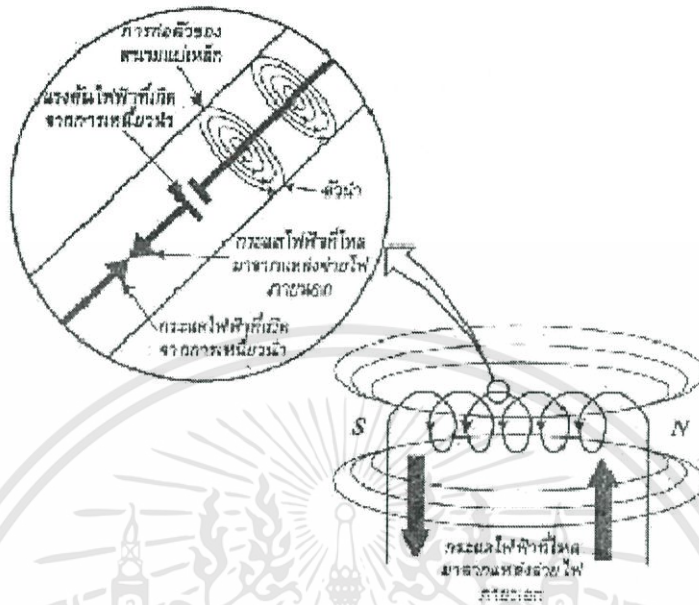
## 2.2 ตัวเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็ก

ตัวเหนี่ยวนำหรืออินดักเตอร์ (Inductor) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานอีกตัวหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานในวงจรไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย บทบาทสำคัญของตัวเหนี่ยวนำคือ ทำให้เกิดการพองตัวและการยุบตัวของสนามแม่เหล็กขึ้นมา เมื่อจ่ายแรงดันและกระแสให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนตัวเหนี่ยวนำนี้มีประโยชน์ต่อการนำไปใช้งาน นำไปสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องใช้ไฟฟ้าได้

ตัวเหนี่ยวนำเป็นเส้นลวดตัวนำจำพวกทองแดงขดลวดเป็นวงเรียงกันหลายๆ รอบ ลักษณะการพันเส้นลวดตัวนำแตกต่างกัน ทำให้ตัวเหนี่ยวนำแตกต่างกัน เรียกว่าขดลวดหรือคอยล์ (Coil) การพันจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำมีผลต่อความเหนี่ยวนำ (Inductance) ในตัวเหนี่ยวนำนั้น พันจำนวนรอบน้อยความเหนี่ยวนำน้อย พันจำนวนรอบมากความเหนี่ยวนำมาก จำนวนรอบยังมีผลต่อปริมาณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้วย จำนวนรอบน้อย สนามแม่เหล็กเกิดน้อย จำนวนรอบมาก สนามแม่เหล็กเกิดมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเส้นลวดตัวนำมาพันเป็นขด จะส่งผลให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำเกิดการเสริมแรงกัน เกิดเป็นสนามแม่เหล็กขึ้นและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความเข้มเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูป



รูปที่ 2.9 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็ก

ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) จำนวนรอบของการพันเส้นลวดตัวนำ พันรอบน้อยเกิดสนามแม่เหล็กน้อย พันรอบมากเกิดสนามแม่เหล็กมาก
- 2) ปริมาณการไหลของกระแสผ่านเส้นลวดตัวนำ กระแสไหลน้อยสนามแม่เหล็กเกิดน้อย กระแสไหลมากสนามแม่เหล็กเกิดมาก
- 3) ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนแม่เหล็กไฟฟ้า แกนอากาศให้ความเข้มสนามแม่เหล็ก แกนที่ทำมาจากสารเฟอร์โรแมกเนติกให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กมาก
- 4) ขนาดของแกนที่นำมาใช้งาน แกนขนาดเล็กให้สนามแม่เหล็กได้น้อย แกนขนาดใหญ่ให้สนามแม่เหล็กได้มาก

จากรูปที่ 2.9 แสดงการต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคร่อมเข้ากับขดลวด เป็นผลทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และความเข้มของสนามแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์ไปจนถึงค่าสูงสุดในช่วงเวลาสั้นๆ โดยการขยายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเริ่มจากส่วนกลางของลวดตัวนำ ซึ่งการขยายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเป็นการเคลื่อนที่ตัดกับตัวนำที่อยู่กับที่ ดังนั้น จึงส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น (การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า) การที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำแล้วทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในนี้ เรียกว่า การเหนี่ยวนำภายใน (Self-Inductance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 แสดงการต่อตัวเหนี่ยวนำคร่อมอยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อเปิดสวิตช์กระแสไฟฟ้าในวงจรจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานที่ต่ออันดับอยู่ ถ้าปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดก็จะทำให้สนามแม่เหล็กเกิดการขยายตัว และตลอดเวลาที่มีการเคลื่อนที่ตัดกันระหว่างสนามแม่เหล็กกับตัวเหนี่ยวนำก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ จะคอยต้านการเปลี่ยนแปลง ของกระแสไฟฟ้าภายในวงจรโดยค่าความเหนี่ยวนำของ ตัวเหนี่ยวนำ 1 เฮนรี หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ต่อวินาที ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 โวลต์ ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นการแสดงว่า Counter EMF (แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ) ที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำจะมีปริมาณเท่าไรสำหรับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเดียวกัน สูตรคำนวณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือ Counter EMF เป็นดังนี้

$$V_{\text{ind}} = L \times \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2.3)$$

โดยที่  $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี (H)

$\Delta I$  คือ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสไฟฟ้า

$\Delta t$  คือ การเปลี่ยนแปลงของเวลา

เมื่อความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) มีค่ามาก จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาก  $V_{\text{ind}}$  และถ้าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเมื่อเทียบกับเวลาที่ค่าเพิ่มขึ้น ( $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ ) ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือ Counter EMF ( $V_{\text{ind}}$ ) มีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย

## 2.2.1 ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ

### 2.2.1.1 ตัวเหนี่ยวนำชนิดขดเดี่ยว

ตัวเหนี่ยวนำชนิดขดเดี่ยว เป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีขดลวดพันไว้ขดเดี่ยว มักเรียกว่า ไซค์ (Choke) หรือคอยล์ (Coil) โครงสร้างประกอบด้วยเส้นลวดทองแดงอาบน้ำมันยาคนวนพันเป็นขดลวดอยู่บนแกนหรือฐานรองต่างๆ การเรียกชื่อตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้เรียกตามชื่อของแกนที่ทำเป็นฐานของขดลวด แบ่งออกได้เป็น

- 1) ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ (Air Core Inductor)
- 2) ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัด (Powdered - Iron Core Inductor)
- 3) ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core Inductor)
- 4) ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์ (Toroidal Core Inductor)
- 5) ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแผ่น (Laminated - Iron Core Inductor)

### 1) ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ

ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวน เช่น คาร์บอน พลาสติก ไพเบอร์ และ PVC เป็นต้น หรืออาจพันลวดๆ ไว้โดยไม่มีอะไรรองรับ ตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้นิยมนำไปใช้งานกับพวกความถี่สูงๆ หรือความถี่วิทยุ (RF) จึงมักเรียกตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ว่า RF ไซค์ ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพราะแกนไม่สามารถช่วยเสริมค่าความเหนี่ยวนำได้ การจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นต้องใช้จำนวนรอบในการพันขดลวดเพิ่มขึ้น ลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศแสดงดังรูป



รูปที่ 2.10 ลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ

### 2) ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็ก

ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัด เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยผงเหล็กชนิดอัดแน่น โดยนำผงเหล็กผสมกับกาวอัดแน่นเป็นแท่ง ช่วยลดการสูญเสียสัญญาณจาก กระแสไหลวน (Eddy Current) ลงได้ สัญญาณส่งผ่านตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัดได้สูงขึ้น เกิดการสูญเสียสัญญาณภายในตัวเหนี่ยวนำลดลง ใช้งานได้ดีในย่านความถี่สูงๆ มีความเหนี่ยวนำสูง แต่มีขนาดเล็ก

### 3) ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์

ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยเฟอร์ไรต์ ส่วนผสมของเฟอร์ไรต์มีความแตกต่างกันหลายอย่าง เช่น แมกนีเซียมกับสังกะสี แมกนีเซียมกับแมงกานีส แมกนีเซียมกับทองแดง นิกเกิลกับสังกะสี และแมงกานีสกับสังกะสี เป็นต้น แต่ละชนิดของเฟอร์ไรต์ให้ความเข้มของค่าความเหนี่ยวนำแตกต่างกัน ข้อดีของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ คือ สามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆ ได้ ใช้งานได้ดีทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูง

#### 4) ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์

ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์ เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยผลเหล็กชนิดอัดแน่น หรือไฟอร์ไรต์ โดยสร้างขึ้นเป็นรูปวงแหวน ขดลวดถูกพันรอบแกนทอรอยด์โดยรอบ ข้อดีของการใช้แกนทอรอยด์ คือ เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่แพร่กระจายออกไปภายนอก และสนามแม่เหล็กจากภายนอกก็ไม่เข้ามารบกวน สามารถทำให้ตัวเหนี่ยวนำแบบนี้มีความเหนี่ยวนำสูงในขนาดที่สร้างได้เล็กลง นิยมนำไปใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง ที่ต้องการหาค่าความเหนี่ยวนำสูงและมีสนามแม่เหล็กรบกวนต่ำ

#### 5) ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก

ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแผ่น เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยเหล็กแผ่นบางวางซ้อนกัน เหล็กแผ่นบางแต่ละแผ่นเคลือบฉนวนไว้ เพื่อช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและช่วยทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น การใช้งานนิยมนำไปใช้งานในย่านความถี่ต่ำในย่านความถี่เสียง (AF) มักเรียกว่า AF โฉก เช่น ใช้เป็นตัวกรองไฟ (Filter) แรงดันไฟสลับเป็นแรงดันไฟตรง เป็นต้น

#### 2.2.1.2 ตัวเหนี่ยวนำชนิดหลายขด

ตัวเหนี่ยวนำชนิดหลายขด เป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีขดลวดพันไว้บนแกนมากกว่าหนึ่งขด เช่น 2 ขด, 3 ขด และ 4 ขด เป็นต้น ขดลวดทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนทางเข้าหรือขดอินพุต (Input) มันถูกเรียกว่าขดปฐมภูมิ (Primary) ทำหน้าที่รับแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้ามา ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กฟองตัวออก เมื่อจ่ายแรงดันไฟสลับ สนามแม่เหล็กจะยุบตัวลง เพื่อจ่ายผ่านสนามแม่เหล็กไปตัวผ่านขดลวดขดอื่นๆ อีกส่วนของขดลวดคือ ส่วนทางออกหรือเอาต์พุต (Output) มักถูกเรียกว่าขดทุติยภูมิ (Secondary) ทำหน้าที่รับการชักนำของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากปฐมภูมิ ในขณะที่สนามแม่เหล็กของขดลวดปฐมภูมิฟองตัวออก เกิดสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดทุติยภูมิ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induce Electro Motive Force) หรือ EMF ขึ้นมา นั่นคือ ขดลวดทุติยภูมิเกิดแรงดันขึ้นมา

ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นมาทางขดลวดทุติยภูมิ มีค่าแรงดันเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของการพันขดลวด พันขดลวดรอบน้อยแรงดันเกิดน้อย พันขดลวดรอบมากแรงดันเกิดมาก นำหลักการดังกล่าวนี้ไปใช้ในตัวแปลงแรงดันให้มากขึ้นหรือน้อยลง เรียกตัวเหนี่ยวนำชนิดเหนี่ยวนำชนิดนี้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าหรือทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Transformer) การเรียกชื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจะเรียกชื่อตามชื่อของแกนที่เป็นฐานรองขดลวด แบ่งได้เป็น

- 1) หม้อแปลงไฟฟ้าแกนอากาศ (Air - Core Transformer)
- 2) หม้อแปลงไฟฟ้าแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite - Core Transformer)
- 3) หม้อแปลงไฟฟ้าแกนเหล็ก (Iron - Core Transformer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1) หม้อแปลงไฟฟ้าแกนอากาศ

หม้อแปลงไฟฟ้าแกนอากาศ เป็นหม้อแปลงที่ขดลวดทุกขดพันบนแกน หรือฐานรองทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวน เช่น พลาสติก โฟเบอร์ และ PVC เป็นต้น หรืออาจพันลอยๆ ไว้โดยไม่มีอะไรรองรับ ตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้นิยมใช้งานกับย่านความถี่สูง เพราะมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ

### 2) หม้อแปลงไฟฟ้าแกนเฟอร์ไรต์

หม้อแปลงไฟฟ้าแกนเฟอร์ไรต์ เป็นหม้อแปลงที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยเฟอร์ไรต์ที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน เช่น แมกนีเซียมกับสังกะสี แมกนีเซียมกับทองแดง แมกนีเซียมกับแมงกานีส และแมกนีเซียมกับสังกะสี เป็นต้น นิยมใช้งานในย่านความถี่สูง เช่น ภาครับวิทยุ (RF) ภาควัดความถี่ปานกลาง (IF) และภาควัดความถี่ (osc.) เป็นต้น

### 3) หม้อแปลงไฟฟ้าแกนเหล็ก

หม้อแปลงไฟฟ้าแกนเหล็ก เป็นหม้อแปลงที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยแผ่นเหล็กบางเคลือบฉนวนวางซ้อนกัน มีผลให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำที่มากขึ้น และช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน การใช้งานนิยมนำไปใช้กับย่านความถี่ต่ำๆ พวกความถี่เสียง ทำหน้าที่เป็นตัวแปลงระดับแรงดัน โดยทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นหรือลดลง

#### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ

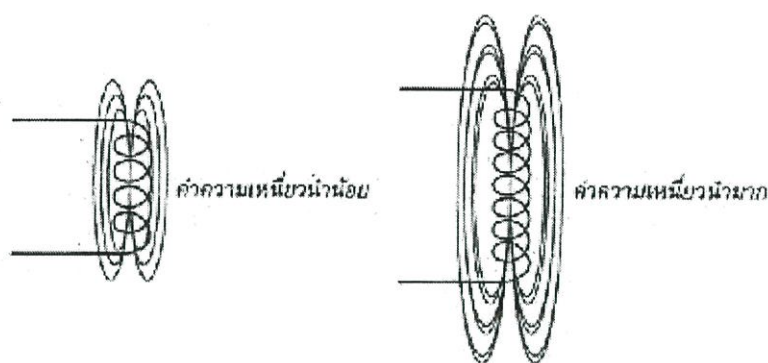
ค่าความเหนี่ยวนำถูกกำหนดโดย 4 ปัจจัย ดังนี้

- 1) จำนวนรอบของขดลวด
- 2) พื้นที่ของขดลวด
- 3) ความยาวของขดลวด
- 4) วัสดุที่นำมาทำแกนภายในขดลวด

#### 1) จำนวนรอบของขดลวด

ถ้าตัวเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบของขดลวดมากขึ้น ดังแสดงในรูป สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในขดลวดก็จะเกิดขึ้นมากด้วย สนามแม่เหล็กปริมาณมากนี้ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในตัวเหนี่ยวนำที่เรียกว่า "Counter EMF หรือ Back EMF" และจากการที่มีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมากตัดกับขดลวด จึงส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำมากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ (L) จึงเป็นสัดส่วน โดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด (N)

$$L \propto N$$



รูปที่ 2.11 แสดงผลของจำนวนรอบของขดลวดที่มีต่อความเหนี่ยวนำ

## 2) พื้นที่ของขดลวด

ถ้าพื้นที่ของขดลวดเพิ่มขึ้นสำหรับขดลวดที่มีจำนวนรอบใดๆ ดังแสดงในรูป จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีจำนวนมากขึ้นด้วย และการมีสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ของขดลวด ( $A$ )

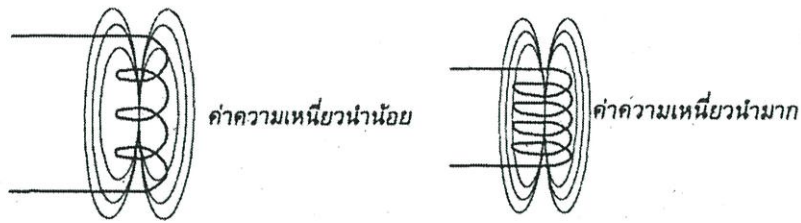


รูปที่ 2.12 แสดงผลของพื้นที่ของขดลวดที่มีต่อความเหนี่ยวนำ

## 3) ความยาวของขดลวด

ถ้าทำให้ขดลวดจำนวน 4 รอบ ขยายพื้นที่ออก (นั่นคือความยาวของขดลวดเพิ่มขึ้น) ดังแสดงในรูป ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดแต่ละขดจะมีปริมาณลดลงในทางกลับกันถ้าขดลวดที่มีจำนวนเท่าเดิมนำมาพันให้อยู่ชิดกันมากขึ้น (ความยาวของขดลวดสั้นลง) สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดในแต่ละขดจะเสริมซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากขึ้นไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวของขดลวด

$$L \propto \frac{1}{l}$$



รูปที่ 2.13 แสดงผลของความยาวของขดลวดที่มีต่อความเหนี่ยวนำ

#### 4) วัสดุที่นำมาทำแกนภายในขดลวด ( $\mu$ )

ตัวเหนี่ยวนำส่วนมากมีแกนที่ทำจากวัสดุจำพวกนิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก เฟอร์ไรต์ หรืออัลลอย ซึ่งแกนเหล่านี้มีคุณสมบัติที่จะช่วยรวมหรือเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนั้น ค่าความซบซึ่มได้ (Permeability) จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ โดยถ้าค่าความซบซึ่มได้ของวัสดุที่ใช้ทำแกนมีค่ามาก ก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากตามไปด้วย ดังแสดงในตารางแสดงตัวอย่างของวัสดุหลายชนิดที่นำมาใช้ทำแกน

$$L \propto \mu$$

ค่าความซบซึ่มได้ของวัสดุชนิดต่าง ๆ	
วัสดุ	ค่าความซบซึ่มได้ ( $\mu$ )
อากาศ หรือสุญญากาศ	$1.26 \times 10^6$
นิกเกิล	$6.28 \times 10^6$
โคบอลต์	$7.56 \times 10^5$
เหล็กทอ	$1.1 \times 10^4$
เหล็กแท่ง	$5.56 \times 10^4$
แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า	$6.9 \times 10^3$
เหล็กซิลิกอน	$8.8 \times 10^3$
เฟอร์มาลอย	0.126
ซูเปอร์มาลอย	1.26

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความซบซึ่มซบได้ของแกนชนิดต่างๆ

ดังนั้นจะพบว่า ค่าความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และจำนวนรอบของขดลวด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าคงตัวที่เรียกว่า สภาพให้ซึมผ่านได้หรือเพอร์มิอิตีทีทางแม่เหล็ก (permeability) ของตัวกลาง

จากปัจจัยทั้ง 4 ประการที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงสามารถนำมาเขียนเป็นสูตรคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$L = \frac{N^2 \times A \times \mu}{l} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $L$  = ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี่

$N$  = จำนวนของขดลวด

$A$  = พื้นที่ของขดลวด มีหน่วยเป็นตารางเมตร

$\mu$  = ค่าความซึมซาบได้ของวัสดุ (Permeability)

$l$  = ความยาวของวัสดุที่นำมาทำแกน มีหน่วยเป็น เมตร

## 2.3 วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)

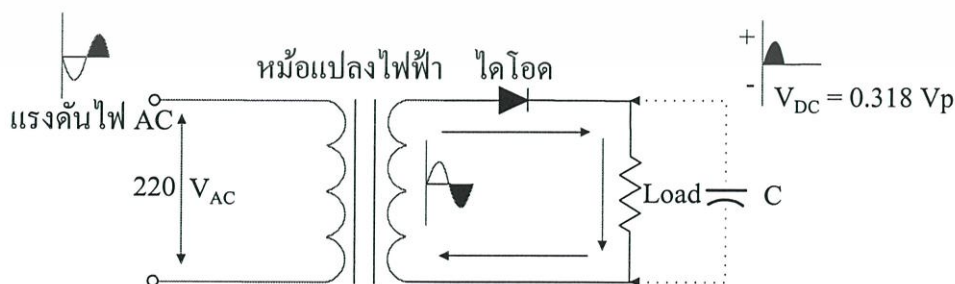
วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) คือ วงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage) ที่ขั้วขาออกของวงจรส่วนสำคัญของวงจรถือคือ ไดโอด

### 2.3.1 ชนิดของวงจรเรียงกระแส

#### 1. วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-wave Rectifier Circuit)

##### 1.1 ลักษณะวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น จะเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ตัดเอาแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้ามาอาจเป็นครึ่งบวกหรือครึ่งลบแล้วแต่การจัดวงจร ไดโอด แรงดันที่ส่งออกเอาท์พุทจะเป็นช่วงๆ คือช่วงมีแรงดันและช่วงไม่มีแรงดันสลับกันไป วงจรประกอบด้วยไดโอดตัวเดียวดังรูปที่ 2.12 การทำงานของวงจร ไฟกระแสสลับจะมาปรากฏที่ขาแอนโนด โดยไดโอดจะยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทางเดียว คือช่วงที่ได้รับไบอัสตรง ดังนั้นวงจรจะมีกระแสไหลเพียงช่วงบวกของไฟสลับเท่านั้น ถ้าช่วงลบจะไม่มีกระแสไหล แรงไฟตรงที่เอาท์พุทนี้ยังนำไปใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่ได้ เพราะเป็นไฟตรงที่ไม่เรียบพอ (Pulse D.C) จึงต้องมีการกรอง (Filter) ให้เรียบโดยใช้ตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรอง



รูปที่ 2.14 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

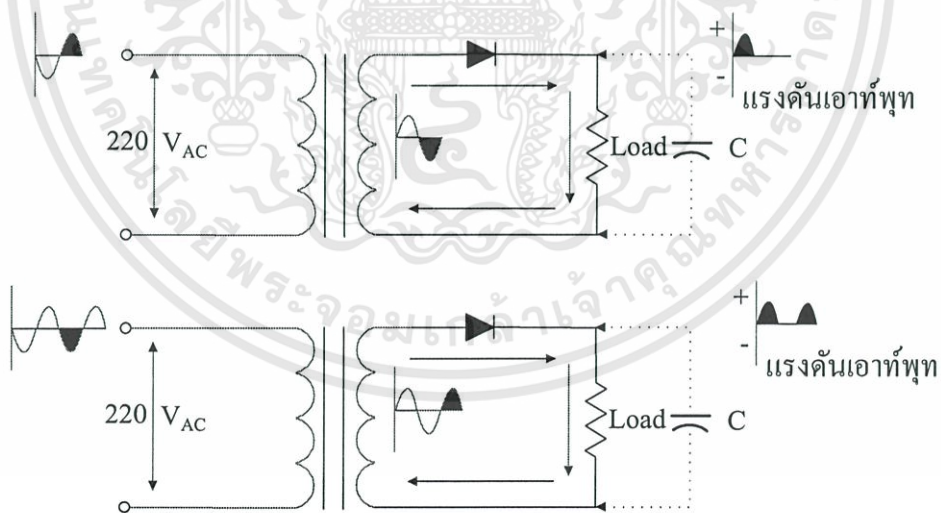
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

การเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier) มีลักษณะวงจรดังรูปที่ 2.13 การทำงานเมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เข้าทางขดลวดฝั่งปฐมภูมิ (Primary) ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้ามายังขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) การเหนี่ยวนำของแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง เฟสของสัญญาณเข้ากับเฟสของสัญญาณออกจะต่างเฟสกัน 180 องศา เมื่อขั้วบนของขดปฐมภูมิได้รับเฟสลบ ขั้วล่างเทียบได้เฟสบวก จะทำให้ขดทุติยภูมิขั้วบนเป็นเฟสบวก ขาแอนอด (A) ของไดโอดได้รับแรงดันซีกบวก ขาแคโทด (K) ได้รับแรงดันซีกลบเป็นผลให้ไดโอดได้รับไบอัสตรง ไดโอดนำกระแส มีกระแสไหลเข้าขาแอนอด ออกขาแคโทดผ่านโหลด (Load) ครบวงจรที่ขั้วล่างของทุติยภูมิ มีแรงดันซีกบวกตกคร่อมที่โหลด

ในช่วงเวลาต่อมาครึ่งไซเคิลหลังของไฟสลับ ขั้วบนของทุติยภูมิเป็นเฟสลบ ขั้วล่างเทียบศักย์ได้เป็นเฟสบวก ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ขาแอนอดของไดโอดได้รับแรงดันซีกลบและขาแคโทดได้รับแรงดันซีกบวก ไดโอดได้รับไบอัสกลับจะไม่นำกระแสเป็นผลให้ไม่มีแรงดันปรากฏที่โหลด ในรอบต่อมการทำงานก็จะเป็นไปตามลักษณะเดิมซ้ำๆ กันไปเรื่อยๆ โดยมีแรงดันปรากฏที่เอาต์พุตเป็นช่วงๆ (ช่วงเว้นช่วง) นอกจากนี้วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นยังสามารถแบ่งออกเป็นวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นบวกและวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นลบ

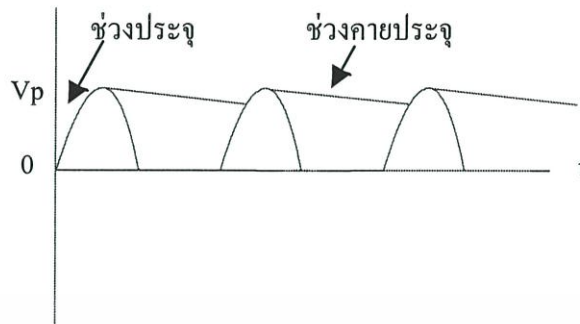
#### 1.2.1 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นบวก



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นบวก

เป็นการจัดวงจรไดโอดให้นำกระแสเฉพาะซีกบวกของไฟสลับ ทำให้แรงดันที่ได้จากการเรียงกระแสออกมาที่เอาต์พุตเพียงช่วงบวกของไฟสลับเท่านั้น แรงดันไฟตรงเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากสูตร  $V_{DC} = 0.318 V_P$  หรือ  $V_{DC} = 0.45 V_{AC}$  แต่แรงดันไฟตรงที่ได้จะยังไม่

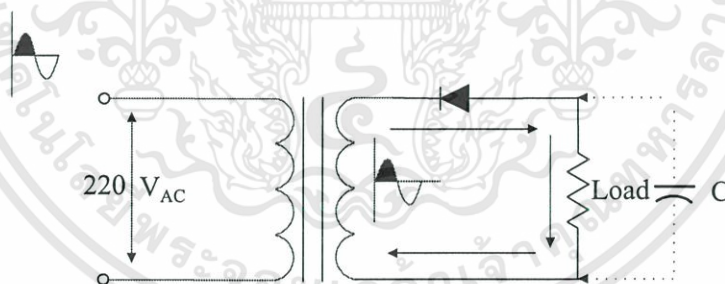
เรียบมีลักษณะเป็นพัลส์ที่เรียกว่าพัลส์ดี.ซี. (Pulse D.C) ในการใช้งานจะต้องทำการกรองให้เรียบ โดยใช้ตัวเก็บประจุทำการกรอง ก็จะทำให้แรงดันที่ได้เรียบขึ้นดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟตรงเมื่อใช้ตัวเก็บประจุกรองแรงดัน

จากรูปที่ 2.16 พัลส์ดี.ซี. ที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นจะเป็นซีกบวก ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์จะทำการประจุแรงดันในช่วงที่พัลส์ดี.ซี. มีค่าเพิ่มขึ้นและจะคายประจุในช่วงที่พัลส์ดี.ซี. มีค่าลดลงจะเป็นไปในลักษณะเช่นนี้เรื่อยๆ แรงดันดี.ซี. ที่ได้จะเรียบขึ้น ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ยังมีค่ามากแรงดันไฟตรงที่ได้ก็ยิ่งมีความเรียบขึ้น (ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ค่ามากเกินไปผลเสียกับไดโอด) แรงดันไฟตรงที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวเก็บประจุ จะประจุแรงดันสูงสุดของแรงดันพิกจึงทำให้แรงดันเพิ่มสูงขึ้น

### 1.2.2 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น

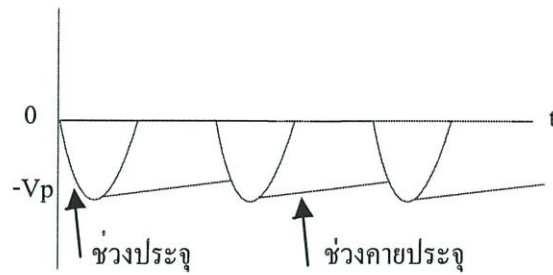


รูปที่ 2.17 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

เป็นการจัดวงจรไดโอดให้นำกระแสเฉพาะซีกลบของไฟสลับก็จะได้วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น จากรูปที่ 4 เมื่อขั้วบนของขดทุติยภูมิได้รับเฟสลบ ขั้วล่างเทียบศักย์ได้เฟสบวก จะทำให้ไดโอดได้รับไบอัสตรง ไดโอดสามารถนำกระแสได้ กระแสจะไหลจากขั้วล่างของหม้อแปลงผ่านโหลดเข้าทางขาแอนโอด ออกทางแคโทดครบวงจรที่ขั้วบนของหม้อแปลง ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ขั้วบนของโหลดมีศักย์เป็นลบขั้วล่างมีศักย์เป็นบวก

เมื่อขั้วบนของหม้อแปลงได้รับเฟสบวกขั้วล่างเทียบศักย์ได้เฟสลบ จะทำให้ไดโอดไม่สามารถนำกระแสได้ เพราะไดโอดได้รับไบอัสกลับ จึงหวนนี้จึงไม่มีแรงดันออกมาที่โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



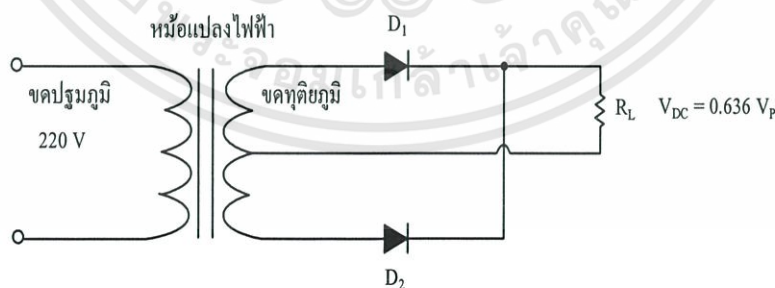
รูปที่ 2.18 แสดงรูปคลื่นเมื่อใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง

เมื่อต่อตัวเก็บประจุฟิลเตอร์เข้าไปในวงจร ตัวเก็บประจุก็จะทำหน้าที่ประจุแรงดันเอาไว้ในช่วงแรงดันที่มีค่าสูง และจะคายประจุในช่วงแรงดันที่มีค่าลดลง โดยเสริมรูปคลื่นที่ขาดหายให้เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน เป็นการทำให้แรงดันที่ไม่เรียบมีความเรียบยิ่งขึ้น การใช้วงจรเรียงกระแสแบบนี้จะได้ไฟกระแสตรงออกมาในลักษณะพัลส์ครึ่งคลื่นเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะเห็นว่าประสิทธิภาพต่ำ คือประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

## 2. วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full-Wave Rectifier)

### 2.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น จะสามารถเรียงแรงดันไฟสลับให้ออกเอาต์พุตได้ทั้งช่วงบวกและช่วงลบของแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้ามาที่อินพุตของวงจร โดยไม่มีส่วนของแรงดันไฟสลับถูกตัดทิ้งไป ลักษณะของวงจรจะใช้ไดโอด 2 ตัว ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟสลับเป็นสัญญาณไฟตรง โดยมีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีแท็ปกลาง (Center Tap) ทำหน้าที่แบ่งเฟสให้เกิดการต่างเฟสกัน 180 องศา ระหว่างสัญญาณที่ออกจากส่วนบนและส่วนล่างของขดทุติยภูมิของหม้อแปลงเพื่อให้ไดโอดทั้ง 2 ตัวสลับกันทำงาน ดังนั้นวงจรจึงสามารถจ่ายกระแสได้เรียบและสูงกว่าวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น



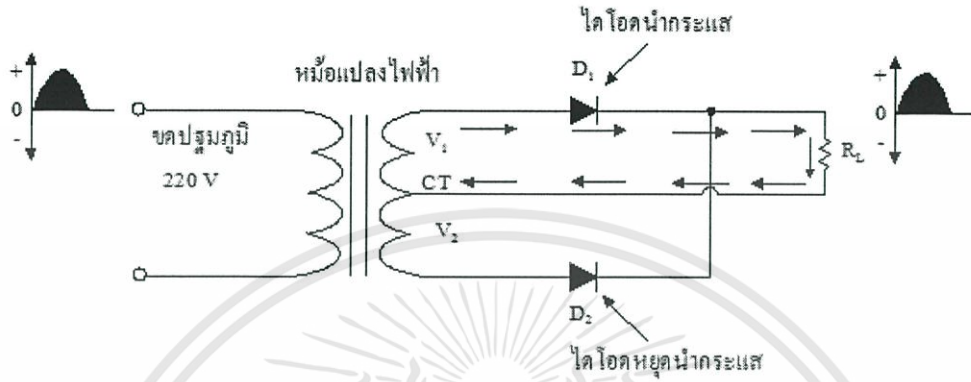
รูปที่ 2.19 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น

### 2.1.1 การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง

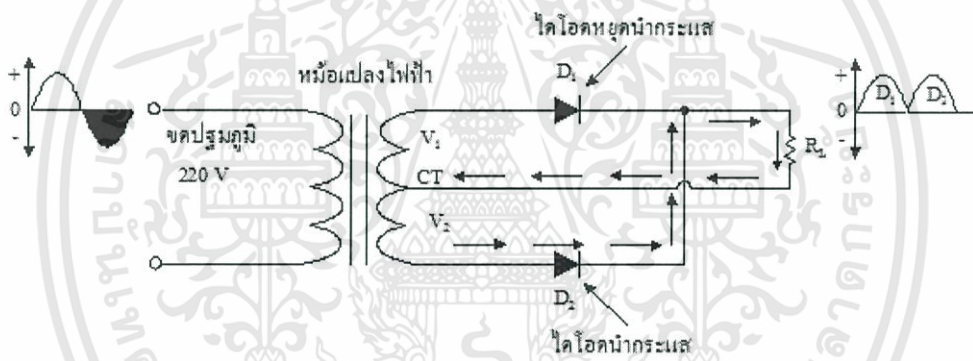
เมื่อมีแรงดันไฟสลับ  $V_N$  ป้อนเข้าขดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะเกิดแรงดันไฟสลับขึ้นที่ขั้วบนและขั้วล่างของขดทุติยภูมิที่แท็ปกลางของหม้อแปลงจะกำหนดให้มีแรงดัน 0 โวลต์ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันครึ่งหนึ่งจึงเกิดที่แท่งกลางกับขั้วด้านบนของหม้อแปลง และอีกครึ่งหนึ่งจะเกิดขึ้นที่แท่งกลางกับอีกขั้วด้านล่างของหม้อแปลง โดยระหว่างขั้วด้านบนและขั้วด้านล่างจะมีเฟสต่างกัน 180 องศา การทำงานของวงจรเมื่อขั้วบนของขดทุติยภูมิมีค่าแรงดันเป็นบวก ขั้วล่างมีแรงดันเป็นลบ ไดโอด  $D_1$  จะได้รับไบอัสตรง นำกระแสมีกระแสไหลผ่านไดโอดผ่านโหลด  $R_L$  ไปครบวงจรที่ขั้วแท่ง ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด  $R_L$  เป็นคลื่นรูปไซน์ครึ่งคลื่น



ก. แสดงการนำกระแสของไดโอด  $D_1$



ข. แสดงการนำกระแสของไดโอด  $D_2$

รูปที่ 2.20 แสดงการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

ในช่วงเวลาต่อมา ขั้วบนของขดทุติยภูมิมีค่าแรงดันเป็นลบ ขั้วล่างมีค่าแรงดันเป็นบวก ไดโอด  $D_2$  จะได้รับไบอัสกลับ ไดโอด  $D_1$  ได้รับไบอัสตรงเกิดการนำกระแส มีกระแสไหลผ่านไดโอดผ่านโหลด  $R_L$  ไปครบวงจรที่ขั้วแท่งทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด  $R_L$  เป็นคลื่นรูปไซน์ครึ่งคลื่นด้านบวกปรากฏที่เอาต์พุต แรงดันไฟตรงเฉลี่ยที่ได้สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$V_{DC} = 0.636 V_p \quad (2.5)$$

แต่แรงดัน  $V_p$  เป็นแรงดันค่ายอดสูงสุดสามารถคำนวณหาได้จากสูตร

$$V_p = 1.414 V_{AC} \quad (2.6)$$

หรือจะคำนวณหาค่าแรงดันไฟตรงได้จากสูตร

$$V_{DC} = 0.9 V_{AC} \quad (2.7)$$

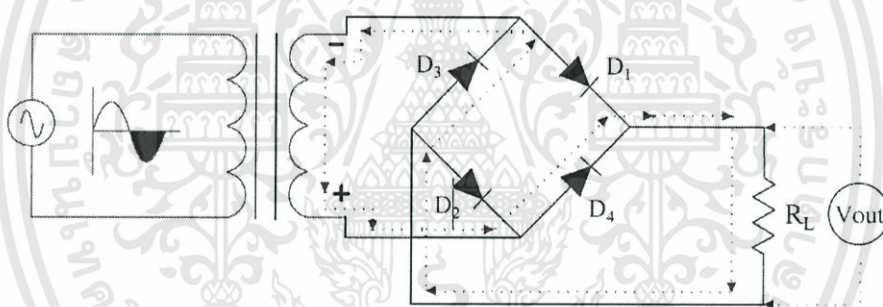
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier)

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เป็นวงจรที่แก้ไขจุดอ่อนของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงที่มีเซ็นเตอร์แท็ปซึ่งมีราคาแพง ไดโอดจะนำกระแสครั้งละตัวทำให้ทำงานหนัก ส่วนวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงเซ็นเตอร์แท็ป ทำให้ประหยัดขึ้นและไดโอดจะนำกระแสครั้งละ 2 ตัว ทำให้ไดโอดทนแรงดันสูงขึ้น เอาท์พุทของวงจร ตลอดจนรูปร่างจะมีลักษณะเหมือนกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นทุกอย่าง

### 1. ลักษณะวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

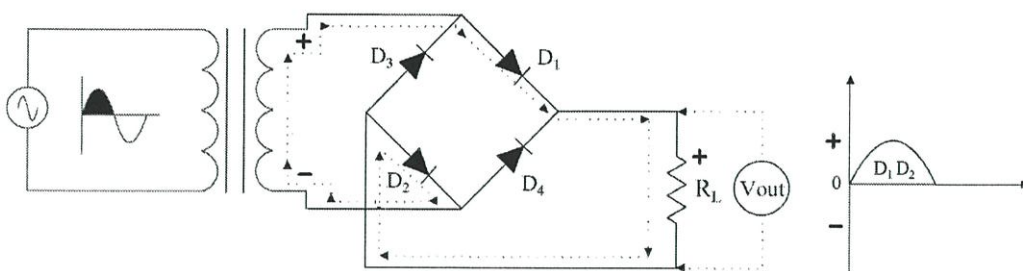
วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์มีลักษณะเหมือนวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น เพราะแรงดันเอาท์พุทที่ได้เป็นแบบเต็มคลื่น ข้อแตกต่างระหว่างการเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และแบบเต็มคลื่นธรรมดา ต่างกันตรงการต่อวงจรไดโอด แบบเต็มคลื่นจะใช้ไดโอด 2 ตัว แบบบริดจ์จะใช้ไดโอด 4 ตัว และหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ก็แตกต่างกัน แบบเต็มคลื่นธรรมดาใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง (Center Tap, CT) มี 3 ขั้ว แบบบริดจ์ใช้หม้อแปลง 2 ขั้วหรือ 3 ขั้วก็ได้ แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.21 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

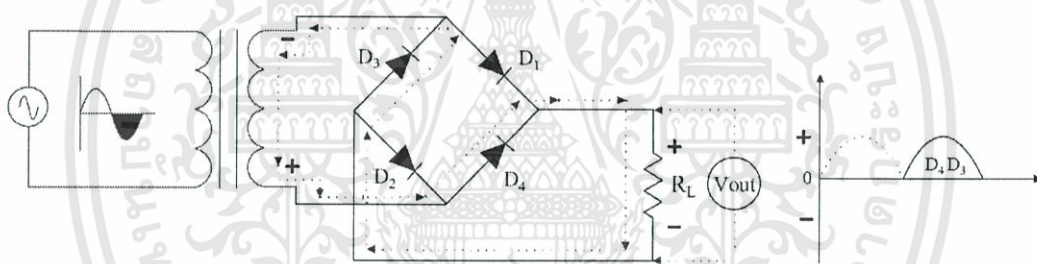
### 2. การทำงานวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

การทำงานของวงจร ไดโอดจะผลัดกันนำกระแสครั้งละ 2 ตัว โดยเมื่อไซเคิลบวกของแรงดันไฟสลับ ( $V_m$ ) ปรากฏที่ด้านบนของขดทุติยภูมิของหม้อแปลงและด้านล่างจะเป็นลบ จะทำให้ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  ได้รับไบอัสตรงจะมีกระแสไหลผ่านไดโอด  $D_1$  ผ่านโหลด  $R_L$  ผ่านไดโอด  $D_2$  ครบวงจรที่หม้อแปลงด้านล่าง มีแรงดันตกคร่อมโหลด  $R_L$  ด้านบนเป็นบวก ด้านล่างเป็นลบ ได้แรงดันไฟช่วงบวกออกทางเอาท์พุท

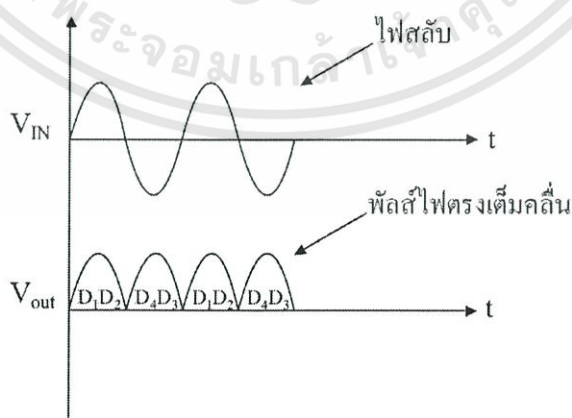


รูปที่ 2.22 ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ )

ในช่วงเวลาต่อมาไซเคิลลบของแรงดันไฟสลับ ( $V_{in}$ ) ปรากฏที่ด้านบนของขดทุติยภูมิของหม้อแปลง และด้านล่าง เป็นบวก ดังแสดงในรูปที่ 3 ในช่วงเวลานี้ ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  จะได้รับไบอัสกลับแต่ไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  จะได้รับไบอัสตรง ทำให้มีกระแสไหลผ่านไดโอด  $D_4$  ผ่านโหลด  $R_L$  และผ่านไดโอด  $D_3$  ครบวงจรที่หม้อแปลงด้านบน มีแรงดันตกคร่อมโหลด  $R_L$  ด้านบนเป็นบวกด้านล่างเป็นลบ ได้แรงดันไฟช่วงบวกออกทางเอาต์พุตทำให้ได้คลื่นไฟตรงรวมกันเต็มคลื่นดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.23 ไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ )

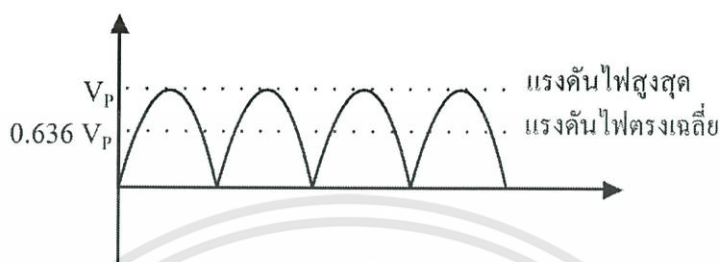


รูปที่ 2.24 รูปคลื่น  $V_{out}$  เปรียบเทียบกับ  $V_{in}$  ของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. แรงดันเอาต์พุทของวงจร

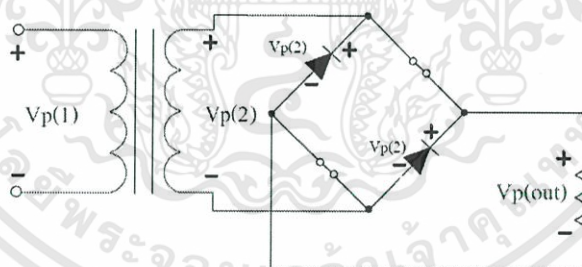
วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นทั้งแบบมีแท็ปกลางและแบบบริดจ์จะให้แรงดันเอาต์พุททุกๆ ครึ่งรอบของแรงดันไฟสลับที่เข้ามาทั้งซีกบวกและซีกลบ ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุทจึงมีค่าเป็น 2 เท่าของแรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ค่าแรงดันเอาต์พุทมีค่าเป็น 0.636 เท่า ของแรงดันไฟสูงสุด ดังสมการ  $(2.53)V_{DC} = 0.636 V_p$



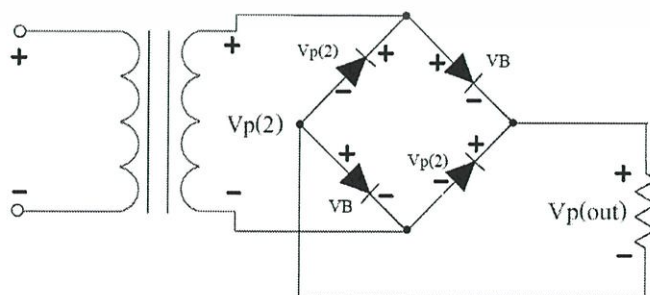
รูปที่ 2.25 แสดงค่าแรงดันไฟตรงกับค่าแรงดันไฟสูงสุด  $V_p$  ของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

### 4. แรงดันสูงสุดด้านกลับ (Peak Inverse Voltage)

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์จะมีค่าแรงดันสูงสุดด้านกลับ (PIV) น้อยกว่าวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงมีแท็ปครึ่งหนึ่ง เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.26(ก) เมื่อไดโอด  $D_1, D_2$  นำกระแส ไดโอด  $D_1, D_2$  จะทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ปิดวงจร (ถ้าไม่คิดแรงดันตกคร่อมไดโอด) จะเห็นว่าแรงดันสูงสุดด้านกลับที่ตกคร่อมไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  ที่ได้รับไบอัสกลับจะมีค่าเท่ากับแรงดันพีก ( $V_p$ )



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.26 แสดงค่าแรงดันสูงสุดด้านกลับที่เกิดกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะไดโอด  $D_1$  ,  $D_2$  นำกระแส ( $V_B$ ) ดังรูปที่ 2.26 (ข) จะเห็นว่าแรงดัน PIV ที่เกิดกับไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  จะหาได้จากสูตร

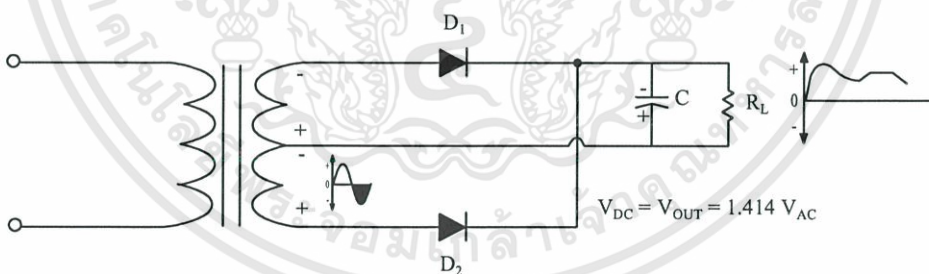
$$PIV = V_{P(out)} + V_B \quad (2.8)$$

เช่นเดียวกันถ้าหากว่าต้องการใช้ไฟตรงที่เรียงกระแสออกมาเรียบขึ้นเราก็ต้องใช้ตัวเก็บประจุค่ามากๆ มาเป็นวงจรกรองกระแส ยิ่งตัวเก็บประจุมีค่ามากการคายประจุก็ต้องใช้เวลานานขึ้น จึงทำให้ไฟกระแสตรงที่ออกมาเรียบที่สุด

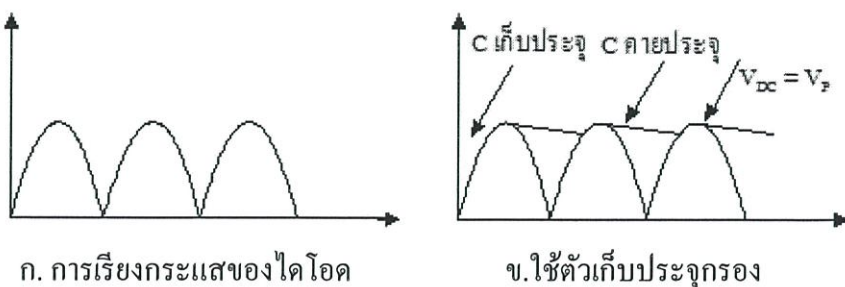
### 2.3 วงจรกรองแบบใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor Filter)

แรงดันได้จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นยังมีระลอกคลื่นปนอยู่ปริมาณสูง ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน จะต้องนำแรงดันนี้ไปผ่านวงจรกรองก่อนที่จะนำไปใช้งาน วงจรกรองแบบที่ง่ายและนิยมที่สุดก็คือ วงจรกรองแบบใช้ตัวเก็บประจุ โดยใช้ตัวเก็บประจุ  $C$  ต่อขนานกับตัวต้านทานโหลด  $R_L$  ตัวเก็บประจุ  $C$  จะทำหน้าที่เก็บประจุไว้ในช่วงเวลาไดโอดนำกระแสและทำหน้าที่คายประจุผ่านตัวต้านทานโหลดในช่วงเวลาที่ไดโอดไม่นำกระแส การทำงานของวงจรกรองจะทำการกรองแรงดันไฟตรงที่ยังไม่เรียบให้มีความราบเรียบยิ่งขึ้น สามารถนำไปใช้งานกับวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ อีกทั้งแรงดันไฟตรงที่ได้เมื่อผ่านการกรองแรงดันแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมโดยคำนวณหาได้จากสูตร

$$V_{DC} = V_p = 1.414 \times V_{AC} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.27 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นใช้ตัวเก็บประจุกรอง

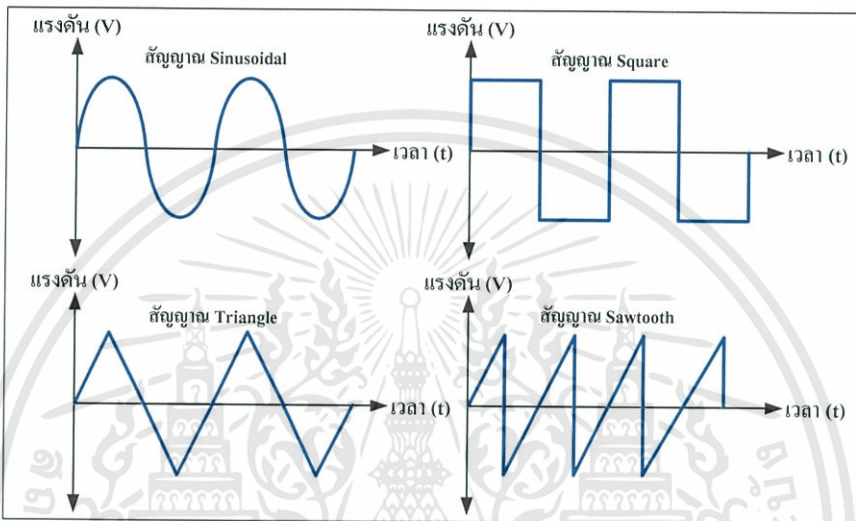


รูปที่ 2.28 รูปสัญญาณวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นก่อนและหลังใส่ตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator)

เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาออกมาซ้ำๆ กัน ซึ่งลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมานั้นเราจะเรียกว่า รูปคลื่น โดยส่วนใหญ่จะเป็น sine wave (Sinusoidal wave) คลื่นรูปสี่เหลี่ยม(Square)และสามเหลี่ยม(Triangle)เป็นต้นครับ ดังแสดงในรูปที่ 2.28ออสซิลเลเตอร์ (Oscillators)มีแหล่งจ่ายไฟเป็นกระแสตรง (DC) มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณดังกล่าว



รูปที่ 2.29 ลักษณะของรูปสัญญาณที่จะได้จากการออกแบบวงจรผลิตความถี่

โดยหน้าที่ของวงจรออสซิลเลเตอร์นั้นก็สามารที่จะนำไปใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ มากครับ ยกตัวอย่างเช่น ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าไปใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้ เป็นวงจรที่สร้างสัญญาณ โดยนำสัญญาณที่ได้ ออกมานี้ ใช้เป็นตัวกำหนดช่วงเวลาที่ถูกต้องแน่นอนแก่วงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นวงจรที่สร้างสัญญาณ โดยสร้างความถี่ขึ้นมา เพื่อนำไปใช้งานในย่านความถี่ที่เราต้องการใช้งานต่อไปนั่นเอง

วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillators)แบ่งตามลักษณะของความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต ได้แก่

1. Oscillator เสียงที่มนุษย์ได้ยิน (audio frequency)ผลิตความถี่อยู่ในช่วงเสียงประมาณ 16-20 kHz.
2. Oscillator RF ผลิตสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ (RF) ช่วงประมาณ 100 kHz ถึง 100 GHz.
3. Oscillator ความถี่ต่ำ (LFO) สร้างสัญญาณความถี่ต่ำกว่า 20 Hz ~ คำนี้มักจะใช้ในด้าน การสังเคราะห์เสียงจะแตกต่างจาก oscillator เสียง
4. Oscillators เพื่อผลิตเอาต์พุต AC พลังงานสูงจากไฟกระแสตรงมักจะเรียกว่าอินเวอร์เตอร์
5. Oscillator อิเล็กทรอนิกส์ แบ่งเป็นสองประเภทหลักคือ oscillator เชิงเส้นหรือฮาร์โมนิก และ oscillator ไม่เชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 Oscillator เชิงเส้น

Oscillator แบบฮาร์โมนิกหรือเชิงเส้นผลิตเอาต์พุตคลื่นไซน์ มีสองประเภท ได้แก่

#### 2.4.1.1 Feedback Oscillator

รูปแบบที่พบบ่อยที่สุดของ oscillator เชิงเส้นคือวงจรขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เช่นแอมป์ทรานซิสเตอร์หรือออปแอมป์ที่เชื่อมต่อกับ feedback loop ที่มีเอาต์พุตป้อนกลับเป็นอินพุตโดยผ่านทางตัวกรองเฉพาะความถี่เพื่อให้เป็น positive feedback เมื่อเริ่มจ่ายไฟไปให้วงจรขยายสัญญาณ สัญญาณรบกวนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะเริ่มให้วงจรออสซิลเลเตอร์ทำงาน สัญญาณรบกวนดังกล่าวเดินทางเป็นวงรอบในวงจรมีการขยายกำลังและถูกกรองเฉพาะความถี่ที่ต้องการออกมาเป็นคลื่นไซน์ที่มีความถี่เดียว

วงจร feedback สามารถจำแนกตามชนิดของตัวกรองเลือกความถี่ ดังนี้

1. วงจร RC, ตัวกรองประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ RC oscillator ส่วนใหญ่จะใช้ในการสร้างความถี่ต่ำเช่นในช่วงเสียงออดิโอ ประเภททั่วไปของวงจร RC ได้แก่ Phase-shifted Oscillator และ Wien Bridge Oscillator
2. วงจร LC เป็นวงจรกรองแบบปรับความถี่ได้ ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) เชื่อมต่อกันได้. ประจุไฟฟ้าจะไหลไปมาระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นวงจรกรองปรับความถี่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าที่จะสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์(การสั่นพ้อง, เรโซแนนซ์, ปรากฏการณ์เมื่อระบบถูกทำให้สั่นด้วยความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบเองแล้ว การสั่นนั้นจะสั่นได้รุนแรงหรือมีช่วงกว้างของการสั่นกว้างมากที่สุด (พจนานุกรมศัพท์ สสวท) ของ L และ C นั้น มีการสูญเสียเล็กน้อยในวงจรดังกล่าว แต่วงจรขยายสัญญาณสามารถชดเชยการสูญเสียเหล่านั้นได้และจ่ายพลังงานเอาต์พุตเป็นสัญญาณออกมา oscillators LC มักจะสร้างความถี่วิทยุ ใช้กับงานที่ต้องมีการปรับความถี่เช่นในเครื่องสร้างสัญญาณ, ในเครื่องส่งสัญญาณวิทยุและการปรับหาสถานีในเครื่องรับวิทยุ โดยทั่วไป วงจร LC จะ ได้แก่ Hartley, Colpitts and Clapp
3. วงจรคริสตัล ใช้ผลึกคริสตัลในการสร้างความถี่ คริสตัลจะสั่นด้วยแรงกล ทำตัวเหมือนตัวเรโซเนเตอร์ ความถี่ของการสั่นสะท้อนกำหนดความถี่ของสัญญาณที่ผลิต คริสตัลมีค่า Q-factor สูงมากและความมั่นคงด้านอุณหภูมิดีกว่า LC หรือ RC oscillators จึงถูกนำมาใช้เพื่อรักษาเสถียรภาพของความถี่ของเครื่องส่งสัญญาณวิทยุมากที่สุดและเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในคอมพิวเตอร์และนาฬิกาควอตซ์ oscillators คริสตัลมักจะใช้วงจรเดียวกับ oscillators LC แต่ใช้คริสตัลแทนที่วงจรการปรับความถี่; วงจรเพียร์ซเป็นที่นิยมใช้ ผลึกควอตซ์มีข้อจำกัดโดยทั่วไปที่ความถี่ 30 MHz หรือต่ำกว่า คลื่นพื้นผิว (SAW) เป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งของ piezoelectric resonator ทำให้ได้ความถี่ที่สูงขึ้นมาก ออสซิลเลเตอร์ดังกล่าวจะใช้ในการใช้งานเฉพาะที่จำเป็นต้องมีการอ้างอิงความถี่สูงเช่นในโทรศัพท์มือถือ

#### 2.4.1.2 Negative Resistance Oscillator

นอกจากนี้ feedback oscillator ที่อธิบายไว้ข้างต้นซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์และออปแอมป์แล้ว Oscillator แบบเชิงเส้นยังมีอุปกรณ์ที่มีความต้านทานเชิงลบ เช่น หลอดแมกนีตรอนทันเนลไดโอด และกันนำไดโอด อีกด้วย Oscillators ด้านทานเชิงลบมักจะใช้ความถี่สูงในช่วงไมโครเวฟหรือสูงกว่า เพราะที่ความถี่สูงขนาดนี้ feedback oscillator ทำงานได้ไม่ดีเนื่องจากเฟสขีฟมากเกินไปในเส้นทาง feedback

ใน oscillators ด้านทานเชิงลบวงจรเรโซแนนซ์เช่นวงจร LC คริสตัลหรือ cavity resonator มีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่มีความต้านทานที่หักล้างกันเอง วงจรเรโซแนนซ์โดยมันตัวเองเกือบจะเป็น oscillator อยู่แล้ว โดยที่มันสามารถเก็บพลังงานในรูปแบบของการแกว่งทางอิเล็กทรอนิกส์ถ้ากระตุ้นมัน แต่เพราะมีความต้านทานและความสูญเสียภายในอื่นๆ ทำให้การแกว่งลดลงเป็นศูนย์ ความต้านทานเชิงลบของอุปกรณ์ได้หักล้างการต้านทาน(เชิงบวก)ภายในตัวเรโซเนเตอร์ เป็นผลให้ลดการลดทอนและสร้างการสั่นอย่างต่อเนื่องที่เกิดขึ้นเองที่ความถี่เรโซแนนซ์ของมันเอง

Oscillator แบบความต้านทานเชิงลบไม่จำกัดเฉพาะอุปกรณ์พอร์ตเดียวเหมือนไดโอดวงจร feedback oscillator ที่ใช้อุปกรณ์ขยายสองพอร์ตเช่นทรานซิสเตอร์และหลอดก็มีความต้านทานเชิงลบเช่นกัน ในช่วงความถี่สูงทรานซิสเตอร์และ FETS ไม่ต้องการการ feedback แต่เมื่อใส่โหลดบางอย่างเข้าที่พอร์ตหนึ่งจะทำให้เกิดความไม่แน่นอนที่อีกพอร์ตหนึ่ง ทำให้เกิดความต้านทานเชิงลบป้อนกลับภายใน เกิดการสั่นขึ้น ดังนั้น Oscillators ความถี่สูงโดยทั่วไปได้รับการออกแบบโดยใช้เทคนิคความต้านทานเชิงลบ

#### 2.4.2 Oscillator ไม่เชิงเส้น

oscillator แบบไม่เชิงเส้นสร้างรูปคลื่นที่ไม่ใช่ไซน์ เช่น คลื่นสี่เหลี่ยม, คลื่นฟันเลื่อยหรือสามเหลี่ยม. วงจรประกอบด้วยอุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน (เช่นตัวเก็บประจุหรือมีบั้งที่เป็นคอยล์) และวงจรสวิทช์ที่ไม่เชิงเส้น (เช่นวงจร latch, Schmitt trigger และอุปกรณ์ความต้านทานลบ) ที่ค่อยๆเก็บและระบายประจุไฟฟ้าเป็นระยะ ๆ จึงทำให้ได้รูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนระดับอย่างกระทันหัน

Oscillators ไม่เชิงเส้นแบบคลื่นสี่เหลี่ยม ถูกใช้ในการให้สัญญาณนาฬิกาสำหรับวงจรลอจิกลำดับเช่นตัวตั้งเวลาและตัวนับ แม้ว่า oscillators คริสตัล จะเป็นที่นิยมใช้เพราะมีเสถียรภาพสูงกว่า oscillator คลื่นรูปสามเหลี่ยมหรือแบบฟันเลื่อยถูกใช้ในวงจร timebase ที่สร้างสัญญาณสแกนแนวนอนสำหรับจอภาพของ Oscilloscope และโทรทัศน์แบบแอนะล็อก ในเครื่องกำเนิดฟังก์ชันคลื่นสามเหลี่ยมนี้แล้วอาจจะแปรรูปต่อไปเป็นคลื่นที่ใกล้เคียงกับคลื่นไซน์

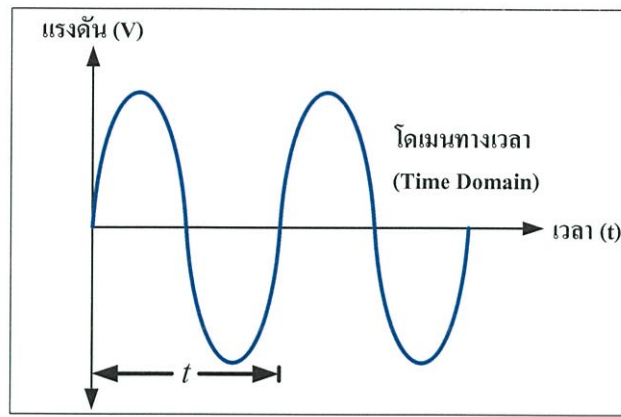
Oscillators แบบวงแหวนถูกสร้างขึ้นมาจากวงแหวนของขั้นตอนที่ใช้งานที่ถูกระบุช่วงเวลา โดยทั่วไปวงแหวนมีเลขที่ของขั้นตอนกลับหัว เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่มีเสถียรภาพเพียงสถานะเดียว สำหรับแรงดันไฟฟ้าแหวนภายใน แต่การเปลี่ยนแปลงเพียงครั้งเดียวจะแพร่กระจายไปรอบ ๆ แหวนไม่รู้จบ

วงจร oscillator แบบไม่เชิงเส้นรวมถึง

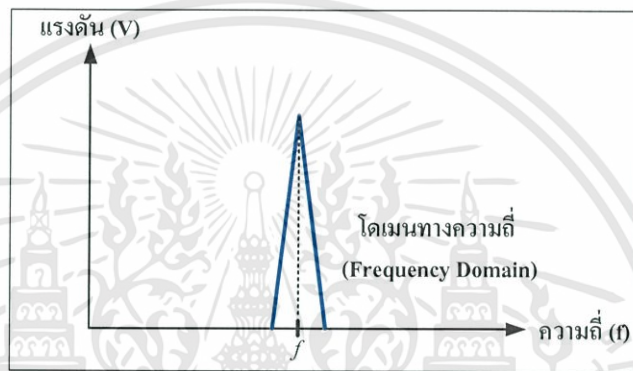
1. Multivibrator
2. ring oscillator
3. delay line oscillator
4. Royer oscillator
5. rotary traveling wave oscillator

และในส่วนของการพิจารณาว่าวงจรผลิตความถี่นั้นมีลักษณะของวงจรที่ดีหรือไม่นั้นก็สามารรถที่จะพิจารณาได้ดังนี้

1. วงจรผลิตความถี่ที่ดีนั้นจะต้องมีความเพี้ยนของรูปคลื่นต่ำ หรือเรียกว่า (Low Distortion) ก็หมายความว่า ถ้าเราสร้างวงจรผลิตความถี่ ที่เป็นวงจรผลิตความถี่เป็นสัญญาณ Sinusoidal ดังนั้นผลตอบสนองของวงจรนี้ก็จะต้องผลิตความถี่ที่เป็นสัญญาณ Sinusoidal ออกมา
  2. วงจรผลิตความถี่ที่ดีนั้นจะต้องมีเสถียรภาพทางความถี่ หรือเรียกว่า (Frequency Stability) ก็หมายความว่า ถ้าเราสร้างวงจรผลิตความถี่ ที่เป็นวงจรผลิตความถี่ที่ความถี่เท่ากับ ดังนั้นผลตอบสนองของวงจรนี้ก็จะต้องผลิตความถี่ที่ความถี่เท่ากับ 1kHz ออกมา
  3. วงจรผลิตความถี่ที่ดีนั้นจะต้องมีเสถียรภาพทางขนาดของสัญญาณ หรือเรียกว่า (Amplitude Stability) ก็หมายความว่า ถ้าเราสร้างวงจรผลิตความถี่ ซึ่งผลตอบสนองของวงจรที่ได้ออกมานั้นจะต้องมีขนาดของสัญญาณหรือขนาดของแรงดันที่คงที่ตลอดเวลา
- การวิเคราะห์ผลตอบสนองของวงจรผลิตความถี่นั้น จะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ การวิเคราะห์ผลตอบสนองของวงจรผลิตความถี่ในแบบโดเมนทางเวลา หรือเรียกว่า (Time Domain) ดังแสดงในรูปที่ 2.28 และอีกแบบหนึ่งก็คือ การวิเคราะห์ผลตอบสนองของวงจรผลิตความถี่ในแบบโดเมนทางความถี่ หรือเรียกว่า (Frequency Domain) ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ลักษณะผลตอบสนองของวงจรผลิตความถี่ในแบบ โดเมนทางเวลา



รูปที่ 2.31 ลักษณะผลตอบสนองของวงจรผลิตความถี่ในแบบ โดเมนทางความถี่

ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลตอบสนองของวงจรผลิตความถี่ ทั้ง 2 แบบที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.30 และในรูปที่ 2.31 นั้น ก็จะเห็นว่าเป็นการดูผลตอบสนองของวงจรผลิตความถี่ ในลักษณะของสัญญาณว่ามีลักษณะของสัญญาณเป็นสัญญาณแบบใด มีค่าความถี่ที่ได้ออกมามีค่าเท่าใด มีค่าแรงดันที่ได้ออกมามีค่าเท่าใดและมีค่าแรงดันที่คงที่หรือไม่นั่นเอง

ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ก็สามารถเขียนเป็นสมการพื้นฐานในการคำนวณหาค่าเวลา ( $t$ ) และคำนวณหาค่าความถี่ ( $f$ ) ได้ดังสมการ

$$t = \frac{1}{f} \quad (2.10)$$

$$f = \frac{1}{t} \quad (2.11)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.12)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.13)$$

เมื่อกำหนดให้  $t$  คือ คาบเวลา มีหน่วยเป็นวินาที

$f$  คือ ความถี่ มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ทฤษฎี Highly Resonance Wireless Power Transfer

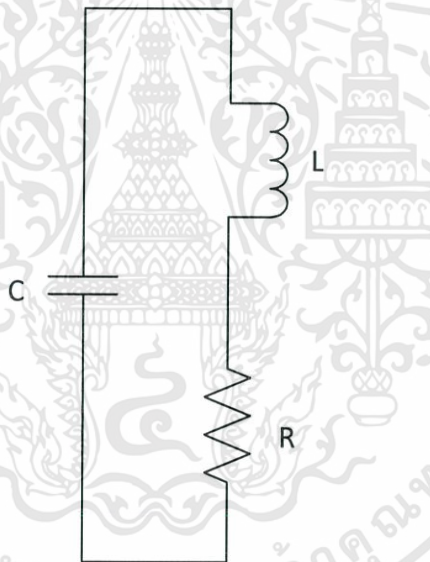
### 2.5.1 การเรโซแนนซ์ของวงจรเดียว

ปรากฏการณ์กำทอน(เรโซแนนซ์)มีอยู่ในหลายรูปแบบ ปกติจะเป็นการถ่ายทอดพลังงาน เช่น กรณีลูกตุ้มเชิงกลจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์ การเกิดเรโซแนนซ์จะเกิดในลักษณะที่มีการเพิ่มขึ้นของพลังงานมาก ในขณะที่พลังงานที่ให้เข้าไปมีค่าเล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของพลังงานจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการให้พลังงานมีค่ามากกว่าอัตราการสูญเสียพลังงานของระบบ

ในวงจร RLC วงจรเดี่ยวดังรูปที่ 2.31 คุณภาพของการเรโซแนนซ์จะเกี่ยวข้องกับตัวแปรพื้นฐานเพียงสองตัวคือ ค่าความถี่เชิงมุมเรโซแนนซ์ ( $\omega_0$ ) และอัตราการสูญเสีย ( $\Gamma$ ) ซึ่งอัตราส่วนของตัวแปรสองตัวนี้จะเรียกว่าแฟกเตอร์คุณภาพ คือ

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Gamma}$$

ซึ่ง  $Q$  นี้จะเป็นตัวที่บอกว่าการเก็บพลังงานเป็นไปได้ดีมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 2.32 วงจร RLC

ในวงจรนี้ค่าความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่า

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

และ

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Gamma} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (2.14)$$

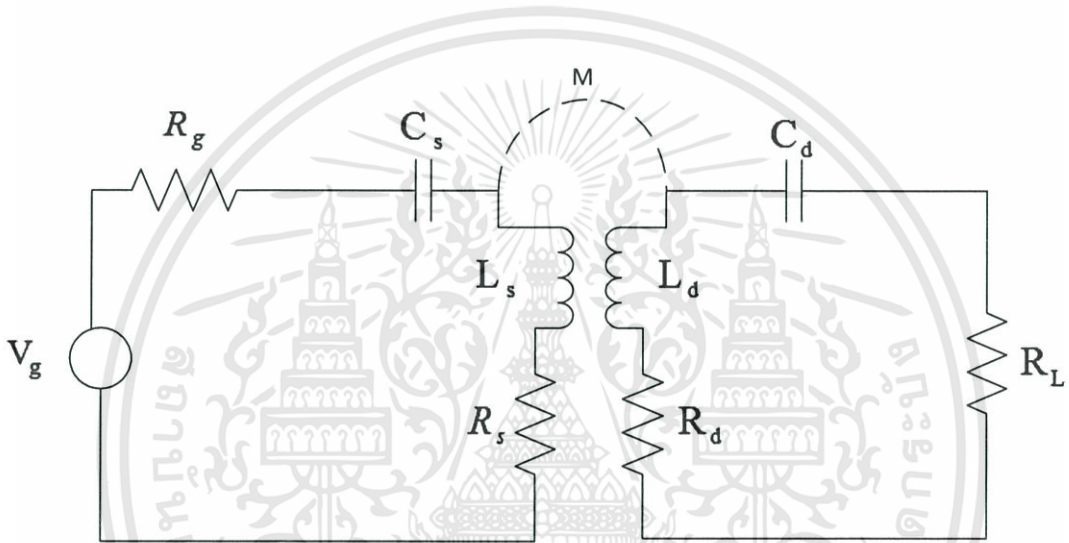
จากสมการที่ 2.14 จะเห็นว่า ความถี่ยิ่งสูง ค่าอัตราสูญเสียยิ่งน้อยจะเป็นการเพิ่มขึ้นของแฟกเตอร์คุณภาพ ( $Q$  สูง) ค่า  $L$  มาก ค่า  $R$  น้อย ก็จะเป็นเช่นเดียวกัน (เทอมที่สอง) หรือ ความถี่สูง ค่าความเหนี่ยวนำมากและค่า  $R$  น้อย ก็จะทำให้ผลที่มีค่า  $Q$  สูงเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบการถ่ายทอดกำลังไร้สายแบบเรโซแนนซ์สูง ระบบจะต้องเป็นแบบแฟกเตอร์ Q มีค่าสูง เพื่อที่จะทำให้ประสิทธิภาพของการถ่ายเทกำลังงานงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.5.2 ตัวกำทอนคู่

ถ้าตัวกำทอนถูกวางไว้ใกล้กัน ก็จะเกิดความเกี่ยวพันกัน (Coupled) ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานตัวกำทอนทั้งสอง ซึ่งประสิทธิภาพของการถ่ายเทพลังงานก็จะขึ้นกับตัวแปรสำคัญของแต่ละตัว ซึ่งจะรวมทั้งค่าอัตราการคัปปลิง (energy coupling rate,  $K_0$ ) ระหว่างตัวกำทอนทั้งคู่ ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.33 วงจรที่เกิดการคัปปลิง

ในที่นี้แหล่งกำเนิดสัญญาณไซน์มีค่าความต่างศักย์  $V_g$  และมีความถี่  $\omega$  โดยมีค่าความต้านทาน  $R_g$  ส่วนตัวกำทอนที่ 1 และ 2 มีค่าความเหนี่ยวนำ  $L_s$  และ  $L_d$  ตามลำดับ โดยการเกี่ยวพันกันผ่านค่า mutual inductance ( $M$ )  $= k \sqrt{L_s L_d}$  ทั้งนี้  $R_s$  และ  $R_d$  เป็นค่าตัวต้านทานของตัวกำทอนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (ซึ่งคิดผลจากการสูญเสียโอห์มและการแผ่รังสีแล้ว) ส่วนค่าความต้านทานของโหลดคือ  $R_L$  การวิเคราะห์วงจรจะพบว่า กำลังที่จะจ่ายให้กับ โทจท์หารด้วย กำลังที่มากที่สุดที่ให้เข้าไป ณ ค่าความถี่เรโซแนนซ์  $\omega$  จะมีค่า

$$\frac{P_L}{P_{g,\max}} = \frac{4 \cdot U^2 \cdot \frac{R_g}{R_s} \cdot \frac{R_L}{R_d}}{\left[ \left( 1 + \frac{R_g}{R_s} \right) \left( 1 + \frac{R_L}{R_d} \right) + U^2 \right]} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$U = \frac{\omega M}{\sqrt{R_s R_d}} = \frac{K_0}{\sqrt{\Gamma_s \Gamma_d}} = K \sqrt{Q_s Q_d} \quad (2.16)$$

ซึ่ง  $U$  จะเรียกว่าเป็น figure-of-merit ของระบบ

เราสามารถที่จะเลือกแหล่งกำเนิดและค่าความต้านทานโหลด เพื่อให้เกิดการทำงานที่ดีที่สุดได้ และถ้าเราเลือก

$$\frac{R_g}{R_s} = \frac{R_L}{R_d} = \sqrt{1 + U^2} \quad (2.17)$$

ซึ่งจะทำให้ได้ทันทีว่า

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{U^2}{\left(1 + \sqrt{1 + U^2}\right)^2} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\eta_{\text{opt}}$  คือ ค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

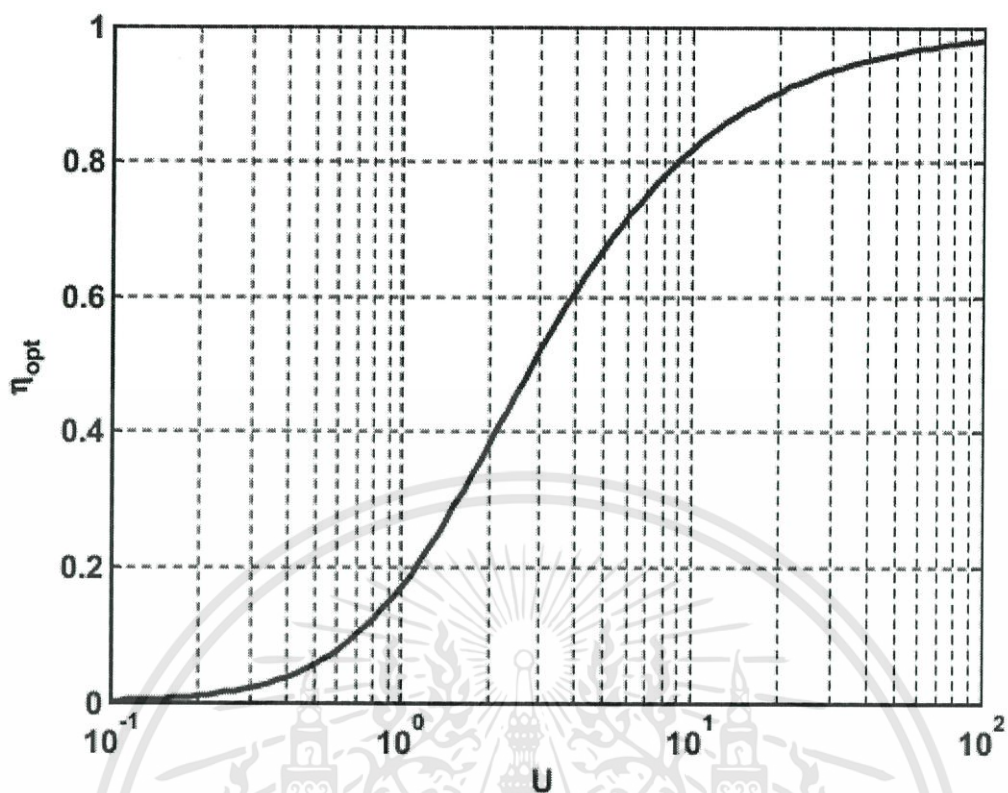
พิจารณาการสูญเสียที่เกิดที่ตัวกำหนดที่ 2 สามารถที่จะพิจารณาได้ว่าเกิดจาก  $\Gamma_d$  คืออัตราการสูญเสียที่ไม่มีโหลด รวมกับอัตราการสูญเสียที่เกิดกับโหลดนั้นคือ

$$\Gamma'_d = \Gamma_d + \Gamma_w \quad (2.19)$$

นั่นคือกำลังถ่ายทอจะสูงสุดเมื่อ

$$\frac{\Gamma_w}{\Gamma_d} = \sqrt{\left[1 + \frac{K_0^2}{\Gamma_s \Gamma_d}\right]} = \sqrt{1 + K^2 Q_s Q_d} = \sqrt{1 + U^2} \quad (2.20)$$

จากรูปที่ 2.33 จะเห็นว่าประสิทธิภาพสูงจะเกิดขึ้นเมื่อค่า  $U$  มีค่าสูงๆนั่นเอง



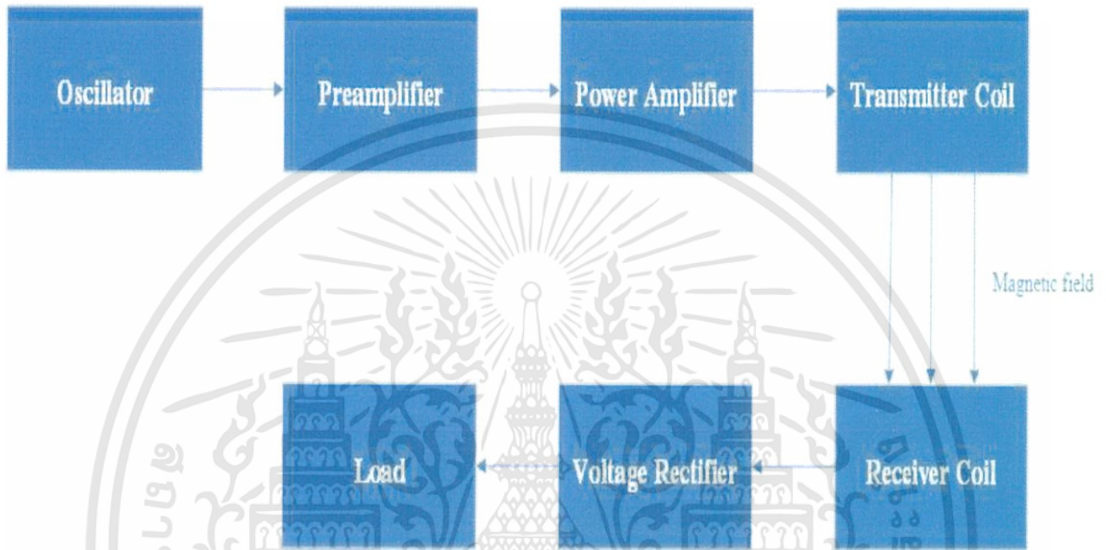
รูปที่ 2.34 ประสิทธิภาพมากที่สุด ( $\eta_{opt}$ ) เป็นฟังก์ชันกับ  $U$  (figure-of-merit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษ เรื่องการศึกษาการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย จากการศึกษาการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สายจึงได้ทำการออกแบบระบบได้ดังรูปที่ 3.1

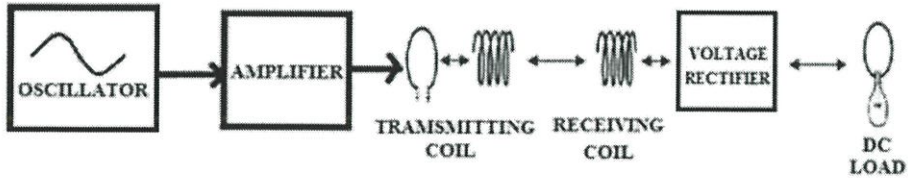


รูปที่ 3.1 แสดงหลักการทำงานของการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สาย

### 3.1 ศึกษาหลักการเหนี่ยวนำของขดลวด

จากการศึกษาเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหรือฟลักซ์แม่เหล็กรอบลวดตัวนำนั้น ในทางกลับกันฟลักซ์แม่เหล็กก็จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งความคิดนี้ Michael Faraday นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษได้ค้นพบและสรุปผลว่า “ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ณ บริเวณใด การเปลี่ยนฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในตัวนำที่วางอยู่ในบริเวณนั้น” เรียกผลที่เกิดขึ้นว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction) และเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากวิธีการนี้ว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 3.2 ศึกษาหลักการการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สายโดยการใช้ขดลวดเป็นตัวส่ง และตัวรับพลังงาน



รูปที่ 3.2 ระบบการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สายโดยใช้ขดลวดเป็นตัวรับ-ส่งพลังงาน

### 3.3 การสร้างขดลวด

ในการสร้างขดลวดตัวส่ง (Transmitting Coil) และขดลวดตัวรับ (Receiving Coil) โดยนำท่อทองแดงมาพันรอบภาชนะพลาสติกที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยใช้แกนของขดลวดเป็นอากาศ ในที่นี้อ้างอิงรูปแบบการสร้างขดลวดตามโครงการพิเศษ (Wireless Power Transmission Using Magnetic Resonance) ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

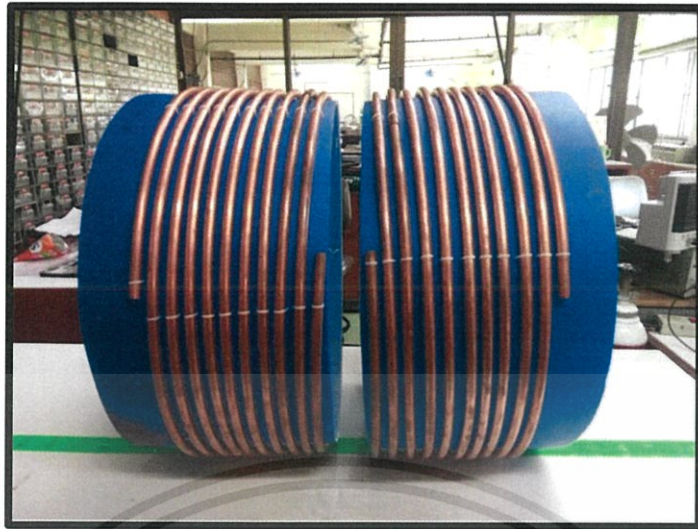
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าองค์ประกอบของการสร้างขดลวด

	Transmitting Coil	Receiving Coil
จำนวนรอบ	10	10
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทองแดง	1.30 cm	1.30 cm
เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด	56.00 cm	56.00 cm

จากนั้นนำขดลวดที่ได้ไปวัดหาค่า L ด้วยเครื่อง LCR Meter

ขดลวดที่ 1 (Transmitting Coil) :  $L = 64.8 \mu\text{H}$

ขดลวดที่ 2 (Receiving Coil) :  $L = 70.9 \mu\text{H}$

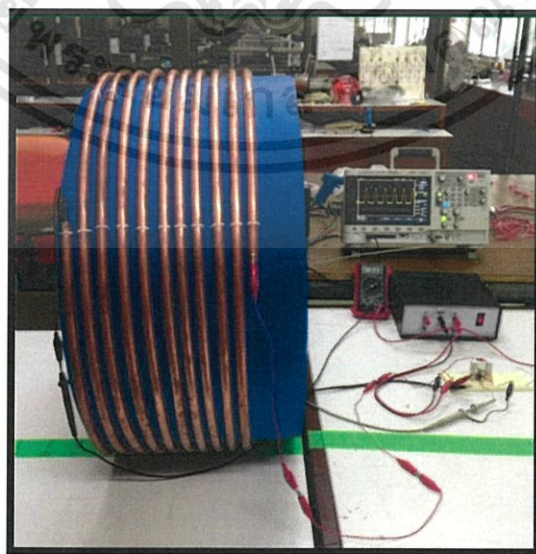


รูปที่ 3.2 แสดงขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับ

### 3.4 ทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวดโดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้าง สัญญาณพิก้า (Function Generator)

การทดลองเพื่อหาความถี่และแรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ที่เหมาะสมกับระบบที่จัดสร้างขึ้น ที่ให้ค่าประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานมากที่สุด ที่ระยะห่างระหว่างขดลวดเป็นศูนย์

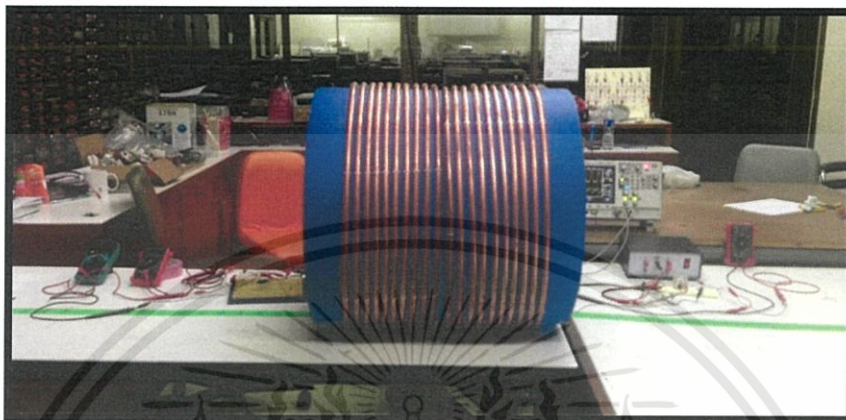
3.4.1 วัดค่าความต่างศักย์และค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง ที่ความถี่ ในช่วง 0.2 – 10 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยเพิ่มค่าความถี่ครั้งละ 0.2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ดังนี้ คือ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 25 โวลต์



รูปที่ 3.3 แสดงการจัดอุปกรณ์หาค่าทางด้านขดลวดตัวส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ทำการวัดความต่างศักย์และกระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ ที่ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแส ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยทำการทดลองในช่วงความถี่เท่ากับ 0.2 – 10 เมกะเฮิร์ตซ์ และทำการเพิ่มค่าความถี่ครั้งละ 0.2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้า ( $V_{DS}$ ) ดังนี้ คือ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 25 โวลต์ เช่นเดียวกันกับการวัดค่าสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง



รูปที่ 3.4 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อวัดค่าความต่างศักย์และกระแสทางด้านขาออกของขดลวดตัวรับ

3.4.3 นำค่าที่ได้จากการทดลองไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านสัญญาณขาเข้า กำลังไฟฟ้าสัญญาณขาออก และค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานกับความถี่ ตามลำดับ

การคำนวณค่าต่างๆ

กำลังไฟฟ้า (P) คำนวณได้จากสมการ

$$P = IV \quad (3.1)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็น วัตต์  
I คือ กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็น แอมแปร์  
V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โวลต์

ประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) คำนวณได้จากสมการ

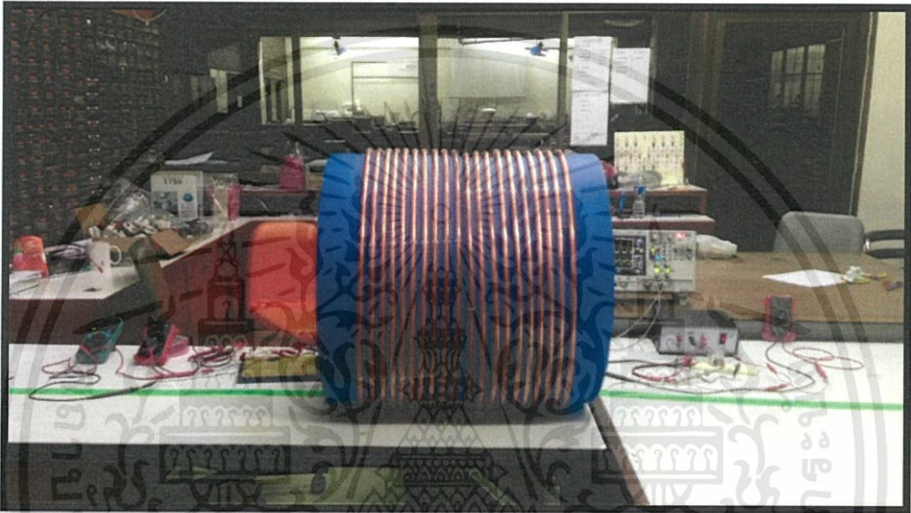
$$\eta = \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)  
 $P_{in}$  คือ กำลังไฟฟ้าขาเข้า (วัตต์)  
 $P_{out}$  คือ กำลังไฟฟ้าขาออก (วัตต์)

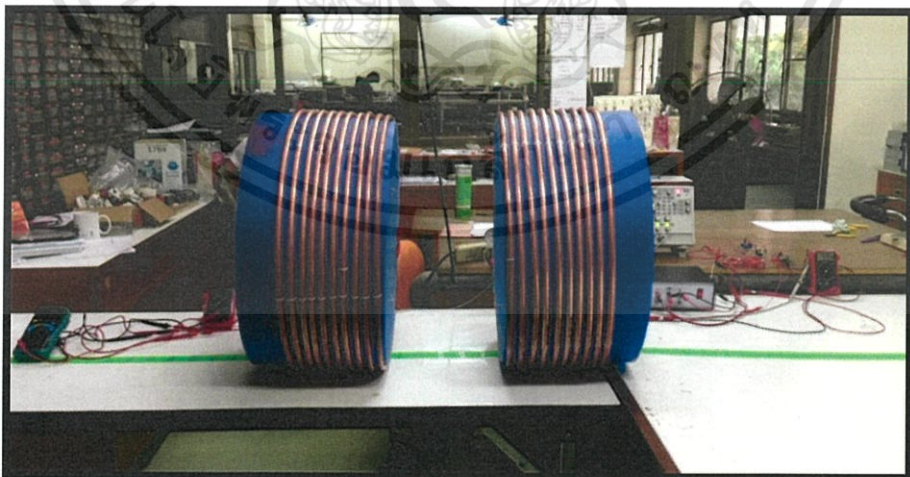
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 เลือกเฉพาะค่าที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสองลำดับแรกมาทำการทดลอง เช่นเดียวกับข้อ 3.4.1 – 3.4.3 โดยทำการเพิ่มความถี่ให้ละเอียดมากขึ้นเป็นครั้งละ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อหาช่วงที่มีประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานที่ดีที่สุด และนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบวงจร ออสซิลเลเตอร์

3.4.5 นำค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดมาทำการทดลองเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวด และทำการบันทึกค่าความต่างศักย์และกระแสทางด้านขาออก ที่ระยะต่างๆ ตั้งแต่ 0 – 200 เซนติเมตร โดยเลื่อนออกห่างครั้งละ 5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.5 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อวัดสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับที่ระยะเป็น 0 เซนติเมตร



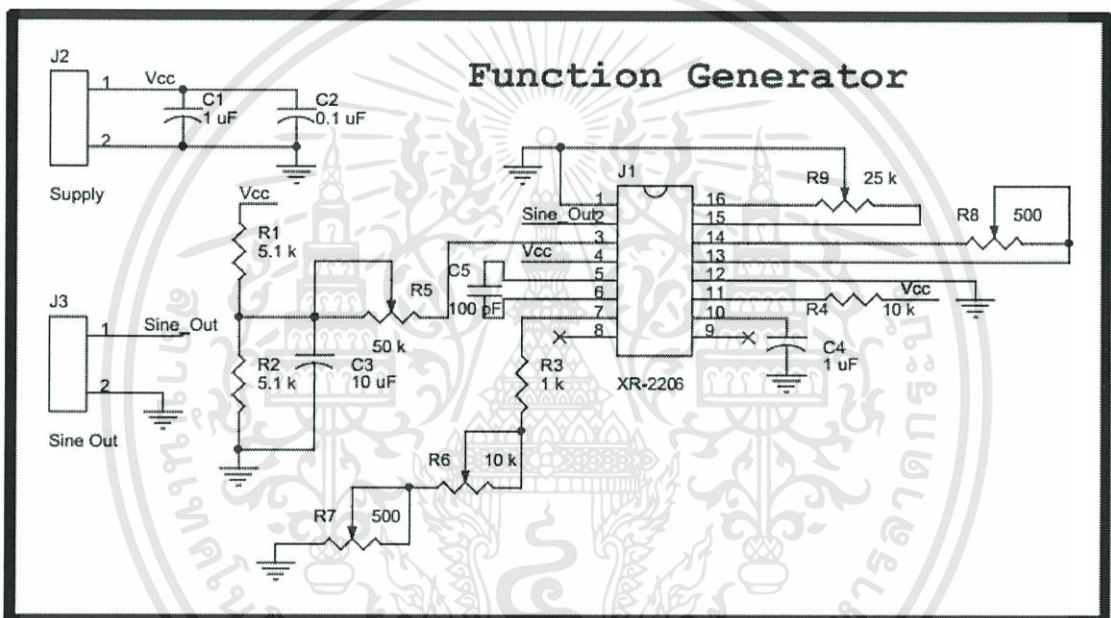
รูปที่ 3.6 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อวัดสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับจากวงจรที่ระยะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.6 นำค่าที่ได้จากการทดลองไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานกับระยะห่างระหว่างขดลวดตัวส่งกับตัวรับ

### 3.5 การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์

จากการทดลองโดยใช้ Function Generator ทำให้เราทราบความถี่ และแรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ที่ให้ค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานได้ดีที่สุด และนำค่าที่ได้ดังกล่าวมาทำการออกแบบและสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณรูปไซน์ ที่มีค่าความถี่อยู่ในช่วงดังกล่าว ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



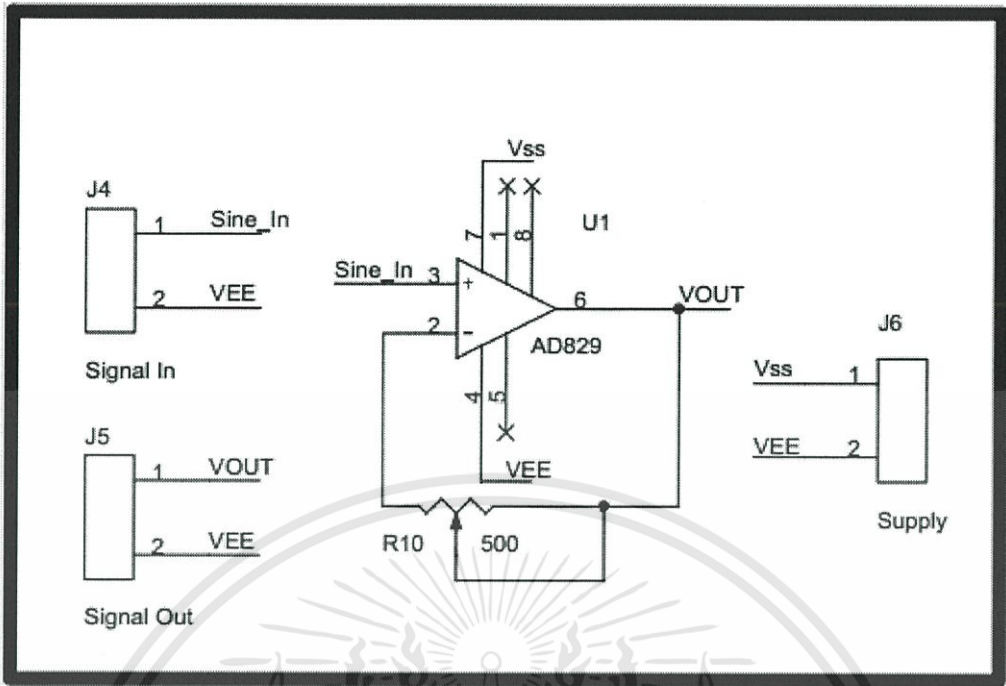
รูปที่ 3.7 แสดงแผนผังของวงจรออสซิลเลเตอร์

### 3.6 การออกแบบวงจรขยาย

เนื่องจากวงจรออสซิลเลเตอร์มีความต่างศักย์และกระแสที่น้อยจึงไม่สามารถป้อนกระแสให้กับขดลวดได้ จึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรขยายเพื่อนำมาใช้ขยายความต่างศักย์และกระแสของวงจรออสซิลเลเตอร์ก่อนที่จะป้อนเข้าไปยังขดลวดตัวส่ง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ วงจรขยายความต่างศักย์ (Preamplifier) และวงจรขยายกระแส (Power Amplifier)

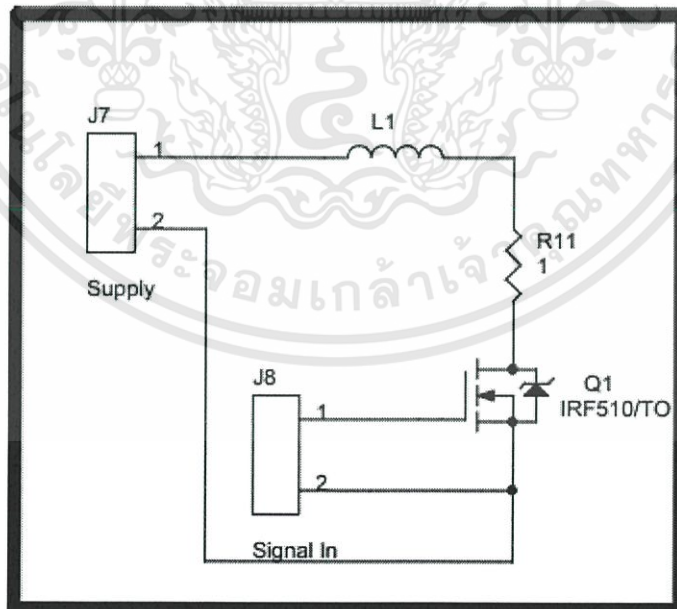
3.6.1 วงจรขยายความต่างศักย์ ทำหน้าที่ขยายความต่างศักย์ที่ได้จากวงจรออสซิลเลเตอร์ เพื่อให้ขนาดของความต่างศักย์มีมากพอที่จะทำให้วงจรขยายกระแสสามารถทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรขยายความต่างศักย์

3.6.2 วงจรขยายกระแส ทำหน้าที่ขยายกระแสที่ได้จากวงจรขยายความต่างศักย์ เพื่อให้วงจรมีกระแสมากพอที่จะจ่ายให้หลอด

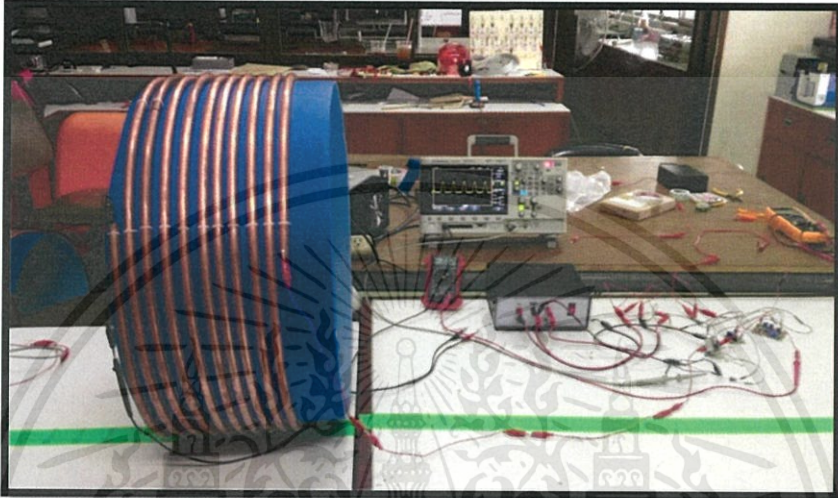


รูปที่ 3.9 แสดงวงจรขยายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

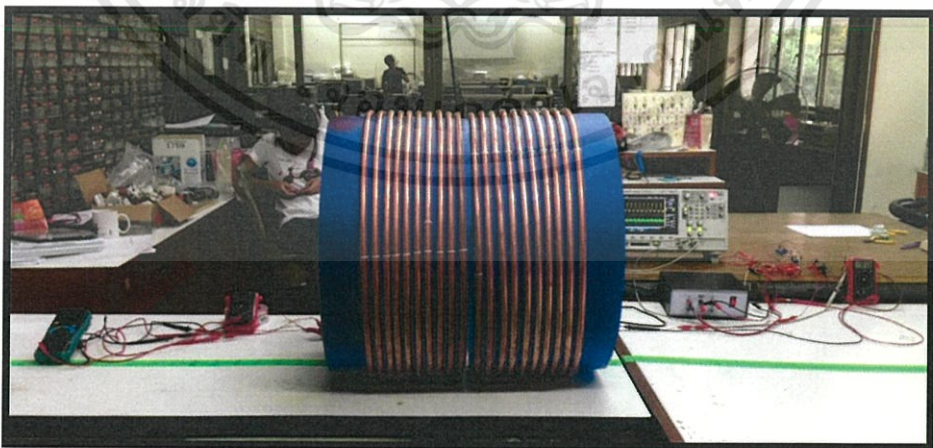
### 3.7 ทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวดโดยป้อนความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์

3.7.1 วัดค่าความต่างศักย์และค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง ที่ความถี่ ในช่วง 0.75 – 1.35 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยเพิ่มค่าความถี่ครั้งละ 0.05 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ดังนี้ คือ 12.5, 15 และ 17.5 โวลต์



รูปที่ 3.10 แสดงการทดลองเพื่อวัดค่าสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

3.7.2 วัดค่าความต่างศักย์และค่ากระแสของสัญญาณขาเข้าของขดลวดตัวรับ ที่ความถี่ ในช่วง 0.75 – 1.35 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยเพิ่มค่าความถี่ครั้งละ 0.05 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ดังนี้ คือ 12.5, 15 และ 17.5 โวลต์

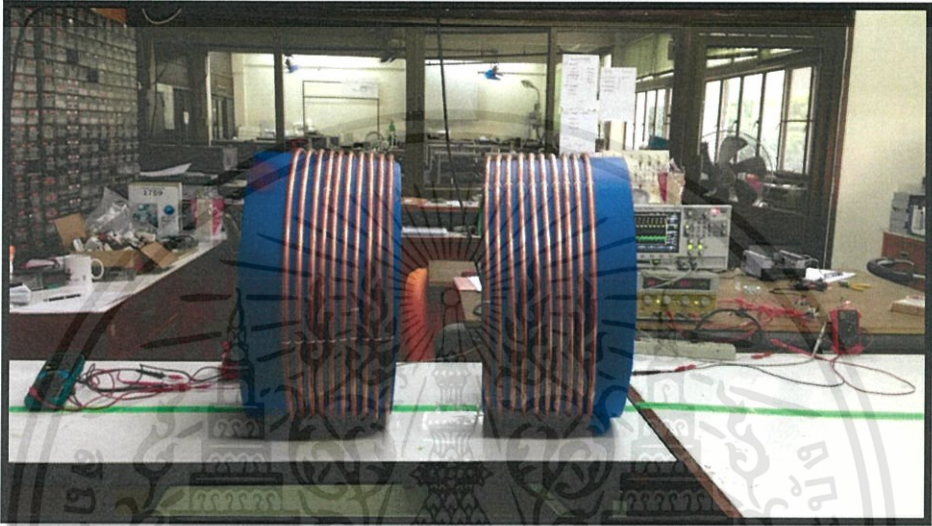


รูปที่ 3.11 แสดงการทดลองเพื่อวัดค่าสัญญาณขาเข้าของขดลวดตัวรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าทางขาเข้า ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก และค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานกับความถี่ ตามลำดับ เพื่อหาช่วงที่มีค่าประสิทธิภาพดีที่สุด

3.7.4 ทำการทดลองเลื่อนระยะและบันทึกค่าความต่างศักย์กับกระแสของสัญญาณขาเข้าของขดลวดตัวรับ ที่ระยะตั้งแต่ 0 – 200 เซนติเมตร โดยเลื่อนระยะออกครั้งละ 5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.12 แสดงการทดลองเพื่อวัดค่าสัญญาณขาเข้าของขดลวดตัวรับที่ระยะต่างๆ

3.7.5 นำค่าที่ได้จากการทดลองไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านสัญญาณขาเข้า กำลังไฟฟ้าสัญญาณขาออก และค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานกับความถี่ ตามลำดับ เพื่อหาช่วงที่มีประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานที่ดีที่สุด

3.4.6 นำค่าที่ได้จากการทดลองไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานกับระยะห่างระหว่างขดลวดตัวส่งกับตัวรับ

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวดโดยป้องกันความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณพิก้า (Function Generator)

ตารางที่ 4.1 : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

f (MHz)	$I_{in}$ (mA)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
0.20	43.60	84.80	95.70	125.50	102.30	138.60
0.40	24.10	45.00	18.30	25.90	37.30	64.20
0.60	4.20	6.30	19.40	40.50	59.20	92.40
0.80	2.60	3.20	3.10	4.30	11.90	39.80
1.00	1.20	1.50	2.40	2.20	2.30	2.80
1.20	1.00	0.70	1.00	0.90	1.12	2.60
1.40	4.50	4.90	3.40	4.00	1.70	1.60
1.60	2.60	3.00	2.40	3.60	5.30	4.50
1.80	5.90	6.80	5.10	6.10	4.40	17.10
2.00	11.20	13.00	10.90	12.60	9.40	19.20
2.20	16.00	20.50	16.00	21.50	14.60	18.30
2.40	21.20	28.40	23.00	31.40	22.40	22.50
2.60	25.10	32.30	29.70	39.10	30.10	30.20
2.80	28.30	36.30	34.70	43.30	39.90	43.40
3.00	30.70	39.90	37.80	47.40	42.10	45.40
3.20	33.50	42.40	40.10	50.20	44.10	47.80
3.40	35.50	46.50	41.40	53.40	46.10	50.40

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

f (MHz)	$I_m$ (mA)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
3.60	36.20	48.10	41.50	55.20	45.40	49.90
3.80	36.90	49.40	43.00	57.10	48.30	53.10
4.00	31.30	51.30	36.20	59.40	40.90	46.00
4.20	32.90	52.70	38.50	55.50	43.10	46.70
4.40	33.20	49.70	38.70	58.80	43.10	46.60
4.60	32.80	51.70	38.50	60.40	42.70	45.70
4.80	34.10	52.90	40.10	63.40	44.90	48.30
5.00	38.80	55.50	46.10	64.60	51.80	56.70
5.20	39.00	55.60	46.80	64.80	52.80	56.70
5.40	39.40	55.90	47.20	65.40	53.00	56.10
5.60	41.80	57.60	48.80	68.40	52.20	54.10
5.80	42.30	59.40	49.90	69.90	54.00	57.40
6.00	42.70	60.50	50.30	70.30	54.90	58.40
6.20	43.40	60.10	51.00	69.20	55.20	58.00
6.40	43.80	58.40	51.20	63.70	55.20	58.40
6.60	43.50	58.40	51.20	67.90	55.00	57.70
6.80	43.90	59.00	50.90	68.70	54.90	58.10
7.00	44.00	59.60	51.70	69.20	55.70	58.80
7.20	44.60	59.70	52.00	69.30	56.00	59.10
7.40	31.50	59.80	35.60	69.50	41.40	44.80
7.60	25.60	60.20	34.20	69.90	38.50	40.80
7.80	32.20	61.00	36.20	70.20	38.40	30.00
8.00	26.40	61.80	28.70	70.00	29.50	32.20
8.20	47.40	62.80	53.90	70.70	57.80	60.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

f (MHz)	$I_{in}$ (mA)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
8.60	49.10	64.30	55.40	72.90	58.40	61.20
8.80	48.90	63.80	55.20	72.40	59.10	61.90
9.00	39.20	63.50	44.70	71.80	48.50	51.50
9.20	40.80	63.80	46.10	71.70	50.80	53.90
9.40	42.50	62.30	47.70	69.10	50.70	54.10
9.60	42.70	52.80	48.20	58.20	52.30	54.40
9.80	43.50	54.40	49.10	58.70	52.50	55.30
10.00	44.20	62.50	49.80	71.30	53.30	55.80

ตารางที่ 4.2 : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

f (MHz)	$V_{in}$ (V)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
0.20	26.10	30.60	33.40	36.50	38.70	44.90
0.40	30.50	33.50	34.50	37.50	41.00	47.50
0.60	25.60	31.30	38.00	41.60	45.00	51.00
0.80	31.10	25.60	32.30	37.30	43.30	50.00
1.00	17.00	22.20	26.80	32.20	36.80	47.00
1.20	14.80	18.80	23.80	27.40	32.90	41.20
1.40	14.70	18.40	22.40	25.70	29.70	37.60
1.60	21.10	26.40	31.80	37.00	41.90	35.80
1.80	19.80	25.50	30.60	35.40	40.60	47.00
2.00	20.10	24.90	29.60	34.70	39.70	48.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

f (MHz)	$V_{in}$ (V)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
2.20	19.30	23.90	27.30	33.80	37.20	45.80
2.40	16.40	21.10	26.50	31.80	37.00	46.70
2.60	14.20	17.80	24.20	24.90	33.20	46.80
2.80	13.70	17.60	21.30	24.50	26.60	34.00
3.00	14.00	17.50	21.20	24.30	27.50	32.00
3.20	13.40	17.30	20.50	23.70	26.00	31.10
3.40	13.20	17.20	20.30	23.80	26.60	34.00
3.60	13.20	17.20	19.70	22.80	25.40	31.40
3.80	13.20	16.80	19.80	22.80	25.50	31.80
4.00	12.20	16.50	18.10	22.50	23.80	29.80
4.20	11.80	16.00	18.40	22.30	24.60	29.70
4.40	11.70	16.10	17.80	21.20	24.40	30.30
4.60	11.70	16.00	17.30	21.70	23.00	28.20
4.80	11.10	15.20	17.60	21.50	23.10	28.30
5.00	11.80	15.40	17.70	21.00	23.10	28.90
5.20	11.70	14.90	17.80	21.10	23.30	28.30
5.40	12.10	15.00	18.40	20.60	23.80	29.80
5.60	11.80	14.90	17.60	20.50	23.10	28.20
5.80	11.60	14.70	17.80	20.60	22.50	28.00
6.00	11.30	14.80	17.30	20.30	22.40	27.40
6.20	11.50	14.60	17.00	20.70	21.80	27.10
6.40	11.40	15.10	16.60	20.40	21.40	27.30
6.60	10.90	14.70	17.40	19.50	22.50	26.80
6.80	11.40	14.40	16.70	19.40	21.70	27.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2. (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

f (MHz)	$V_{in}$ (V)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
7.00	11.10	14.20	16.60	19.30	21.50	26.70
7.20	11.20	13.90	16.30	19.20	21.40	26.30
7.40	10.40	14.00	15.40	19.10	20.30	25.90
7.60	10.30	14.00	15.10	18.70	20.30	25.10
7.80	10.00	14.00	14.80	18.70	20.40	25.00
8.00	10.10	13.70	15.00	18.80	19.90	24.90
8.20	11.10	13.80	16.10	18.80	21.00	26.10
8.40	10.40	13.80	16.10	18.50	21.30	26.10
8.60	10.80	13.60	15.70	18.90	20.90	26.30
8.80	10.80	13.70	15.90	18.80	21.10	25.80
9.00	10.40	13.50	15.50	18.50	20.60	25.60
9.20	9.90	13.30	15.10	18.30	21.00	26.00
9.40	10.50	13.10	15.70	17.90	20.70	25.50
9.60	10.30	12.80	15.20	17.60	20.30	24.90
9.80	10.20	13.20	15.50	18.10	20.00	25.00
10.00	9.90	13.50	15.30	18.60	20.20	25.10

ตารางที่ 4.3 : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$I_{out}$ (mA)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
0.20	31.91	39.75	37.61	44.30	54.90	70.80
0.40	27.99	22.16	23.64	27.12	32.17	41.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$I_{out}$ (mA)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
0.60	19.38	24.46	29.38	32.76	36.27	42.10
0.80	13.60	17.08	20.90	24.26	28.08	32.82
1.00	9.79	12.46	15.55	17.89	21.01	26.36
1.20	7.00	9.06	11.54	13.31	15.99	20.25
1.40	5.62	7.06	8.96	10.05	11.80	15.17
1.60	12.89	6.12	7.60	8.55	9.98	12.52
1.80	11.54	14.73	18.40	20.83	24.46	32.10
2.00	10.30	12.97	15.98	18.41	21.52	25.52
2.20	8.76	11.29	14.03	16.35	19.22	23.69
2.40	6.50	9.16	12.36	14.26	17.13	21.69
2.60	3.26	3.51	9.47	11.61	14.42	29.28
2.80	3.62	3.10	5.36	4.28	11.55	16.36
3.00	2.82	2.70	4.23	3.94	5.28	6.37
3.20	2.76	2.49	4.21	3.56	5.44	6.51
3.40	2.41	2.66	3.65	3.66	4.65	5.58
3.60	2.28	2.54	3.35	3.53	4.44	5.43
3.80	2.42	2.06	3.38	2.94	4.33	5.06
4.00	2.11	2.16	3.15	3.03	4.06	4.88
4.20	2.55	2.29	2.72	3.17	3.55	4.31
4.40	1.92	1.91	2.63	2.84	3.43	4.16
4.60	1.75	1.62	2.66	2.36	3.50	4.28
4.80	2.83	1.55	4.11	2.38	5.06	5.86
5.00	2.56	1.55	3.67	2.48	4.48	2.25
5.20	2.75	2.19	4.03	3.38	5.00	5.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$I_{out}$ (mA)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
5.20	2.75	2.19	4.03	3.38	5.00	5.87
5.40	3.55	2.18	5.37	2.92	7.01	7.86
5.60	5.14	3.57	8.29	4.05	10.65	12.35
5.80	10.37	1.90	14.30	2.65	16.65	18.67
6.00	5.30	2.18	8.01	2.89	9.50	11.28
6.20	2.27	2.39	3.49	3.35	4.31	5.00
6.40	1.16	1.56	1.87	2.16	2.24	2.60
6.60	0.57	1.67	0.86	2.34	1.14	1.36
6.80	0.26	1.57	0.32	2.31	0.47	0.61
7.00	0.45	1.22	0.58	1.65	0.61	0.72
7.20	0.50	1.24	0.62	1.35	0.75	0.90
7.40	0.68	0.89	0.87	0.94	1.14	1.36
7.60	1.26	0.47	1.86	0.68	2.33	2.66
7.80	1.59	0.33	2.37	0.66	3.10	3.62
8.00	1.14	0.67	2.07	1.28	2.82	3.35
8.20	2.51	5.21	4.02	7.92	5.17	6.18
8.40	2.03	6.94	3.28	8.58	4.13	4.84
8.60	1.16	1.88	2.04	2.84	2.63	3.14
8.80	2.83	0.68	4.30	1.33	5.27	5.93
9.00	2.75	0.66	4.41	1.48	5.82	7.18
9.20	0.94	3.21	1.51	4.50	2.06	2.55
9.40	2.96	2.72	4.41	4.90	5.62	6.64
9.60	7.78	3.49	11.27	5.52	13.71	15.58
9.80	6.55	3.52	9.51	5.00	11.36	12.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$I_{out}$ (mA)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
10.00	4.89	2.77	7.12	4.08	8.63	9.82

ตารางที่ 4.4 : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$V_{out}$ (mV)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
0.20	106.90	209.00	127.00	217.00	182.00	222.00
0.40	126.40	220.00	136.00	260.00	176.00	192.00
0.60	79.70	218.00	164.00	281.00	229.00	238.00
0.80	60.50	193.00	94.00	258.00	179.00	265.00
1.00	40.80	152.00	70.00	216.00	97.00	161.00
1.20	31.30	116.00	50.80	183.00	75.00	97.00
1.40	45.30	113.00	49.80	145.00	63.20	81.00
1.60	59.60	100.00	70.00	129.00	80.00	88.00
1.80	67.00	169.00	99.00	236.00	128.00	164.00
2.00	72.00	179.00	94.00	243.00	119.00	183.00
2.20	69.00	187.00	97.00	232.00	124.00	145.00
2.40	96.00	163.00	111.00	232.00	132.00	156.00
2.60	100.00	172.00	141.00	225.00	168.00	170.00
2.80	146.00	171.00	189.00	196.00	188.00	192.00
3.00	125.00	158.00	149.00	223.00	167.00	190.00
3.20	145.00	192.00	179.00	251.00	199.00	211.00
3.40	116.00	185.00	140.00	224.00	153.00	160.00

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$V_{out}$ (mV)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
3.60	139.00	180.00	152.00	206.00	150.00	144.00
3.80	199.00	147.00	235.00	167.00	244.00	225.00
4.00	128.00	139.00	120.00	168.00	125.00	131.00
4.20	83.00	188.00	84.00	229.00	102.00	109.00
4.40	121.00	245.00	136.00	276.00	151.00	154.00
4.60	131.00	208.00	167.00	224.00	177.00	185.00
4.80	255.00	214.00	296.00	264.00	320.00	340.00
5.00	240.00	206.00	258.00	223.00	261.00	271.00
5.20	271.00	229.00	287.00	268.00	289.00	299.00
5.40	259.00	213.00	297.00	225.00	330.00	350.00
5.60	279.00	107.00	370.00	137.00	440.00	470.00
5.80	500.00	137.00	630.00	160.00	720.00	790.00
6.00	253.00	175.00	340.00	186.00	390.00	440.00
6.20	126.00	266.00	167.00	313.00	194.00	219.00
6.40	115.00	261.00	144.00	308.00	153.00	165.00
6.60	141.00	340.00	159.00	390.00	180.00	190.00
6.80	180.00	300.00	190.00	370.00	210.00	220.00
7.00	230.00	238.00	240.00	330.00	250.00	260.00
7.20	290.00	241.00	310.00	330.00	340.00	350.00
7.40	320.00	245.00	360.00	317.00	390.00	410.00
7.60	410.00	268.00	450.00	290.00	490.00	510.00
7.80	400.00	256.00	480.00	283.00	530.00	560.00
8.00	330.00	261.00	400.00	292.00	450.00	480.00
8.20	270.00	280.00	300.00	320.00	330.00	350.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$V_{out}$ (mV)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
8.40	113.00	190.00	137.00	229.00	160.00	180.00
8.60	170.00	200.00	190.00	251.00	220.00	230.00
8.80	240.00	230.00	280.00	271.00	300.00	320.00
9.00	170.00	260.00	180.00	270.00	200.00	210.00
9.20	152.00	250.00	144.00	320.00	152.00	159.00
9.40	240.00	280.00	280.00	390.00	300.00	340.00
9.60	450.00	350.00	580.00	440.00	660.00	730.00
9.80	390.00	320.00	510.00	370.00	580.00	630.00
10.00	340.00	280.00	420.00	330.00	480.00	520.00

ตารางที่ 4.5 : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

f (MHz)	$P_m$ (W)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
0.20	1.1380	2.5949	3.1964	4.5808	3.9590	6.2231
0.40	0.7351	1.5075	0.6314	0.9713	1.5293	3.0495
0.60	0.1075	0.1972	0.7372	1.6848	2.6640	4.7124
0.80	0.0809	0.0819	0.1001	0.1604	0.5153	1.9900
1.00	0.0204	0.0333	0.0643	0.0708	0.0846	0.1316
1.20	0.0148	0.0132	0.0238	0.0247	0.0368	0.1071
1.40	0.0662	0.0902	0.0762	0.1028	0.0505	0.0602
1.60	0.0549	0.0792	0.0763	0.1332	0.2221	0.1611
1.80	0.1168	0.1734	0.1561	0.2159	0.1786	0.8037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

f (MHz)	$P_{in}$ (W)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
2.00	0.2251	0.3237	0.3226	0.4372	0.3732	0.9274
2.20	0.3088	0.4900	0.4368	0.7267	0.5431	0.8381
2.40	0.3477	0.5992	0.6095	0.9985	0.8288	1.0508
2.60	0.3564	0.5749	0.7187	0.9736	0.9993	1.4134
2.80	0.3877	0.6389	0.7391	1.0609	1.0613	1.4756
3.00	0.4298	0.6983	0.8014	1.1518	1.1578	1.4528
3.20	0.4489	0.7335	0.8221	1.1897	1.1466	1.4866
3.40	0.4686	0.7998	0.8404	1.2709	1.2263	1.7136
3.60	0.4778	0.8273	0.8176	1.2586	1.1532	1.5669
3.80	0.4871	0.8299	0.8514	1.3019	1.2317	1.6886
4.00	0.3819	0.8465	0.6552	1.3365	0.9734	1.3708
4.20	0.3882	0.8432	0.7084	1.2377	1.0603	1.3870
4.40	0.3884	0.8002	0.6889	1.2466	1.0516	1.4120
4.60	0.3838	0.8272	0.6661	1.3107	0.9821	1.2887
4.80	0.3785	0.8041	0.7058	1.3631	1.0372	1.3669
5.00	0.4578	0.8547	0.8160	1.3566	1.1966	1.6386
5.20	0.4563	0.8284	0.8330	1.3673	1.2302	1.6046
5.40	0.4767	0.8385	0.8685	1.3472	1.2614	1.6718
5.60	0.4932	0.8582	0.8589	1.4022	1.2058	1.5256
5.80	0.4907	0.8732	0.8882	1.4399	1.2150	1.6072
6.00	0.4825	0.8954	0.8702	1.4271	1.2298	1.6002
6.20	0.4991	0.8775	0.8670	1.4324	1.2034	1.5718
6.40	0.4993	0.8818	0.8499	1.2995	1.1813	1.5943
6.60	0.4742	0.8585	0.8909	1.3241	1.2375	1.5464

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

f (MHz)	$P_{in}$ (W)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
6.80	0.5005	0.8496	0.8500	1.3328	1.1913	1.5803
7.00	0.4884	0.8463	0.8582	1.3356	1.1976	1.5700
7.20	0.4995	0.8298	0.8476	1.3306	1.1984	1.5543
7.40	0.3276	0.8372	0.5482	1.3275	0.8404	1.1603
7.60	0.2637	0.8428	0.5164	1.3071	0.7816	1.0241
7.80	0.3220	0.8540	0.5358	1.3127	0.7834	0.7500
8.00	0.2666	0.8467	0.4305	1.3160	0.5871	0.8018
8.20	0.5261	0.8666	0.8678	1.3292	1.2138	1.5895
8.40	0.5023	0.8763	0.8807	1.3265	1.2397	1.5895
8.60	0.5303	0.8745	0.8698	1.3778	1.2206	1.6096
8.80	0.5281	0.8741	0.8777	1.3611	1.2470	1.5970
9.00	0.4077	0.8573	0.6929	1.3283	0.9991	1.3184
9.20	0.4039	0.8485	0.6961	1.3121	1.0668	1.4014
9.40	0.4463	0.8161	0.7489	1.2369	1.0495	1.3796
9.60	0.4398	0.6758	0.7326	1.0243	1.0617	1.3546
9.80	0.4437	0.7181	0.7611	1.0625	1.0500	1.3825
10.00	0.4376	0.8438	0.7619	1.3262	1.0767	1.4006

ตารางที่ 4.6 : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$P_{out}$ (W)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
0.20	0.0034	0.0083	0.0048	0.0096	0.0100	0.0157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$P_{out}$ (W)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
0.40	0.0035	0.0049	0.0032	0.0071	0.0057	0.0079
0.60	0.0015	0.0053	0.0048	0.0092	0.0083	0.0100
0.80	0.0008	0.0033	0.0020	0.0063	0.0050	0.0087
1.00	0.0004	0.0019	0.0011	0.0039	0.0020	0.0042
1.20	0.0002	0.0011	0.0006	0.0024	0.0012	0.0020
1.40	0.0003	0.0008	0.0004	0.0015	0.0007	0.0012
1.60	0.0008	0.0006	0.0005	0.0011	0.0008	0.0011
1.80	0.0008	0.0025	0.0018	0.0049	0.0031	0.0053
2.00	0.0007	0.0023	0.0015	0.0045	0.0026	0.0047
2.20	0.0006	0.0021	0.0014	0.0038	0.0024	0.0034
2.40	0.0006	0.0015	0.0014	0.0033	0.0023	0.0034
2.60	0.0003	0.0006	0.0013	0.0026	0.0024	0.0050
2.80	0.0005	0.0005	0.0010	0.0008	0.0022	0.0031
3.00	0.0004	0.0004	0.0006	0.0009	0.0009	0.0012
3.20	0.0004	0.0005	0.0008	0.0009	0.0011	0.0014
3.40	0.0003	0.0005	0.0005	0.0008	0.0007	0.0009
3.60	0.0003	0.0005	0.0005	0.0007	0.0007	0.0008
3.80	0.0005	0.0003	0.0008	0.0005	0.0011	0.0011
4.00	0.0003	0.0003	0.0004	0.0005	0.0005	0.0006
4.20	0.0002	0.0004	0.0002	0.0007	0.0004	0.0005
4.40	0.0002	0.0005	0.0004	0.0008	0.0005	0.0006
4.60	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0008
4.80	0.0007	0.0003	0.0012	0.0006	0.0016	0.0020
5.00	0.0006	0.0003	0.0009	0.0006	0.0012	0.0006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$P_{out}$ (W)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
5.20	0.0007	0.0005	0.0012	0.0009	0.0014	0.0018
5.40	0.0009	0.0005	0.0016	0.0007	0.0023	0.0028
5.60	0.0014	0.0004	0.0031	0.0006	0.0047	0.0058
5.80	0.0052	0.0003	0.0090	0.0004	0.0120	0.0147
6.00	0.0013	0.0004	0.0027	0.0005	0.0037	0.0050
6.20	0.0003	0.0006	0.0006	0.0010	0.0008	0.0011
6.40	0.0001	0.0004	0.0003	0.0007	0.0003	0.0004
6.60	0.0001	0.0006	0.0001	0.0009	0.0002	0.0003
6.80	0.0000	0.0005	0.0001	0.0009	0.0001	0.0001
7.00	0.0001	0.0003	0.0001	0.0005	0.0002	0.0002
7.20	0.0001	0.0003	0.0002	0.0004	0.0003	0.0003
7.40	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0004	0.0006
7.60	0.0005	0.0001	0.0008	0.0002	0.0011	0.0014
7.80	0.0006	0.0001	0.0011	0.0002	0.0016	0.0020
8.00	0.0004	0.0002	0.0008	0.0004	0.0013	0.0016
8.20	0.0007	0.0015	0.0012	0.0025	0.0017	0.0022
8.40	0.0002	0.0013	0.0004	0.0020	0.0007	0.0009
8.60	0.0002	0.0004	0.0004	0.0007	0.0006	0.0007
8.80	0.0007	0.0002	0.0012	0.0004	0.0016	0.0019
9.00	0.0005	0.0002	0.0008	0.0004	0.0012	0.0015
9.20	0.0001	0.0008	0.0002	0.0014	0.0003	0.0004
9.40	0.0007	0.0008	0.0012	0.0019	0.0017	0.0023
9.60	0.0035	0.0012	0.0065	0.0024	0.0090	0.0114
9.80	0.0026	0.0011	0.0049	0.0019	0.0066	0.0081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

f(MHz)	$P_{out}$ (W)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
10.00	0.0017	0.0008	0.0030	0.0013	0.0041	0.0051

ตารางที่ 4.7 : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด

f (MHz)	$\eta$ (%)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
0.20	0.2998	0.3202	0.1494	0.2099	0.2524	0.2526
0.40	0.4813	0.3234	0.5092	0.7260	0.3702	0.2581
0.60	1.4366	2.7041	0.6536	0.5464	0.3118	0.2126
0.80	1.0176	4.0240	1.9620	3.9024	0.9755	0.4371
1.00	1.9580	5.6874	1.6923	5.4549	2.4078	3.2249
1.20	1.4804	7.9860	2.4632	9.8773	3.2546	1.8337
1.40	0.3849	0.8848	0.5859	1.4176	1.4770	2.0425
1.60	1.4004	0.7727	0.6971	0.8280	0.3595	0.6839
1.80	0.6619	1.4356	1.1672	2.2765	1.7526	0.6550
2.00	0.3294	0.7172	0.4656	1.0232	0.6862	0.5036
2.20	0.1957	0.4309	0.3116	0.5220	0.4388	0.4098
2.40	0.1795	0.2492	0.2251	0.3313	0.2728	0.3220
2.60	0.0915	0.1050	0.1858	0.2683	0.2424	0.3522
2.80	0.1363	0.0830	0.1371	0.0791	0.2046	0.2129
3.00	0.0820	0.0611	0.0787	0.0763	0.0762	0.0833
3.20	0.0892	0.0652	0.0917	0.0751	0.0944	0.0924
3.40	0.0597	0.0615	0.0608	0.0645	0.0580	0.0521

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด

f (MHz)	$\eta$ (%)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
3.60	0.0663	0.0553	0.0623	0.0578	0.0578	0.0499
3.80	0.0989	0.0365	0.0933	0.0377	0.0858	0.0674
4.00	0.0707	0.0355	0.0577	0.0381	0.0521	0.0466
4.20	0.0545	0.0511	0.0323	0.0587	0.0342	0.0339
4.40	0.0598	0.0585	0.0519	0.0629	0.0492	0.0454
4.60	0.0597	0.0407	0.0667	0.0403	0.0631	0.0614
4.80	0.1907	0.0413	0.1724	0.0461	0.1561	0.1458
5.00	0.1342	0.0374	0.1160	0.0408	0.0977	0.0372
5.20	0.1633	0.0605	0.1388	0.0663	0.1175	0.1094
5.40	0.1929	0.0554	0.1836	0.0488	0.1834	0.1646
5.60	0.2907	0.0445	0.3571	0.0396	0.3886	0.3805
5.80	1.0567	0.0298	1.0143	0.0294	0.9867	0.9177
6.00	0.2779	0.0426	0.3130	0.0377	0.3013	0.3102
6.20	0.0573	0.0725	0.0672	0.0732	0.0695	0.0697
6.40	0.0267	0.0462	0.0317	0.0512	0.0290	0.0269
6.60	0.0170	0.0661	0.0153	0.0689	0.0166	0.0167
6.80	0.0094	0.0554	0.0072	0.0641	0.0083	0.0085
7.00	0.0212	0.0343	0.0162	0.0408	0.0127	0.0119
7.20	0.0290	0.0360	0.0227	0.0335	0.0213	0.0203
7.40	0.0664	0.0260	0.0571	0.0224	0.0529	0.0481
7.60	0.1959	0.0149	0.1621	0.0151	0.1461	0.1325
7.80	0.1975	0.0099	0.2123	0.0142	0.2097	0.2703
8.00	0.1411	0.0207	0.1923	0.0284	0.2162	0.2006
8.20	0.1288	0.1683	0.1390	0.1907	0.1406	0.1361

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด

f (MHz)	$\eta$ (%)					
	$V_{DS}$ (V)					
	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	25.00
8.40	0.0457	0.1505	0.0510	0.1481	0.0533	0.0548
8.60	0.0372	0.0430	0.0446	0.0517	0.0474	0.0449
8.80	0.1286	0.0179	0.1372	0.0265	0.1268	0.1188
9.00	0.1147	0.0200	0.1146	0.0301	0.1165	0.1144
9.20	0.0354	0.0946	0.0312	0.1097	0.0294	0.0289
9.40	0.1592	0.0933	0.1649	0.1545	0.1606	0.1636
9.60	0.7960	0.1807	0.8922	0.2371	0.8523	0.8396
9.80	0.5757	0.1569	0.6373	0.1741	0.6275	0.5874
10.00	0.3800	0.0919	0.3925	0.1015	0.3847	0.3646

#### 4.2 ผลการทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวดโดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) โดยละเอียด

ตารางที่ 4.8 : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์และค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง และสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	สัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง				สัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ			
	$I_{in}$ (mA)		$V_{in}$ (V)		$I_{out}$ (mA)		$V_{out}$ (mV)	
	$V_{DS}$ (V)		$V_{DS}$ (V)		$V_{DS}$ (V)		$V_{DS}$ (V)	
	12.50	17.50	12.50	17.50	12.50	17.50	12.50	17.50
0.40	38.00	25.70	32.70	37.20	22.07	26.90	219.00	239.00
0.45	40.50	44.90	34.60	38.00	30.45	23.48	269.00	244.00
0.50	23.00	73.20	34.30	41.50	29.45	29.45	236.00	284.00
0.55	7.80	59.20	33.20	41.60	27.04	34.53	223.00	297.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์และค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวด  
ตัวส่งละสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	สัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง				สัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ			
	I <sub>in</sub> (mA)		V <sub>in</sub> (V)		I <sub>out</sub> (mA)		V <sub>out</sub> (mV)	
	V <sub>DS</sub> (V)		V <sub>DS</sub> (V)		V <sub>DS</sub> (V)		V <sub>DS</sub> (V)	
	12.50	17.50	12.50	17.50	12.50	17.50	12.50	17.50
0.60	6.40	41.00	31.40	41.40	24.53	32.48	216.00	267.00
0.65	5.40	28.00	30.30	40.90	22.33	30.24	222.00	288.00
0.70	4.50	14.80	28.90	40.20	20.38	28.05	227.00	298.00
0.75	3.70	5.00	27.50	38.90	18.65	26.04	186.00	277.00
0.80	3.10	4.30	26.30	37.20	17.13	24.06	183.00	271.00
0.85	2.70	3.80	25.20	35.80	15.81	22.30	157.00	253.00
0.90	2.30	3.30	24.10	34.30	14.62	20.65	184.00	216.00
0.95	1.90	2.80	23.70	32.70	13.51	19.14	155.00	251.00
1.00	1.50	2.20	22.10	32.00	12.49	17.73	139.00	235.00
1.05	1.20	1.80	21.70	30.10	11.56	16.46	148.00	186.00
1.10	0.80	1.50	20.30	29.60	10.69	15.30	133.00	174.00
1.15	0.60	1.20	19.10	29.00	9.87	14.22	108.00	202.00
1.20	0.70	0.90	18.80	27.30	9.08	13.19	147.00	193.00
1.25	1.30	0.90	18.20	27.00	8.36	12.25	170.00	153.00
1.30	2.30	1.50	18.40	25.90	7.80	11.29	95.00	177.00
1.35	3.50	2.50	18.10	25.70	7.39	10.53	89.00	141.00
1.40	4.80	3.90	18.40	25.50	7.04	9.94	104.00	173.00
1.45	6.20	5.40	18.70	25.10	6.80	9.48	159.00	164.00
1.50	7.60	7.10	18.70	25.50	6.55	9.12	160.00	129.00
1.55	2.80	8.80	25.30	25.90	6.33	8.75	124.00	145.00
1.60	3.00	3.60	26.30	37.30	15.65	8.45	105.00	122.00
1.65	3.50	3.70	25.30	35.90	15.95	8.17	184.00	120.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าความต่างศักย์และค่ากระแสของสัญญาณขาออกของขดลวด  
ตัวส่งละสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	สัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง				สัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ			
	I <sub>in</sub> (mA)		V <sub>in</sub> (V)		I <sub>out</sub> (mA)		V <sub>out</sub> (mV)	
	V <sub>DS</sub> (V)		V <sub>DS</sub> (V)		V <sub>DS</sub> (V)		V <sub>DS</sub> (V)	
	12.50	17.50	12.50	17.50	12.50	17.50	12.50	17.50
1.70	4.30	4.10	26.20	35.00	15.61	7.90	154.00	161.00
1.75	5.30	4.80	24.50	36.20	15.17	21.24	157.00	228.00
1.80	6.50	5.90	25.40	35.40	14.70	20.61	166.00	244.00

ตารางที่ 4.9 : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่งและสัญญาณขา  
ออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	P <sub>in</sub> (W)		P <sub>out</sub> (W)	
	V <sub>DS</sub> (V)		V <sub>DS</sub> (V)	
	12.50	17.50	12.50	17.50
0.40	1.2426	0.9560	0.0048	0.0064
0.45	1.4013	1.7062	0.0082	0.0057
0.50	0.7889	3.0378	0.0070	0.0084
0.55	0.2590	2.4627	0.0060	0.0103
0.60	0.2010	1.6974	0.0053	0.0087
0.65	0.1636	1.1452	0.0050	0.0087
0.70	0.1301	0.5950	0.0046	0.0084
0.75	0.1018	0.1945	0.0035	0.0072
0.80	0.0815	0.1600	0.0031	0.0065
0.85	0.0680	0.1360	0.0025	0.0056
0.90	0.0554	0.1132	0.0027	0.0045
0.95	0.0450	0.0916	0.0021	0.0048

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่งและ  
สัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	P <sub>in</sub> (W)		P <sub>out</sub> (W)	
	V <sub>DS</sub> (V)		V <sub>DS</sub> (V)	
	12.50	17.50	12.50	17.50
1.00	0.0332	0.0704	0.0017	0.0042
1.05	0.0260	0.0542	0.0017	0.0031
1.10	0.0162	0.0444	0.0014	0.0027
1.15	0.0115	0.0348	0.0011	0.0029
1.20	0.0132	0.0246	0.0013	0.0025
1.25	0.0237	0.0243	0.0014	0.0019
1.30	0.0423	0.0389	0.0007	0.0020
1.35	0.0634	0.0643	0.0007	0.0015
1.40	0.0883	0.0995	0.0007	0.0017
1.45	0.1159	0.1355	0.0011	0.0016
1.50	0.1421	0.1811	0.0010	0.0012
1.55	0.0708	0.2279	0.0008	0.0013
1.60	0.0789	0.1343	0.0016	0.0010
1.65	0.0886	0.1328	0.0029	0.0010
1.70	0.1127	0.1435	0.0024	0.0013
1.75	0.1299	0.1738	0.0024	0.0048
1.80	0.1651	0.2089	0.0024	0.0050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด

f (MHz)	$\eta$ (%)		f (MHz)	$\eta$ (%)	
	$V_{DS}$ (V)			$V_{DS}$ (V)	
	12.5	17.5		12.5	17.5
0.40	0.3890	0.6725	1.15	9.3016	8.2541
0.45	0.5845	0.3358	1.20	10.1426	10.3609
0.50	0.8810	0.2753	1.25	6.0068	7.7130
0.55	2.3285	0.4164	1.30	1.7509	5.1437
0.60	2.6366	0.5109	1.35	1.0382	2.3109
0.65	3.0297	0.7605	1.40	0.8290	1.7291
0.70	3.5573	1.4050	1.45	0.9326	1.1471
0.75	3.4092	3.7085	1.50	0.7374	0.6498
0.80	3.8450	4.0762	1.55	1.1080	0.5567
0.85	3.6481	4.1472	1.60	2.0827	0.7677
0.90	4.8531	3.9406	1.65	3.3143	0.7381
0.95	4.6503	5.2470	1.70	2.1338	0.8863
1.00	5.2371	5.9184	1.75	1.8342	2.7870
1.05	6.5702	5.6507	1.80	1.4780	2.4078
1.10	8.7547	5.9959			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวดโดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) โดยละเอียด

ตารางที่ 4.11 : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวดโดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) โดยละเอียด

ระยะห่างระหว่างขดลวด	I <sub>out</sub> (mA)			V <sub>out</sub> (mV)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	10.32	10.08	10.09	128.00	110.00	126.00
5	7.72	7.77	7.93	60.00	75.00	79.00
10	5.83	5.81	5.87	41.80	49.10	50.40
15	4.48	4.28	4.38	34.00	35.50	35.20
20	3.35	3.42	3.45	31.00	30.10	30.20
25	2.84	2.79	2.82	28.80	26.90	27.10
30	2.33	2.26	2.28	27.60	24.30	24.70
35	1.81	1.79	1.80	26.50	22.80	23.10
40	1.47	1.47	1.48	25.90	22.40	21.80
45	1.25	1.23	1.24	26.00	21.20	21.10
50	1.04	1.05	1.04	24.20	19.70	20.60
55	0.86	0.86	0.88	24.30	20.00	20.00
60	0.73	0.72	0.73	23.20	19.30	20.60
65	0.63	0.62	0.63	24.10	18.90	20.90
70	0.54	0.54	0.54	23.70	18.60	19.60
75	0.47	0.47	0.47	24.10	18.80	19.90
80	0.44	0.42	0.41	23.40	19.50	20.00
85	0.37	0.37	0.35	22.80	18.90	19.80
90	0.34	0.32	0.33	21.60	17.60	19.20
95	0.30	0.29	0.29	21.90	18.10	19.00
100	0.27	0.26	0.25	23.40	19.10	19.40
105	0.23	0.22	0.22	21.40	18.70	18.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวดโดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) โดยละเอียด

ระยะห่างระหว่างขดลวด	I <sub>out</sub> (mA)			V <sub>out</sub> (mV)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
110	0.20	0.19	0.20	16.90	18.50	17.90
115	0.18	0.18	0.18	16.30	17.80	17.90
120	0.16	0.16	0.16	16.60	18.40	18.80
125	0.14	0.14	0.15	16.60	18.40	18.85
130	0.13	0.13	0.13	16.50	18.40	19.20
135	0.13	0.12	0.12	16.70	18.20	18.20
140	0.12	0.11	0.11	16.60	18.40	18.50
145	0.11	0.10	0.11	16.40	18.70	18.40
150	0.10	0.10	0.09	17.50	23.10	17.80
155	0.08	0.08	0.08	16.40	18.10	18.00
160	0.07	0.07	0.07	16.20	18.70	17.90
165	0.05	0.06	0.06	16.80	17.70	17.60
170	0.05	0.05	0.05	16.60	18.60	18.50
175	0.03	0.05	0.04	16.40	18.10	18.00
180	0.03	0.04	0.03	16.50	17.90	18.10
185	0.03	0.03	0.30	15.90	18.50	18.60
190	0.03	0.02	0.02	17.80	18.40	18.40
195	0.02	0.02	0.02	18.00	18.90	18.20
200	0.02	0.01	0.01	17.50	19.30	19.10
205	0.01	0.01	0.01	17.60	19.80	18.90
210	0.01	0.01	0.01	17.00	19.20	19.10
215	0.01	0.00	0.01	16.90	19.70	19.30
220	0.00	0.00	0.00	17.10	19.40	19.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวดโดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) โดยละเอียด

ระยะห่างระหว่างขดลวด	$I_{out}(AVG)$ (mA)	$V_{out}(AVG)$ (mV)	$P_{out}$ (W)	$P_{in}$ (W)	$\eta$ (%)
0	10.1633	121.3333	0.0012	0.0246	5.0189
5	7.8067	71.3333	0.0006	0.0246	2.2665
10	5.8367	47.1000	0.0003	0.0246	1.1189
15	4.3800	34.9000	0.0002	0.0246	0.6221
20	3.4067	30.4333	0.0001	0.0246	0.4220
25	2.8167	27.6000	0.0001	0.0246	0.3164
30	2.2900	25.5333	0.0001	0.0246	0.2380
35	1.8000	24.1333	0.0000	0.0246	0.1768
40	1.4733	23.3667	0.0000	0.0246	0.1401
45	1.2400	22.7667	0.0000	0.0246	0.1149
50	1.0433	21.5000	0.0000	0.0246	0.0913
55	0.8667	21.4333	0.0000	0.0246	0.0756
60	0.7267	21.0333	0.0000	0.0246	0.0622
65	0.6267	21.3000	0.0000	0.0246	0.0543
70	0.5400	20.6333	0.0000	0.0246	0.0453
75	0.4700	20.9333	0.0000	0.0246	0.0400
80	0.4233	20.9667	0.0000	0.0246	0.0361
85	0.3633	20.5000	0.0000	0.0246	0.0303
90	0.3300	19.4667	0.0000	0.0246	0.0261
95	0.2933	19.6667	0.0000	0.0246	0.0235
100	0.2600	20.6333	0.0000	0.0246	0.0218
105	0.2233	19.5333	0.0000	0.0246	0.0178
110	0.1967	17.7667	0.0000	0.0246	0.0142

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวดโดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) โดยละเอียด

ระยะห่างระหว่างขดลวด	$I_{out}$ (AVG) (mA)	$V_{out}$ (AVG) (mV)	$P_{out}$ (W)	$P_{in}$ (W)	$\eta$ (%)
115	0.1800	17.3333	0.0000	0.0246	0.0127
120	0.1600	17.9333	0.0000	0.0246	0.0117
125	0.1433	17.9500	0.0000	0.0246	0.0105
130	0.1300	18.0333	0.0000	0.0246	0.0095
135	0.1233	17.7000	0.0000	0.0246	0.0089
140	0.1133	17.8333	0.0000	0.0246	0.0082
145	0.1067	17.8333	0.0000	0.0246	0.0077
150	0.0967	19.4667	0.0000	0.0246	0.0077
155	0.0800	17.5000	0.0000	0.0246	0.0057
160	0.0700	17.6000	0.0000	0.0246	0.0050
165	0.0567	17.3667	0.0000	0.0246	0.0040
170	0.0500	17.9000	0.0000	0.0246	0.0036
175	0.0400	17.5000	0.0000	0.0246	0.0028
180	0.0333	17.5000	0.0000	0.0246	0.0024
185	0.1200	17.6667	0.0000	0.0246	0.0086
190	0.0233	18.2000	0.0000	0.0246	0.0017
195	0.0200	18.3667	0.0000	0.0246	0.0015
200	0.0133	18.6333	0.0000	0.0246	0.0010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวดโดยป้อนความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์

ตารางที่ 4.12 : ตารางบันทึกผลค่ากระแสและความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่ง

f (MHz)	I <sub>in</sub> (mA)			V <sub>in</sub> (V)		
	V <sub>DS</sub> (V)			V <sub>DS</sub> (V)		
	12.50	15.00	17.50	12.50	15.00	17.50
0.70	4.30	5.40	16.90	29.20	35.50	41.60
0.75	3.60	4.20	4.80	28.70	32.70	38.60
0.80	3.50	4.10	4.60	26.50	32.40	38.20
0.85	2.90	3.30	3.80	26.20	31.40	37.00
0.90	2.70	3.10	3.50	24.40	29.50	34.90
0.95	1.90	2.30	3.30	24.00	28.70	35.00
1.00	1.60	2.00	5.80	22.10	27.20	33.40
1.05	1.30	1.60	4.80	21.90	26.90	31.30
1.10	0.80	2.30	6.00	20.60	25.90	31.60
1.15	0.80	3.30	9.40	19.20	25.00	31.40
1.20	0.80	4.80	17.50	19.00	25.10	32.40
1.25	1.50	5.50	22.00	18.60	24.30	33.20
1.30	2.70	4.90	21.50	18.80	23.70	31.80
1.35	4.70	7.40	26.00	19.50	24.40	31.70

ตารางที่ 4.13 : ตารางบันทึกผลค่ากระแสและความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	I <sub>out</sub> (mA)			V <sub>out</sub> (mV)		
	V <sub>DS</sub> (V)			V <sub>DS</sub> (V)		
	12.50	15.00	17.50	12.50	15.00	17.50
0.70	19.86	23.79	27.05	69.00	81.00	117.00
0.75	18.25	21.90	25.44	62.90	77.00	95.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากระแสและความต่างศักย์ของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$I_{out}$ (mA)			$V_{out}$ (mV)		
	$V_{DS}$ (V)			$V_{DS}$ (V)		
	12.50	15.00	17.50	12.50	15.00	17.50
0.80	16.86	20.33	23.69	64.00	67.00	81.00
0.85	15.57	18.73	21.89	65.00	71.00	77.00
0.95	13.32	16.07	18.85	57.50	65.00	61.30
1.00	12.33	14.91	17.70	56.70	59.80	68.00
1.05	11.32	13.77	16.46	62.60	60.70	70.00
1.10	10.54	12.83	15.31	56.60	57.70	61.00
1.15	9.77	12.05	14.63	51.00	55.10	65.00
1.20	9.00	11.39	14.20	57.90	60.40	80.00
1.25	8.33	10.63	13.59	56.60	59.20	97.00
1.30	7.91	9.94	13.18	53.20	55.20	83.00
1.35	7.57	9.59	12.30	53.20	52.30	79.00

ตารางที่ 4.14 : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่งและสัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	$P_{in}$ (W)			$P_{out}$ (W)		
	$V_{DS}$ (V)			$V_{DS}$ (V)		
	12.50	15.00	17.50	12.50	15.00	17.50
0.70	0.1256	0.1917	0.7030	0.0014	0.0019	0.0032
0.75	0.1033	0.1373	0.1853	0.0011	0.0017	0.0024
0.80	0.0928	0.1328	0.1757	0.0011	0.0014	0.0019
0.85	0.0760	0.1036	0.1406	0.0010	0.0013	0.0017
0.90	0.0659	0.0915	0.1222	0.0009	0.0012	0.0014

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของขดลวดตัวส่งและ  
สัญญาณขาออกของขดลวดตัวรับ

f (MHz)	P <sub>in</sub> (W)			P <sub>out</sub> (W)		
	V <sub>DS</sub> (V)			V <sub>DS</sub> (V)		
	12.50	15.00	17.50	12.50	15.00	17.50
0.95	0.0456	0.0660	0.1155	0.0008	0.0010	0.0012
1.00	0.0354	0.0544	0.1937	0.0007	0.0009	0.0012
1.05	0.0285	0.0430	0.1502	0.0007	0.0008	0.0012
1.10	0.0165	0.0596	0.1896	0.0006	0.0007	0.0009
1.15	0.0154	0.0825	0.2952	0.0005	0.0007	0.0010
1.20	0.0152	0.1205	0.5670	0.0005	0.0007	0.0011
1.25	0.0279	0.1337	0.7304	0.0005	0.0006	0.0013
1.30	0.0508	0.1161	0.6837	0.0004	0.0005	0.0011
1.35	0.0917	0.1806	0.8242	0.0004	0.0005	0.0010

ตารางที่ 4.15 : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด

f (MHz)	$\eta$ (%)		
	V <sub>DS</sub> (V)		
	12.50	15.00	17.50
0.70	1.0914	1.0052	0.4502
0.75	1.1110	1.2278	1.3044
0.80	1.1634	1.0254	1.0920
0.85	1.3320	1.2834	1.1988
0.90	1.3960	1.3068	1.1456
0.95	1.6796	1.5824	1.0004
1.00	1.9771	1.6390	0.6213
1.05	2.4890	1.9420	0.7669

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานของขดลวด

f (MHz)	$\eta$ (%)		
	$V_{DS}$ (V)		
	12.50	15.00	17.50
1.10	3.6199	1.2427	0.4926
1.15	3.2439	0.8048	0.3222
1.20	3.4283	0.5710	0.2004
1.25	1.6899	0.4709	0.1805
1.30	0.8290	0.4725	0.1600
1.35	0.4394	0.2778	0.1179

#### 4.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวดโดยป้อนความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์

ตารางที่ 4.16 : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวดโดยป้อนความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์

ระยะห่าง ระหว่าง ขดลวด	$I_{out}$ (mA)			$V_{out}$ (mV)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	8.47	8.50	8.61	60.50	82.00	89.00
5	6.57	6.64	6.70	50.20	70.00	66.00
10	4.91	4.91	5.01	42.20	57.80	55.70
15	3.60	3.61	3.71	43.70	52.30	46.70
20	2.91	2.87	2.92	44.20	53.30	43.60
25	2.33	2.33	2.35	45.80	47.20	47.40
30	1.89	1.89	1.92	46.30	48.00	40.30
35	1.50	1.50	1.51	43.00	48.80	40.40
40	1.23	1.24	1.25	42.80	52.00	40.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวดโดยป้อนความถี่ จากวงจรออสซิลเลเตอร์

ระยะห่าง ระหว่าง ขดลวด	$I_{out}$ (mA)			$V_{out}$ (mV)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
45	1.03	1.04	1.05	41.50	45.70	39.40
50	0.87	0.88	0.88	47.20	47.50	39.80
55	0.73	0.73	0.73	39.90	46.20	45.60
60	0.60	0.61	0.60	39.20	38.60	46.30
65	0.51	0.51	0.52	42.60	41.20	46.20
70	0.44	0.44	0.44	43.10	41.40	59.50
75	0.37	0.37	0.37	42.00	36.90	56.40
80	0.31	0.31	0.30	45.70	37.80	39.50
85	0.26	0.26	0.26	42.50	38.30	34.70
90	0.22	0.22	0.22	41.10	36.00	40.20
95	0.18	0.19	0.19	43.00	37.00	38.90
100	0.15	0.15	0.15	44.40	40.70	37.40
105	0.10	0.11	0.11	44.10	37.00	35.70
110	0.07	0.09	0.09	44.90	34.10	36.20
115	0.06	0.06	0.06	42.70	38.40	35.70
120	0.04	0.05	0.05	43.30	38.70	38.90
125	0.03	0.04	0.03	46.20	46.30	50.20
130	0.02	0.02	0.02	40.20	45.10	44.60
135	0.01	0.01	0.01	38.30	48.40	44.90
140	0.01	0.00	0.01	47.90	44.80	44.20
145	0.01	0.00	0.01	47.50	46.80	45.30
150	0.01	0.00	0.00	50.40	48.20	48.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวด โดยป้อนความถี่จาก วงจรออสซิลเลเตอร์

ระยะห่าง ระหว่าง ขดลวด	$I_{out}(AVG)$ (mA)	$V_{out}(AVG)$ (mV)	$P_{out}$ (W)	$P_{in}$ (W)	$\eta$ (%)
0	8.5267	77.1667	0.0007	0.0165	3.9926
5	6.6367	62.0667	0.0004	0.0165	2.4995
10	4.9433	51.9000	0.0003	0.0165	1.5568
15	3.6400	47.5667	0.0002	0.0165	1.0506
20	2.9000	47.0333	0.0001	0.0165	0.8276
25	2.3367	46.8000	0.0001	0.0165	0.6636
30	1.9000	44.8667	0.0001	0.0165	0.5173
35	1.5033	44.0667	0.0001	0.0165	0.4020
40	1.2400	45.0000	0.0001	0.0165	0.3386
45	1.0400	42.2000	0.0000	0.0165	0.2663
50	0.8767	44.8333	0.0000	0.0165	0.2385
55	0.7300	43.9000	0.0000	0.0165	0.1945
60	0.6033	41.3667	0.0000	0.0165	0.1514
65	0.5133	43.3333	0.0000	0.0165	0.1350
70	0.4400	48.0000	0.0000	0.0165	0.1282
75	0.3700	45.1000	0.0000	0.0165	0.1013
80	0.3067	41.0000	0.0000	0.0165	0.0763
85	0.2600	38.5000	0.0000	0.0165	0.0607
90	0.2200	39.1000	0.0000	0.0165	0.0522
95	0.1867	39.6333	0.0000	0.0165	0.0449
100	0.1500	40.8333	0.0000	0.0165	0.0372
105	0.1067	38.9333	0.0000	0.0165	0.0252
110	0.0833	38.4000	0.0000	0.0165	0.0194
115	0.0600	38.9333	0.0000	0.0165	0.0142
120	0.0467	40.3000	0.0000	0.0165	0.0114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

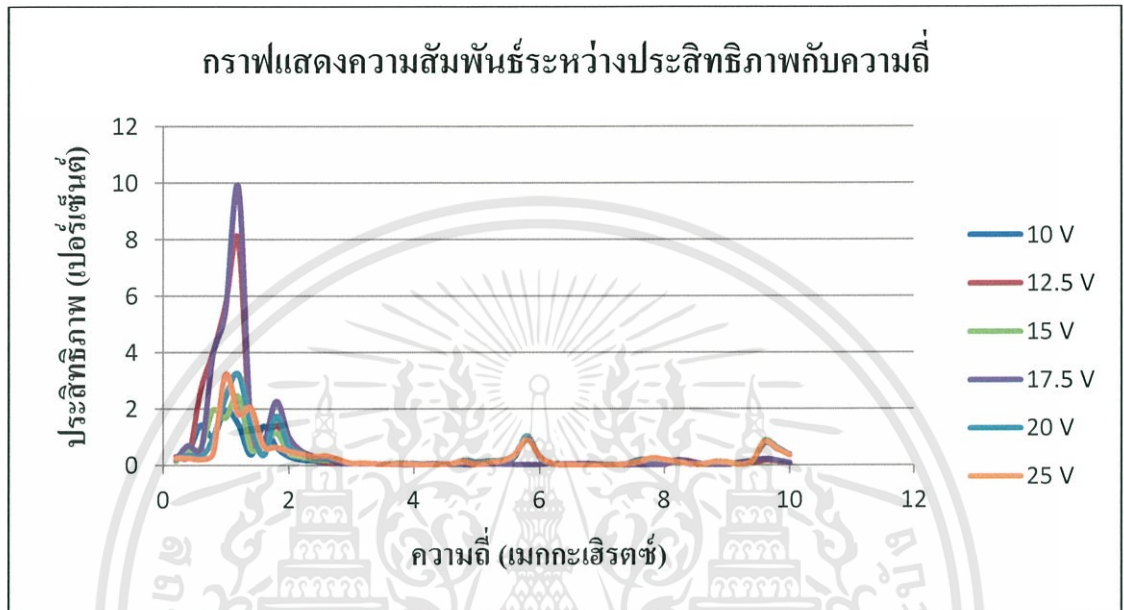
ตารางที่ 4.17 (ต่อ) : ตารางบันทึกผลการทดลองการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวดโดยป้อนความถี่ จากวงจรออสซิลเลเตอร์

ระยะห่าง ระหว่าง ขดลวด	$I_{out}(AVG)$ (mA)	$V_{out}(AVG)$ (mV)	$P_{out}$ (W)	$P_{in}$ (W)	$\eta$ (%)
125	0.0333	47.5667	0.0000	0.0165	0.0096
130	0.0200	43.3000	0.0000	0.0165	0.0053
135	0.0100	43.8667	0.0000	0.0165	0.0027
140	0.0067	45.6333	0.0000	0.0165	0.0018
145	0.0067	46.5333	0.0000	0.0165	0.0019
150	0.0033	49.0000	0.0000	0.0165	0.0010

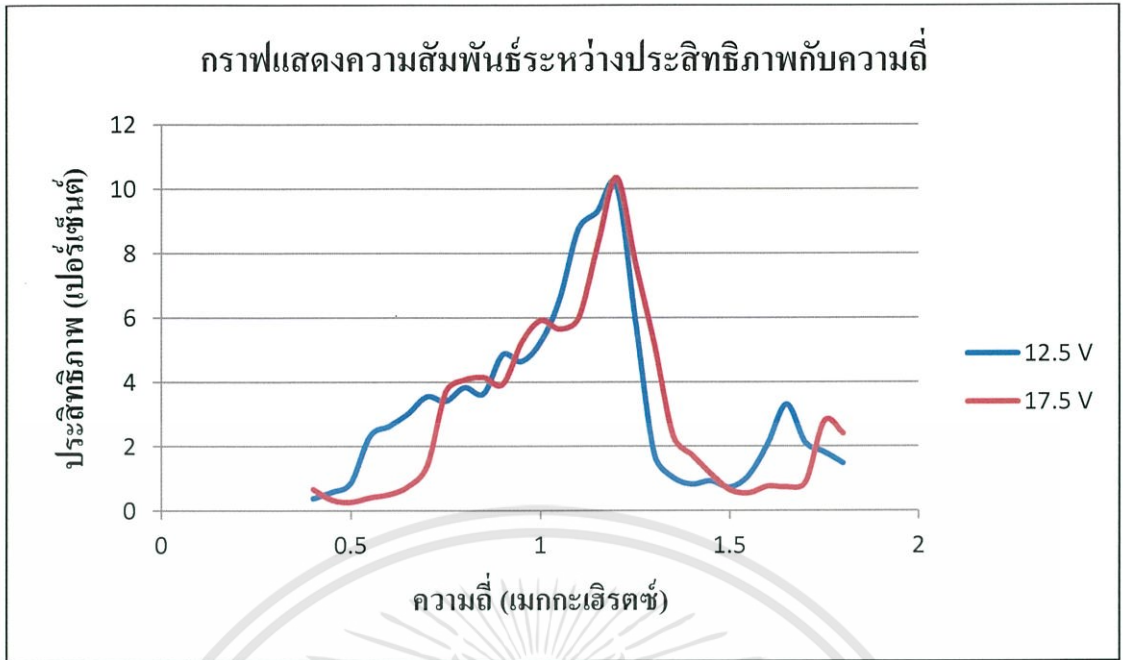
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวด

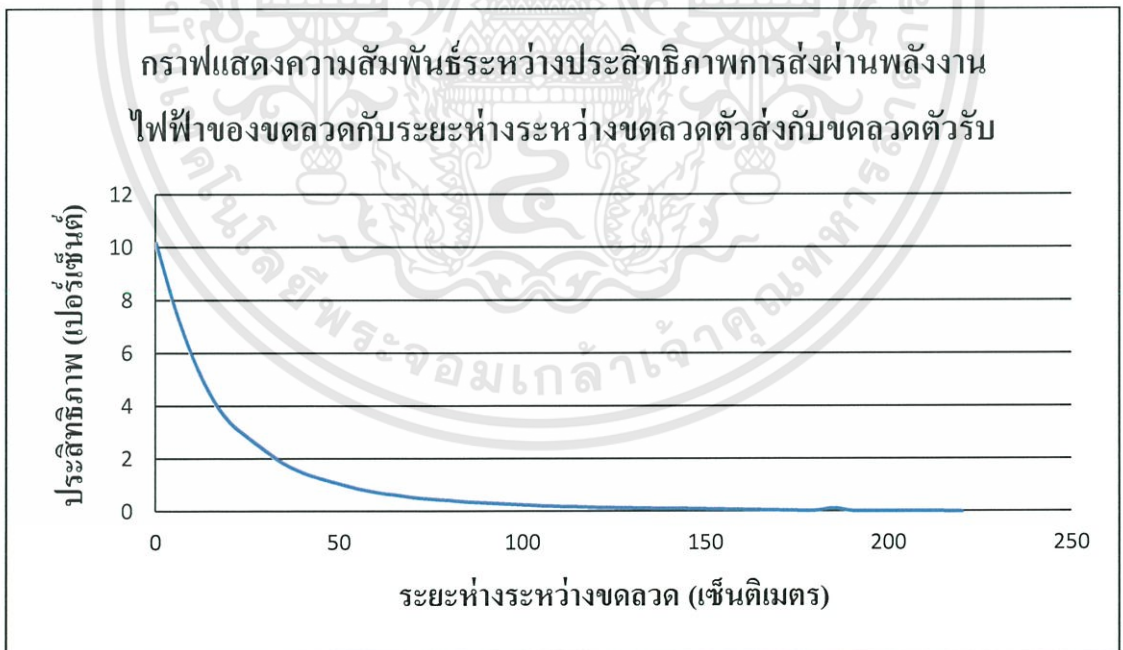
### 4.5.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวดโดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณพิก้า (Function Generator)



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวดกับความถี่ ที่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ต่างๆ โดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณพิก้า (Function Generator)



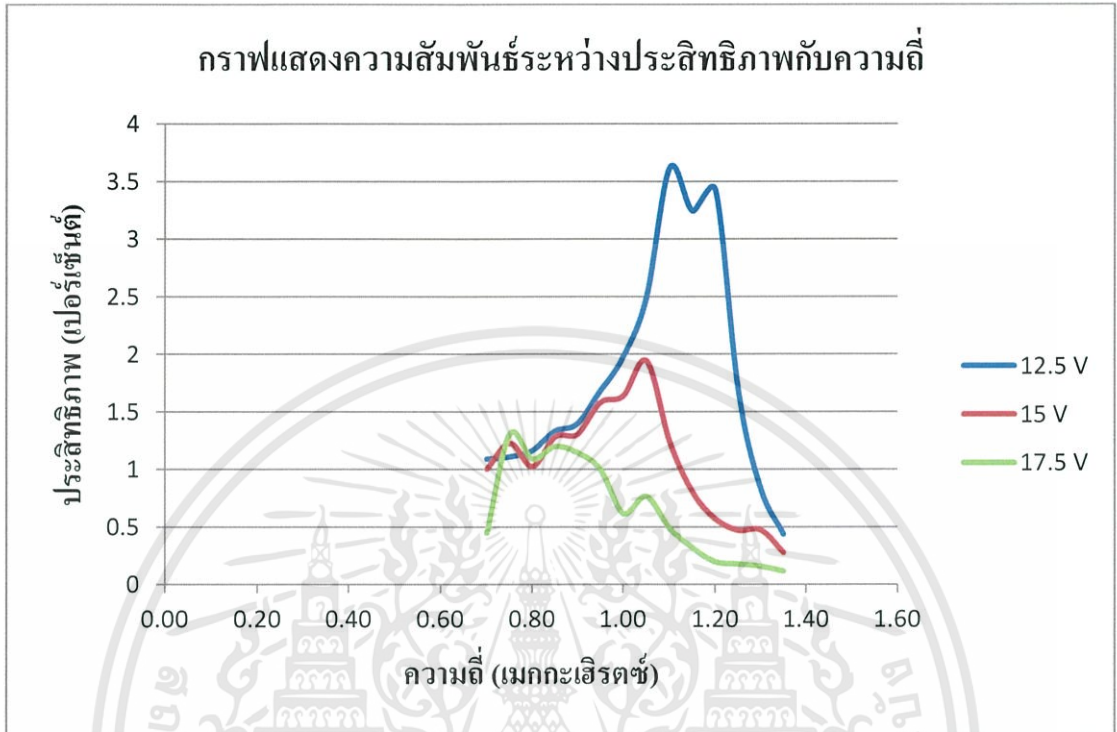
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวดกับความถี่ ที่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ต่างๆ อย่างละเอียด โดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator) (เพิ่มความถี่ครั้งละ 50 kHz)



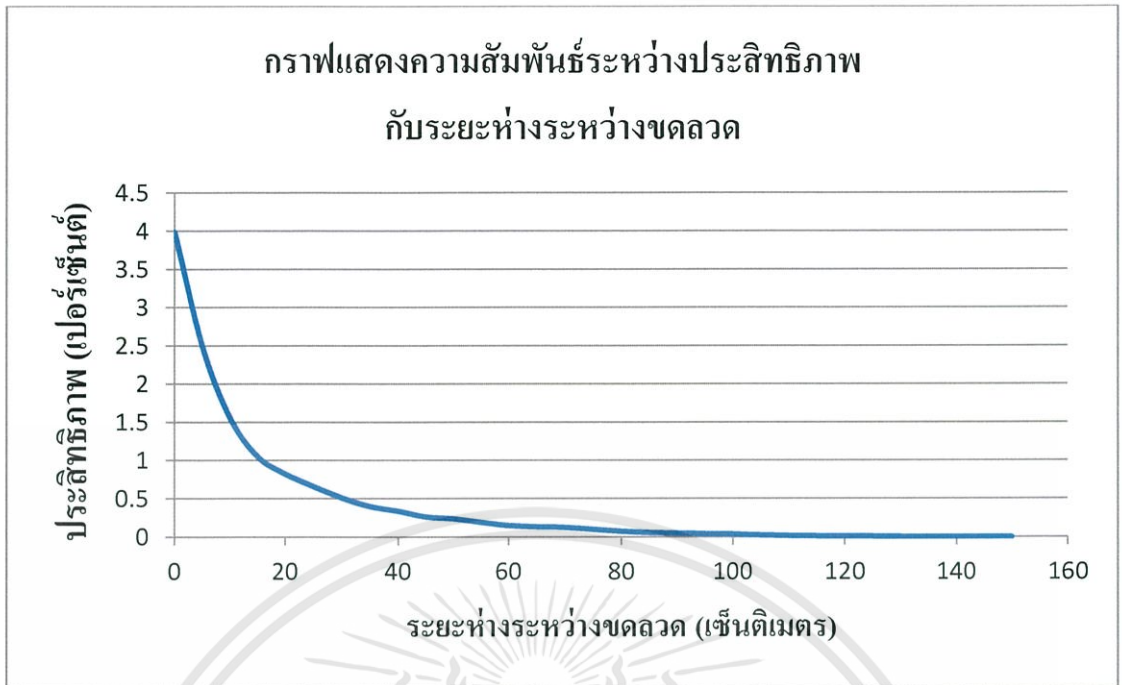
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวดกับระยะห่างระหว่างขดลวดตัวส่งกับขดลวดตัวรับ โดยป้อนความถี่จากเครื่องสร้างสัญญาณนาฬิกา (Function Generator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวดโดยป้อนความถี่จาก วงจรออสซิลเลเตอร์



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวดกับความถี่ที่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ต่างๆ โดยป้อนความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวดกับระยะห่างระหว่างขดลวดตัวส่งกับขดลวดตัวรับ โดยป้อนความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์

## บทที่ 5

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 ผลการทดลอง

จากการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สาย ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำของขดลวดตัวส่งกับขดลวดตัวรับ โดยทำการทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวดโดยการป้อนความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณนาฬิกา ที่ความถี่ในช่วง 0.2 – 10 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{DS}$ ) ในช่วง 10 – 25 โวลต์ พบว่าที่แรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 17.5 โวลต์ ที่ความถี่ 1.2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ได้ค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานของขดลวดที่ดีที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.3609 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดลองการส่งผ่านพลังงานของขดลวด โดยการป้อนความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์ในช่วง 0.75 – 1.35 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่แรงดันไฟฟ้าในช่วง 12.5 – 17.5 โวลต์ พบว่ามีค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานของขดลวดที่ดีที่สุด ที่แรงดันไฟฟ้า 12.5 โวลต์ ความถี่ 1.1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.9925 เปอร์เซ็นต์

จากการทดลองทำให้ทราบว่าความถี่และแรงดันไฟฟ้า มีผลต่อประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สาย



**ภาคผนวก**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Wireless Power Transmission Using Magnetic Resonance

Mandip Jung Sibakoti and Joey Hambleton  
Cornell College PHY312, December 2011, Professor Derin Sherman

## 1. INTRODUCTION

Our project was based upon a MIT published paper in the year 2007 titled “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances” [1]. The project was researched by former Cornell students Lucas Jorgensen and Adam Culberson in the year 2008 [2].

During the course of this research, we investigated the need and usefulness of wireless power transmission and the feasibility of using magnetic inductive coupling as the means for wireless power transmission. The paper will outline our design process and the logical steps we took in the experimentation and design of our circuits. The first section of the document will explicitly illustrate the goals we set to accomplish during the allotted time frame of three and a half weeks. With the complexity of the problem in mind and what we must accomplish, our team began research on the available means to transmit power without a physical connection.

### 1.1 HISTORY

Previous schemes for wireless power transmission included attempts by the late scientist Nikola Tesla and the Microwave power transmission. Both Tesla's design and the later microwave power were forms of radiative power transfer. Radiative transfer, used in wireless communication, is not particularly suitable for power transmission due to its low efficiency and radiative loss due to its omnidirectional nature. An alternative approach was pursued by a MIT team that exploited some near field interaction between the source and device so that efficient power transfer was possible. The approach was evanescent wave coupling.

### 1.2 THEORITICAL BACKGROUND

The principle of Evanescent Wave Coupling extends the principle of Electromagnetic induction. Electromagnetic induction works on the principle of a primary coil generating a predominantly magnetic field and a secondary coil being within that field so a current is induced within its coils. This causes the relatively short range due to the amount of power required to produce an electromagnetic field. Over greater distances the non-resonant induction method is inefficient and wastes much of the transmitted energy just to increase range. This is where the resonance comes in and helps the efficiency dramatically by "tunneling" the magnetic field to a receiver coil that resonates at the same frequency.

Theoretical analysis shows that by sending electromagnetic waves around in a highly angular waveguide<sup>1</sup>, evanescent waves are produced which carry no energy. If a proper resonant waveguide is brought near the transmitter, the evanescent waves can allow the energy to tunnel to the power drawing waveguide, where they can be rectified into DC power. Since the electromagnetic waves would tunnel, they would not propagate through the air to be absorbed or be dissipated, and would not disrupt electronic devices or cause physical injury.

### 1.3 INTENDED GOALS

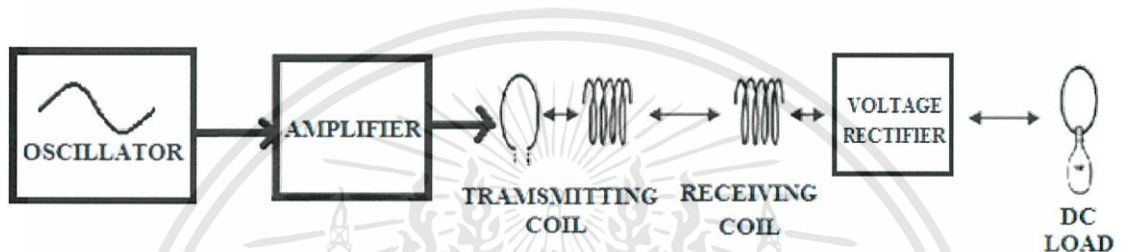
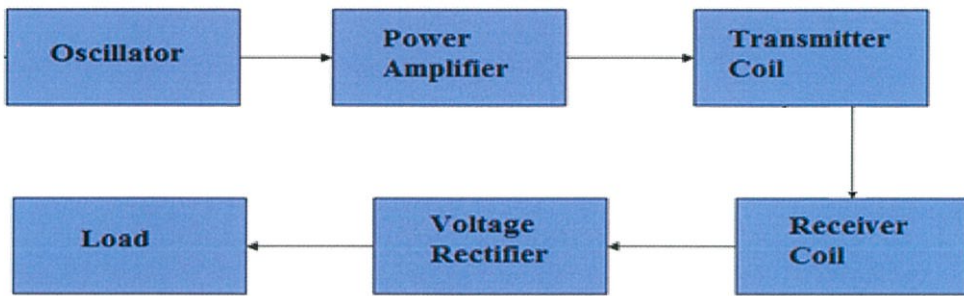
Our primary goal was to be able to wirelessly transfer power (in watts) of an AC oscillating waveform into a DC voltage on the receiving end, which could be used to power an electrical load (in watts) to demonstrate instantaneous power transfer. To do this, we intended to design a tunable oscillator capable of generating frequency in the RF band (1MHz – 20 MHz) and a power amplifier to supply enough power to be transmitted for powering the electrical load. In addition to this, we also intended to demonstrate the evanescent waves by the illustration of an exponential relationship of power transmitted to the receiver as a function of distance of separation between the receiver and transmitter coils.

## 2. SYSTEM DESIGN

With all the necessary background research completed it became clear what basic design components the entire system would require. First we needed a method to design an oscillator, which would provide the carrier signal with which to transmit the power. Oscillators are not generally designed to deliver power, thus it was necessary to create a power amplifier to amplify the oscillating signal. The power amplifier would then transfer the output power to the transmission coil. Next, a receiver coil would be constructed to receive the transmitted power. However, the received power would have an alternating current, which is undesirable for powering a DC load. Thus, a rectifier would be needed to rectify the AC voltage to output a clean DC voltage. Finally, an electric load would be added to complete the circuit design

---

<sup>1</sup> A **waveguide** is a structure which guides waves, such as electromagnetic waves. There are different types of waveguides for each type of wave. The original and most common meaning is a hollow conductive metal pipe used to carry high frequency radio waves. (in our case the copper tube as in the figure).



## 2.1 OSCILLATOR

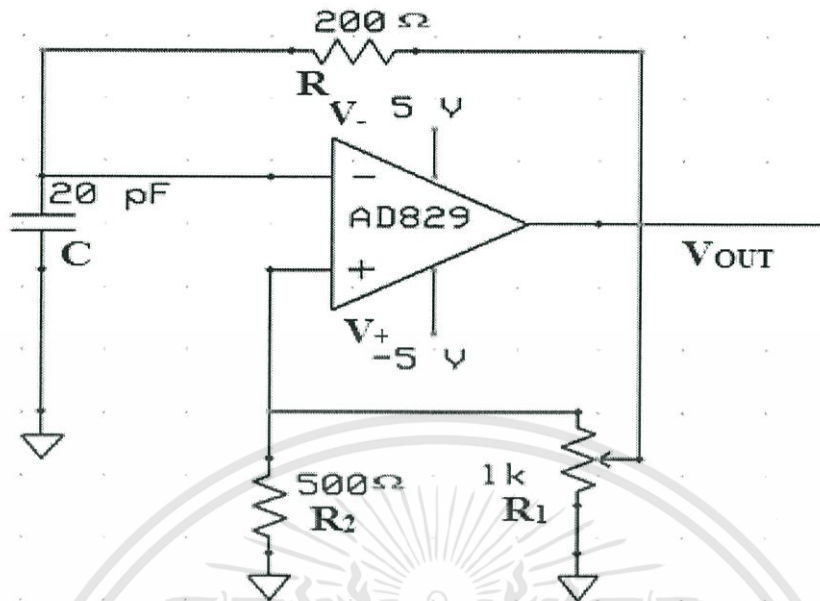
There are two general classes of oscillators: sinusoidal and relaxation. Op-Amp sinusoidal oscillators operate with some combination of positive and negative feedback to drive the op-amp into an unstable state, causing the output to transition back and forth at a continuous rate. Relaxation Op-Amp oscillators operate with a capacitor, a resistor or a current source to charge/discharge the capacitor, and a threshold device to induce oscillation.

The oscillator design that we utilized was a relaxation oscillator using a single Operational amplifier. This oscillator was a Square Wave Generator and could be classified in the category as an astable multivibrator.

### 2.1.1 DESIGN

In the design of a Relaxation oscillator, as shown in the figure below, we used a high speed Operational amplifier, AD829, which had a very high frequency response of 120 MHz. The operational amplifier was connected in a Schmitt-trigger<sup>2</sup> configuration with positive feedback through a resistor of 500 Ohms and a variable resistor of 1K. The inverting input for the Op-Amp was biased with a capacitor of 20pF and a resistor of 200 Ohms.

<sup>2</sup> For the reference of the configuration, link: [http://en.wikipedia.org/wiki/Schmitt\\_trigger](http://en.wikipedia.org/wiki/Schmitt_trigger)



### WORKING PRINCIPLE:

Initially, the non-inverting input at the Op-Amp is biased at a voltage of  $V_{OUT} * R_2 / (R_2 + R_1)$  and the op-amp's output is saturated at that particular voltage level. Since the op-amp always attempts to keep both its inverting and the non-inverting inputs,  $V_+$  and  $V_-$  equal to each other, the feedback causes the 20pF capacitor to charge and make the value of  $V_-$  equal to  $V_+$ . When  $V_-$  reaches the value of  $V_+$ , a switch to negative saturation at the output occurs and the capacitor begins to discharge. The charging and discharging of the oscillator effectively causes an oscillating signal to the output.

The general equation for charging a capacitor is given by:

$$q = CV(1 - e^{-t/RC}) + q_0e^{-t/RC}$$

In this case,  $V$  is  $-V_{OUT}$ , and if the voltage at  $V_+$  is called  $\lambda V_{OUT}$ ,  $q_0$  becomes  $CV_{OUT}$ .

The charging equation then becomes

$$q = -CV_{OUT}(1 - e^{-t/RC}) + \lambda CV_{OUT}e^{-t/RC}$$

When  $q$  gets to  $-\lambda V_{OUT}$ , another switch will occur. This time it is half the period of the square wave. Therefore:

$$-\lambda CV_{OUT} = -CV_{OUT}(1 - e^{-t/RC}) + \lambda CV_{OUT}e^{-t/RC}$$

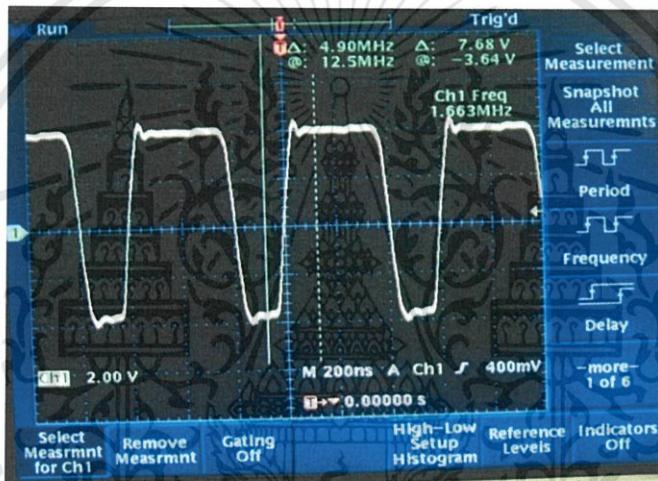
Solving for  $T$  gives:

$$T = 2RC * \ln\left[\frac{1+\lambda}{1-\lambda}\right] \quad \text{where} \quad \lambda = \frac{R_2}{R_2+R_1}$$

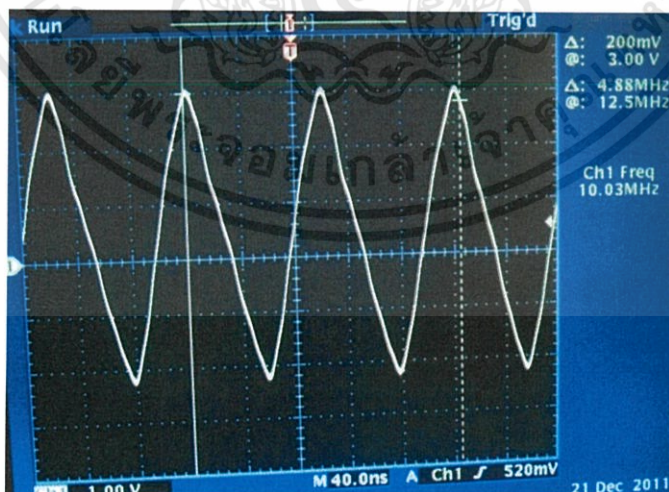
The frequency of oscillation can be determined by  $\frac{1}{T}$ . In our case, the variable resistor  $R_1$  could be varied using a 1K pot which was able to tune the frequency from 1.6 MHz to 10.3 MHz.

### 2.1.2 RESULTS

The figure below shows the signal output from the signal generator at frequencies tuned by varying the resistance using the 1K pot. The signal was very stable and free of any extraneous noise that may have caused distortion or ringing in the signal.



At frequency range from 1.6 MHz – 3.85 MHz, the signal was a square wave.



At frequencies range from 3.85 MHz – 10.3 MHz, the signal looked like a triangle wave.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 DESIGN DETAILS

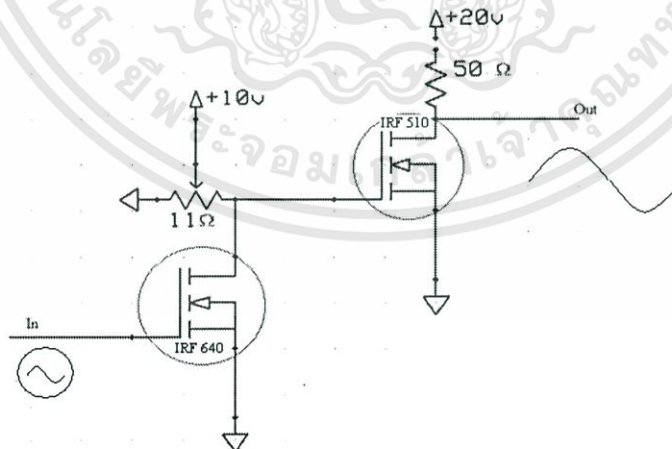
The challenges encountered during the design of the oscillator were the selection of the oscillator design and the Op-Amp chip required to produce a stable and symmetrical oscillating signal. We had experimented with IC Logic chips and low frequency response Op-Amp chips for the design of the oscillator. However, the oscillation signal output from these circuit configurations was not stable or symmetrical. We also initially had problems with distortion of the signal by the unstable power supply from the PCB board and other extraneous noise at high frequencies. We dealt with this problem by neatly laying out the relaxation oscillator circuit using shorter wires and the placing two decoupling capacitors of one microfarads each between the positive and negative power supply to the ground.

## 2.2 POWER AMPLIFIER

In order to generate the maximum amount of flux which would induce the largest voltage on the receiving coil, a large amount of current must be transferred into the transmitting coil. The oscillator was not capable of supplying the necessary current, thus the output signal from the oscillator was passed through a power amplifier to produce the necessary current. The key design aspect of the power amplifier was to generate enough current while producing a clean output signal without large harmonic distortions. For this purpose, we utilized a simple switch-mode amplifier design whose design aspects are described below.

### 2.1.1 DESIGN

The main idea behind the switch-mode Power Amplifier technology is to operate a MOSFET in saturation so that either voltage or current is switched on and off. The figure below shows the circuit diagram of the switch-mode power amplifier.



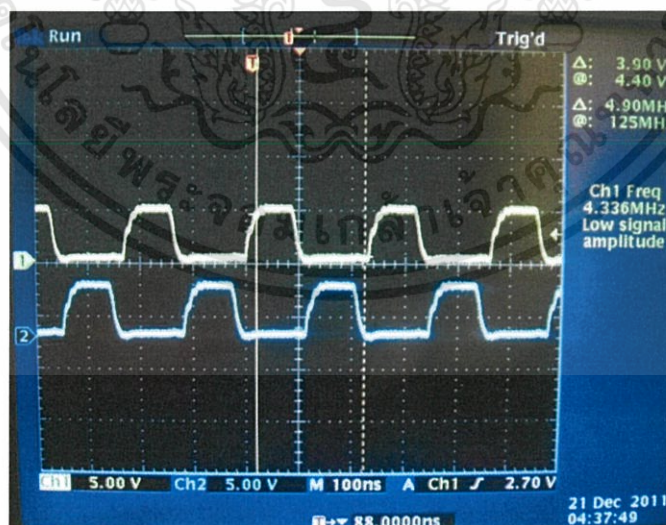
Our switch-mode design consisted of a MOSFET IRF 510, which when turned on allowed large current from the DC power supply to flow through the resistor of 50 Ohms and through the transmitting antenna to transfer current from the power supply through the transmitting coil. The large current from the transmitting coil was able to

generate a large flux to induce a high voltage in the receiving coil. The current and voltage required to drive the gate of the MOSFET IRF 510 was supplied by the MOSFET IRF 640 whose gate was driven by the input signal from a Hewlett Packard signal generator. The maximum voltage when the coils were tuned at resonance was recorded to be around 102.3V.

### 2.1.2 DESIGN DETAILS

Since our single op-amp relaxation oscillator was using an AD 829 chip, it was not able to source enough current to drive the Mosfet IRF 510 or control the amplitude of the output signal. For this reason, we employed the Hewlett Packard 3310A Function Generator as our oscillator. The signal generator was capable of supplying current and voltage required for driving the gate of the IRF640. Furthermore, using the signal generator, we were also able to set the DC bias voltage and tune the output voltage to get maximum voltage out.

The major challenge while designing the power amplifier circuit was to drive the gate of the Mosfet IRF 510 to switch the Mosfet on. Our initial approach was to design a class D amplifier to drive a H-Bridge<sup>3</sup> configuration (which meant driving 4 IRF 510 Mosfet) for an efficient power amplification using a single positive power supply. The H-Bridge<sup>4</sup> required two digital signals that were 180 degrees out of phase with a small dead-time in between the signals. The whole second week we were working on trying to generate these signals as inputs to the H-bridge. In generating these signals, we encountered problems with our comparator chips to output noise free digital signals at high frequency (5 MHz range). Using 2 high speed comparators, LT1016, and introducing terminating resistances (68 Ohm) in series to the output, we were able to output digital signals 180 out of phase with a small dead time for the input to the H-Bridge.



<sup>3</sup> For the reference of the configuration, link: <http://mcmanis.com/chuck/robotics/tutorial/h-bridge/>

However, the signal output from the comparators as can be seen from the image above was unable to turn the Mosfet IRF 510 on. The comparator could not source enough current to drive the gate of the Mosfet to turn on at a frequency range of around 5 MHz.

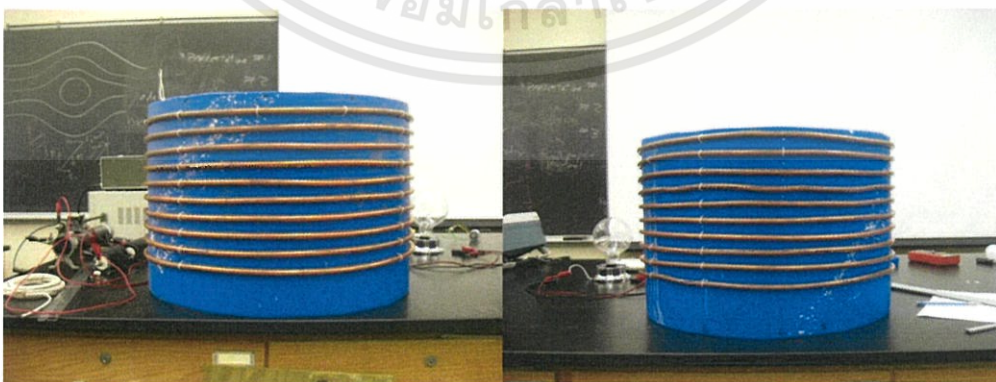
### 2.3. TRANSMITTER AND RECEIVER COILS

The transmitter and receiver circuit combined is called the coupling circuit. It is the heart of the entire system as the actual wireless power transfer is carried out here. The efficiency of the coupling circuit determines the amount of power available for the receiver system.

#### 2.1.1. DESIGN

The transmitter and receiver coils were designed by former Cornell students, Lucas Jorgensen and Adam Culberson. The coils had a resonant frequency of 4.8 – 5.3 MHz, which could be tuned with our oscillator (later a signal generator) to get to the resonance frequency of the coils. The basic configuration of the design can be seen from the table and the image below.

Transmitting Coil	No of turns	10
	Diameter of each turn	60.32 cm
	Diameter of copper tube	0.95 cm
Receiving Coil	No of turns	10
	Diameter of each turn	60.32 cm
	Diameter of copper tube	0.95 cm
Transmitting Antenna	No of turns	1
	Diameter of each turn	56.1 cm
	Diameter of copper wire	0.23 cm
Receiving Antenna	No of turns	2
	Diameter of each turn	44.6 cm
	Diameter of copper wire	0.23 cm



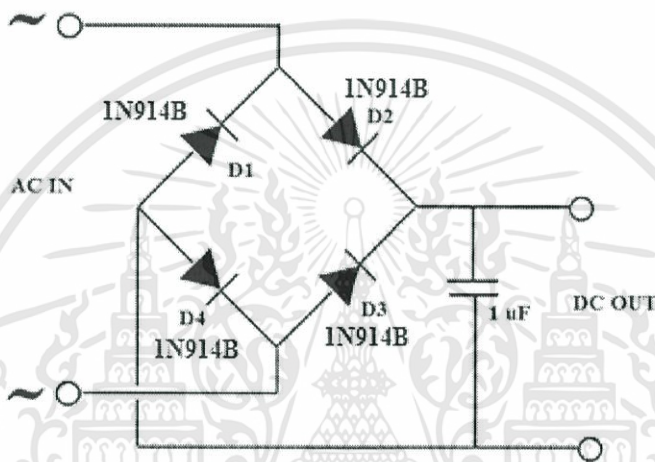
**Transmitting Coil (with a loop antenna)**

**Receiving Coil (with 2 loops of antenna)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 VOLTAGE RECTIFIER:

A rectifier would be needed to rectify the AC voltage received from the receiver coil to drive a DC load. A type of circuit that produces an output waveform that generates an output voltage which is purely DC or has some specified DC component is a Full Wave Bridge Rectifier. This type of single phase rectifier uses four individual rectifying diodes connected in a closed loop "bridge" configuration to produce the desired output. The smoothing capacitor connected to the bridge circuit converts the full-wave rippled output of the rectifier into a smooth DC output voltage.



Since the diodes had to rectify AC signals of Megahertz frequencies, fast signal diodes, 1N914B, had to be used for the bridge circuit. However we did not implement this circuit with our final setup as we did not drive a DC load with our setup.

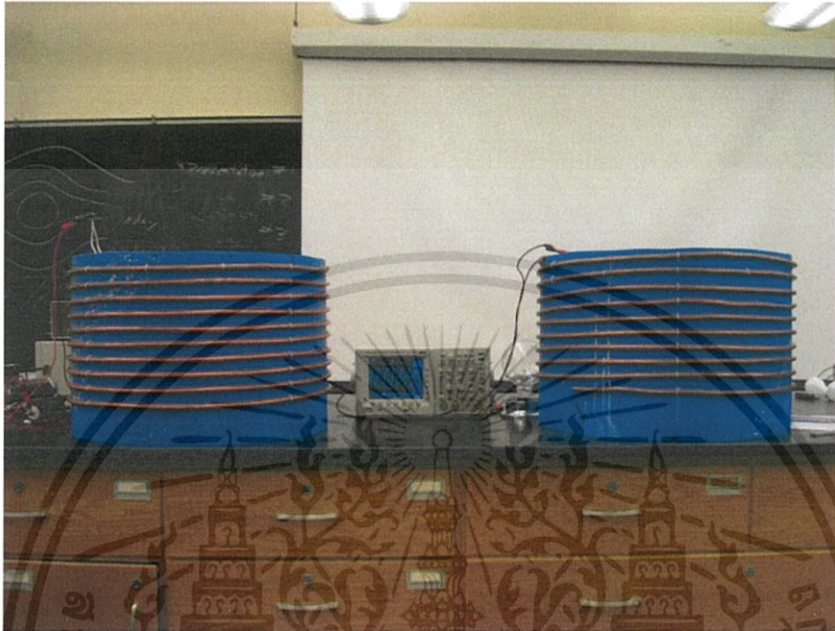
## 3. RESULTS AND MEASUREMENTS:

At a distance of 0.18 cm between the two coils, we were able to transmit enough power to power a 40 W light bulb. As the distance of separation between the coils was increased, the bulb got dimmer. It was evident from this simple experiment itself that the power transmitted was related to the distance of separation between the coils.

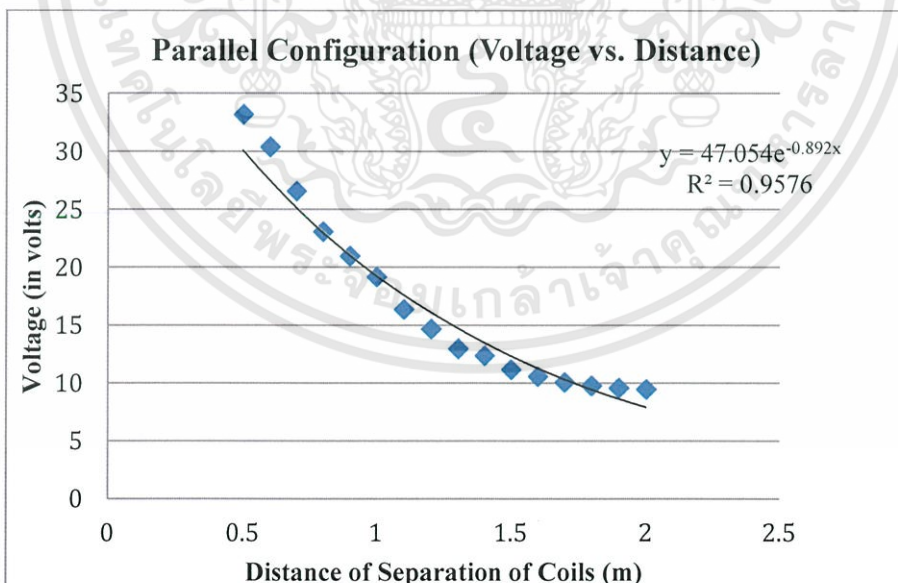
To demonstrate the presence of evanescent waves being produced which transferred power from the transmitter coil to the receiver coil, we measured the voltage across the 40 Watt light bulb at varying distances and orientations. We took measurements starting at a distance of 0.5 m between the coils in 10 cm increments up to a distance of 2 m of separation. We found that the resonant frequency changed with distance due to the imperfect match in the resonant frequencies of our coils. The frequency was then adjusted to find the maximum output voltage at every measurement.

### PARALLEL CONFIGURATION:

The coils were arranged in the configuration as shown below and voltage measurements were taken as a function of distance between the coils.



Based upon the data we collected, the following graph shows voltage as a function of distance between the coils.

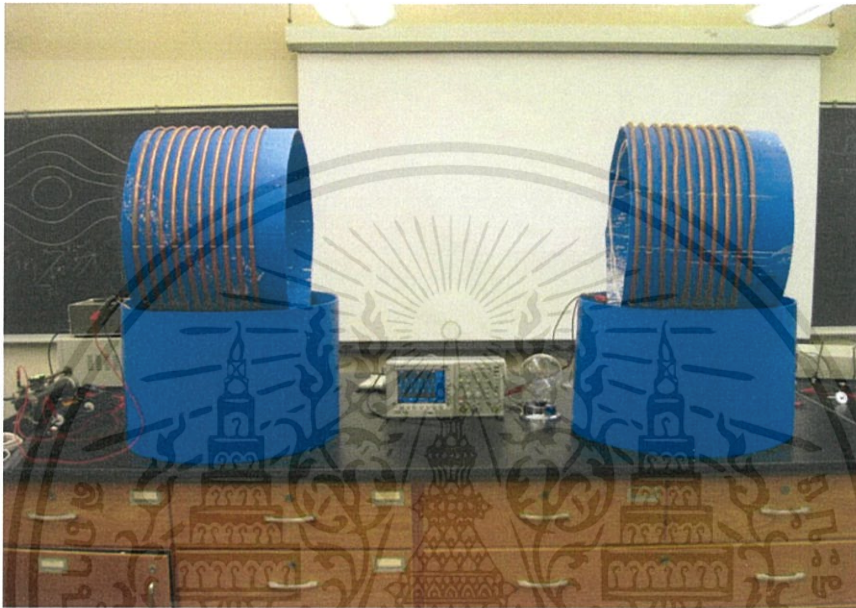


Since the coefficient of determination ( $R^2$ ) has a value close to 1 for the exponential fit, the data points were strongly exponentially correlated. In other words, the voltage decayed exponentially as the distance of separation between the coils was increased. This

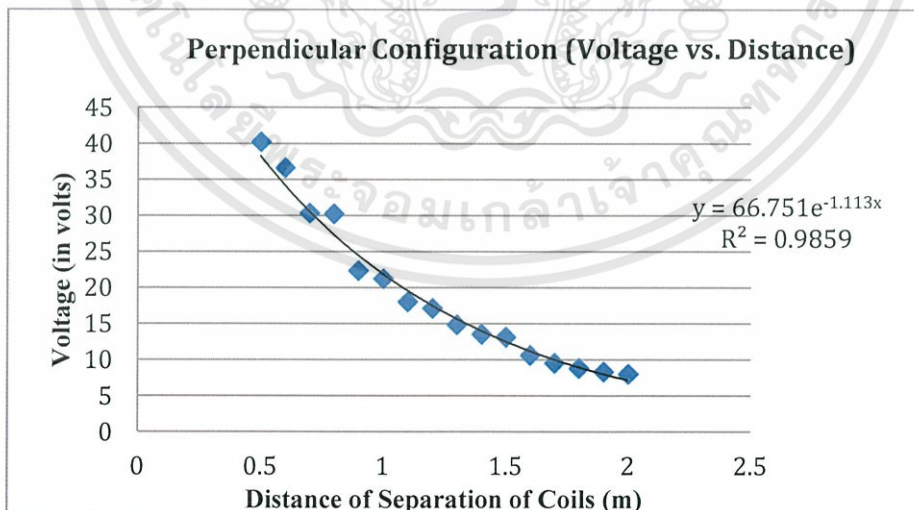
illustrates the theory of power transmitted through evanescent waves that decay exponentially as the distance between the coils was increased.

Similar observation of exponential fit was observed when the coils were faced perpendicular to each other as shown below.

### PERPENDICULAR CONFIGURATION:



Based upon the data we collected, the following graph shows voltage as a function of distance between the coils.



In this case, the value of the coefficient of determination ( $R^2$ ) is closer to 1 than when the coils were placed parallel to each other. The strong exponential correlation in this case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

also illustrates the exponential decay of evanescent waves propagating from the transmitting coil to the receiving coil.

#### 4. CONCLUSION AND FUTURE WORK:

At the end of the research, we were able to design a system for transmitting watts of power wirelessly from the transmitting coil to the receiving coil that was enough to light a 40W bulb. We were able to design discrete components such as the relaxation oscillator, switch mode-power amplifier and a full bridge voltage rectifier for the system design process. We also managed to demonstrate evanescent waves by measuring exponential decay of voltage as an increase in distance between the transmitter and the receiver coils.

There can be significant research work that can be done in the future of this research. Future work includes connecting the relaxation oscillator with the power amplifier using current amplifier chip for providing enough current to drive the gate of the Mosfet to drive the efficient class D H-Bridge power amplifier. Also, reduction in the size of the transmitting and receiving coils and utilizing the regulated signal to power a DC load could be something that could be worked in the future as a means to make this system feasible for practical applications.

#### 5 REFERENCES:

##### 5.1 ORIGINAL MIT PAPER:

[1] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljacic. 2008. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. Science. <http://www.sciencemag.org/cgi/rapidpdf/1143254?ijkey=94ff.Ay4jRMqU&keytype=ref&siteid=sci> (accessed December 5, 2011).

##### 5.2 LINK TO THE PROJECT BY ADAM AND LUCAS:

[2] <http://www.cornellcollege.edu/physics/courses/phy312/Student-Projects/Magnetic-Resonance/Magnetic-Resonance.html>

##### 5.3 THEORY AND COMPONENTS DESIGN:

[3] G. L. Peterson, "THE WIRELESS TRANSMISSION OF ELECTRICAL ENERGY," [online document], 2004, [cited 12/10/04], <http://www.tfcbooks.com/articles/tws8c.htm>

[4] U.S. Department of Energy, "Energy Savers: Solar Power Satellites," [online document] rev 2004 June 17, [cited 12/10/04], <http://www.eere.energy.gov/consumerinfo/factsheets/l123.html>

[5] S. Kopparthi, Pratul K. Ajmera, "Power delivery for remotely located Microsystems," Proc. of IEEE Region 5, 2004 Annual Tech. Conference, 2004 April 2, pp. 31-39.

[6] Tomohiro Yamada, Hirotaka Sugawara, Kenichi Okada, Kazuya Masu, Akio Oki and Yasuhiro Horiike, "Battery-less Wireless Communication System through Human Body for *in-vivo* Healthcare Chip," IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, pp. 322-325, Sept. 2004.

[7] "Category: Radio spectrum -Wikipedia, the free encyclopedia," [online document], 2004 Aug 26 [cited 12/11/04], [http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Radio\\_spectrum](http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Radio_spectrum).

[8] Zia A. Yamayee and Juan L. Bala, Jr., *Electromechanical Energy Devices and Power Systems*, John Wiley and Sons, 1947, p. 78.

[9] "The Spark Transmitter. 2. Maximizing Power, part 1. " November 2004, <http://home.freeuk.net/dunckx/wireless/maxpower1/maxpower1.html>.

[10] R. Victor Jones, "Diode Applications," [Online Document], 2001 Oct 25, [cited 2004 Dec 11], [http://people.deas.harvard.edu/~jones/es154/lectures/lecture\\_2/diode\\_circuits/diode\\_appl.html](http://people.deas.harvard.edu/~jones/es154/lectures/lecture_2/diode_circuits/diode_appl.html).

[11] Central Semiconductor Corp, "PNP Silicon Transistor", November 2004, [http://www.semiconductors.philips.com/acrobat\\_download/datasheets/2N2222\\_CNV\\_2.pdf](http://www.semiconductors.philips.com/acrobat_download/datasheets/2N2222_CNV_2.pdf).

[12] Neha Bagga, Joshua Gruntmeir, Samuel Lewis, "Wireless Power Transmission", Dec.2004.

[13] Online source, [http://diranieh.com/Electrenicas/OpAmps3.htm#Relaxation\\_Oscillator](http://diranieh.com/Electrenicas/OpAmps3.htm#Relaxation_Oscillator).

[14] Online source, <http://www.scribd.com/doc/51651503/81/Relaxation-Oscillators-Using-Operational-Amplifier>.

#### 5.4 DATASHEET FOR CHIPS:

[15] Referenced using the website, <http://www.alldatasheet.com>

**FEATURES**

- Low-Sine Wave Distortion, 0.5%, Typical
- Excellent Temperature Stability, 20ppm/°C, Typ.
- Wide Sweep Range, 2000:1, Typical
- Low-Supply Sensitivity, 0.01%V, Typ.
- Linear Amplitude Modulation
- TTL Compatible FSK Controls
- Wide Supply Range, 10V to 26V
- Adjustable Duty Cycle, 1% TO 99%

**APPLICATIONS**

- Waveform Generation
- Sweep Generation
- AM/FM Generation
- V/F Conversion
- FSK Generation
- Phase-Locked Loops (VCO)

**GENERAL DESCRIPTION**

The XR-2206 is a monolithic function generator integrated circuit capable of producing high quality sine, square, triangle, ramp, and pulse waveforms of high-stability and accuracy. The output waveforms can be both amplitude and frequency modulated by an external voltage. Frequency of operation can be selected externally over a range of 0.01Hz to more than 1MHz.

The circuit is ideally suited for communications, instrumentation, and function generator applications requiring sinusoidal tone, AM, FM, or FSK generation. It has a typical drift specification of 20ppm/°C. The oscillator frequency can be linearly swept over a 2000:1 frequency range with an external control voltage, while maintaining low distortion.

**ORDERING INFORMATION**

Part No.	Package	Operating Temperature Range
XR-2206M	16 Lead 300 Mil CDIP	-55°C to +125°C
XR-2206P	16 Lead 300 Mil PDIP	-40°C to +85°C
XR-2206CP	16 Lead 300 Mil PDIP	0°C to +70°C
XR-2206D	16 Lead 300 Mil JEDEC SOIC	0°C to +70°C

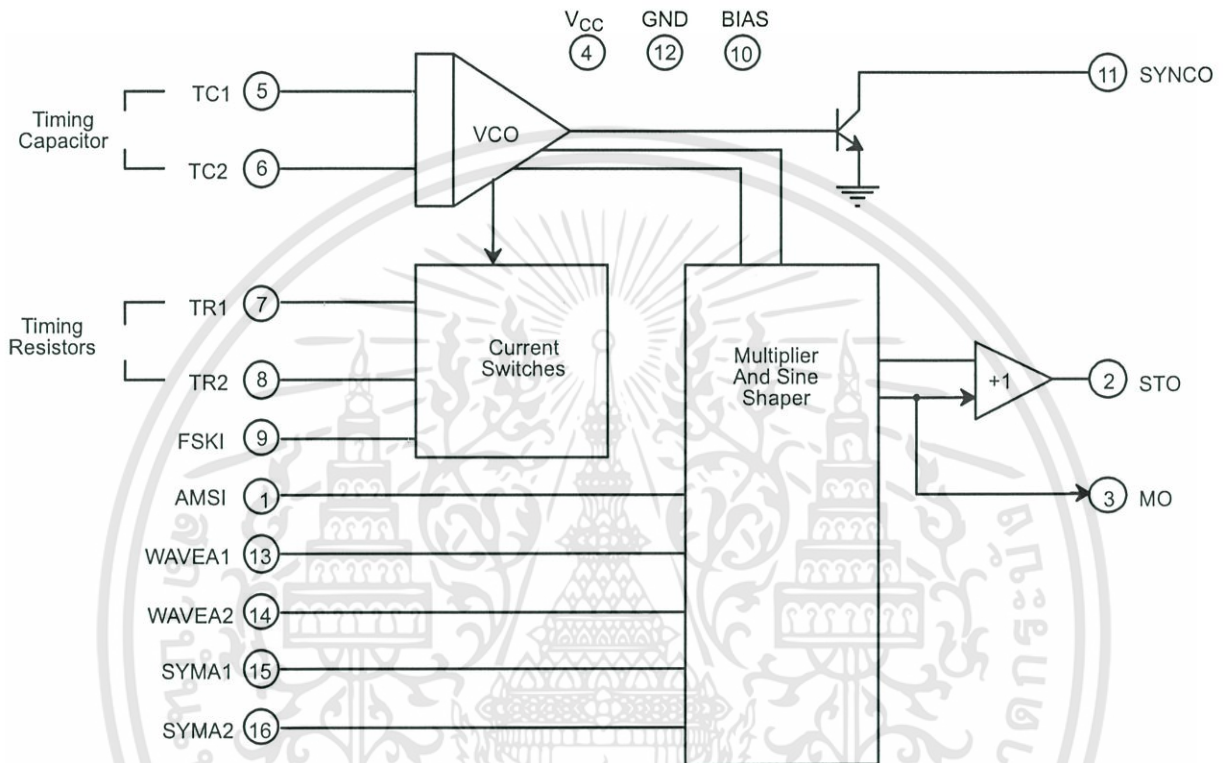
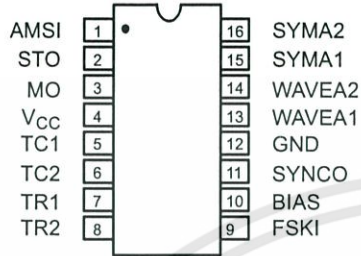
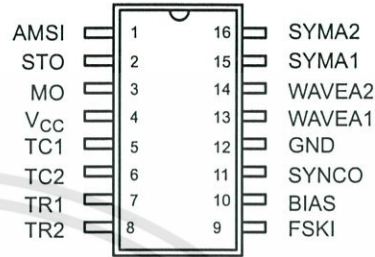


Figure 1. XR-2206 Block Diagram



16 Lead PDIP, CDIP (0.300'')



16 Lead SOIC (Jedec, 0.300'')

**PIN DESCRIPTION**

Pin #	Symbol	Type	Description
1	AMSI	I	<b>Amplitude Modulating Signal Input.</b>
2	STO	O	<b>Sine or Triangle Wave Output.</b>
3	MO	O	<b>Multiplier Output.</b>
4	V <sub>CC</sub>		<b>Positive Power Supply.</b>
5	TC1	I	<b>Timing Capacitor Input.</b>
6	TC2	I	<b>Timing Capacitor Input.</b>
7	TR1	O	<b>Timing Resistor 1 Output.</b>
8	TR2	O	<b>Timing Resistor 2 Output.</b>
9	FSKI	I	<b>Frequency Shift Keying Input.</b>
10	BIAS	O	<b>Internal Voltage Reference.</b>
11	SYNCO	O	<b>Sync Output.</b> This output is a open collector and needs a pull up resistor to V <sub>CC</sub> .
12	GND		<b>Ground pin.</b>
13	WAVEA1	I	<b>Wave Form Adjust Input 1.</b>
14	WAVEA2	I	<b>Wave Form Adjust Input 2.</b>
15	SYMA1	I	<b>Wave Symetry Adjust 1.</b>
16	SYMA2	I	<b>Wave Symetry Adjust 2.</b>

## DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Test Conditions: Test Circuit of Figure 2  $V_{CC} = 12V$ ,  $T_A = 25^\circ C$ ,  $C = 0.01\mu F$ ,  $R_1 = 100k\Omega$ ,  $R_2 = 10k\Omega$ ,  $R_3 = 25k\Omega$   
 Unless Otherwise Specified.  $S_1$  open for triangle, closed for sine wave.

Parameters	XR-2206M/P			XR-2206CP/D			Units	Conditions
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.		
<b>General Characteristics</b>								
Single Supply Voltage	<b>10</b>		<b>26</b>	10		26	V	
Split-Supply Voltage	<b><math>\pm 5</math></b>		<b><math>\pm 13</math></b>	$\pm 5$		$\pm 13$	V	
Supply Current		12	17		14	20	mA	$R_1 \geq 10k\Omega$
<b>Oscillator Section</b>								
Max. Operating Frequency	<b>0.5</b>	1		0.5	1		MHz	$C = 1000pF$ , $R_1 = 1k\Omega$
Lowest Practical Frequency		0.01			0.01		Hz	$C = 50\mu F$ , $R_1 = 2M\Omega$
Frequency Accuracy		$\pm 1$	<b><math>\pm 4</math></b>		$\pm 2$		% of $f_o$	$f_o = 1/R_1C$
Temperature Stability Frequency		$\pm 10$	<b><math>\pm 50</math></b>		$\pm 20$		ppm/ $^\circ C$	$0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$ $R_1 = R_2 = 20k\Omega$
Sine Wave Amplitude Stability <sup>2</sup>		4800			4800		ppm/ $^\circ C$	
Supply Sensitivity		0.01	<b>0.1</b>		0.01		%/V	$V_{LOW} = 10V$ , $V_{HIGH} = 20V$ , $R_1 = R_2 = 20k\Omega$
Sweep Range	1000:1	2000:1			2000:1		$f_H = f_L$	$f_H @ R_1 = 1k\Omega$ $f_L @ R_1 = 2M\Omega$
<b>Sweep Linearity</b>								
10:1 Sweep		2			2		%	$f_L = 1kHz$ , $f_H = 10kHz$
1000:1 Sweep		8			8		%	$f_L = 100Hz$ , $f_H = 100kHz$
FM Distortion		0.1			0.1		%	$\pm 10\%$ Deviation
<b>Recommended Timing Components</b>								
Timing Capacitor: C	<b>0.001</b>		100	0.001		100	$\mu F$	Figure 5
Timing Resistors: $R_1$ & $R_2$	<b>1</b>		2000	1		2000	k $\Omega$	
<b>Triangle Sine Wave Output<sup>1</sup></b>								Figure 3
Triangle Amplitude		160			160		mV/k $\Omega$	Figure 2, $S_1$ Open
Sine Wave Amplitude	<b>40</b>	60	80		60		mV/k $\Omega$	Figure 2, $S_1$ Closed
Max. Output Swing		6			6		Vp-p	
Output Impedance		600			600		$\Omega$	
Triangle Linearity		1			1		%	
Amplitude Stability		0.5			0.5		dB	For 1000:1 Sweep
<b>Sine Wave Distortion</b>								
Without Adjustment		2.5			2.5		%	$R_1 = 30k\Omega$
With Adjustment		0.4	<b>1.0</b>		0.5	1.5	%	See Figure 7 and Figure 8

### Notes

<sup>1</sup> Output amplitude is directly proportional to the resistance,  $R_3$ , on Pin 3. See Figure 3.

<sup>2</sup> For maximum amplitude stability,  $R_3$  should be a positive temperature coefficient resistor.

**Bold face parameters** are covered by production test and guaranteed over operating temperature range.

**DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (CONT'D)**

Parameters	XR-2206M/P			XR-2206CP/D			Units	Conditions
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.		
<b>Amplitude Modulation</b>								
Input Impedance	50	100		50	100		kΩ	
Modulation Range		100			100		%	
Carrier Suppression		55			55		dB	
Linearity		2			2		%	For 95% modulation
<b>Square-Wave Output</b>								
Amplitude		12			12		Vp-p	Measured at Pin 11.
Rise Time		250			250		ns	C <sub>L</sub> = 10pF
Fall Time		50			50		ns	C <sub>L</sub> = 10pF
Saturation Voltage		0.2	<b>0.4</b>		0.2	0.6	V	I <sub>L</sub> = 2mA
Leakage Current		0.1	<b>20</b>		0.1	100	μA	V <sub>CC</sub> = 26V
FSK Keying Level (Pin 9)	0.8	1.4	<b>2.4</b>	0.8	1.4	<b>2.4</b>	V	See section on circuit controls
Reference Bypass Voltage	2.9	3.1	<b>3.3</b>	2.5	3	3.5	V	Measured at Pin 10.

**Notes**

<sup>1</sup> Output amplitude is directly proportional to the resistance, R<sub>3</sub>, on Pin 3. See Figure 3.

<sup>2</sup> For maximum amplitude stability, R<sub>3</sub> should be a positive temperature coefficient resistor.

**Bold face parameters** are covered by production test and guaranteed over operating temperature range.

Specifications are subject to change without notice

**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Power Supply ..... 26V

Power Dissipation ..... 750mW

Derate Above 25°C ..... 5mW/°C

Total Timing Current ..... 6mA

Storage Temperature ..... -65°C to +150°C

**SYSTEM DESCRIPTION**

The XR-2206 is comprised of four functional blocks; a voltage-controlled oscillator (VCO), an analog multiplier and sine-shaper; a unity gain buffer amplifier; and a set of current switches.

The VCO produces an output frequency proportional to an input current, which is set by a resistor from the timing

terminals to ground. With two timing pins, two discrete output frequencies can be independently produced for FSK generation applications by using the FSK input control pin. This input controls the current switches which select one of the timing resistor currents, and routes it to the VCO.

### FEATURES

#### High Speed

- 120 MHz Bandwidth, Gain = -1
- 230 V/ $\mu$ s Slew Rate
- 90 ns Settling Time to 0.1%

#### Ideal for Video Applications

- 0.02% Differential Gain
- 0.04° Differential Phase

#### Low Noise

- 1.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  Input Voltage Noise
- 1.5 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$  Input Current Noise

#### Excellent DC Precision

- 1 mV max Input Offset Voltage (Over Temp)
- 0.3  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C Input Offset Drift

#### Flexible Operation

- Specified for  $\pm 5$  V to  $\pm 15$  V Operation
- $\pm 3$  V Output Swing into a 150  $\Omega$  Load
- External Compensation for Gains 1 to 20
- 5 mA Supply Current

Available in Tape and Reel in Accordance with EIA-481A Standard

### PRODUCT DESCRIPTION

The AD829 is a low noise (1.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ), high speed op amp with custom compensation that provides the user with gains from  $\pm 1$  to  $\pm 20$  while maintaining a bandwidth greater than 50 MHz. The AD829's 0.04° differential phase and 0.02% differential gain performance at 3.58 MHz and 4.43 MHz, driving reverse-terminated 50  $\Omega$  or 75  $\Omega$  cables, makes it ideally suited for professional video applications. The AD829 achieves its 230 V/ $\mu$ s uncompensated slew rate and 750 MHz gain bandwidth product while requiring only 5 mA of current from the power supplies.

The AD829's external compensation pin gives it exceptional versatility. For example, compensation can be selected to optimize the bandwidth for a given load and power supply voltage. As a gain-of-two line driver, the -3 dB bandwidth can be increased to 95 MHz at the expense of 1 dB of peaking. In addition, the AD829's output can also be clamped at its external compensation pin.

The AD829 has excellent dc performance. It offers a minimum open-loop gain of 30 V/mV into loads as low as 500  $\Omega$ , low input voltage noise of 1.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , and a low input offset voltage of 1 mV maximum. Common-mode rejection and power supply rejection ratios are both 120 dB.

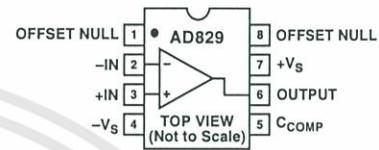
The AD829 is also useful in multichannel, high speed data conversion where its fast (90 ns to 0.1%) settling time is of importance. In such applications, the AD829 serves as an input buffer for 8-to-10-bit A/D converters and as an output I/V converter for high speed D/A converters.

### REV. E

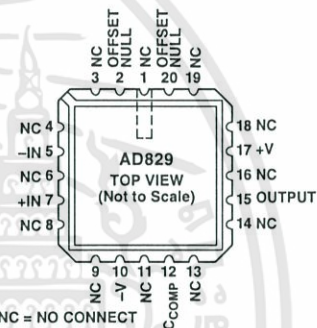
Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

### CONNECTION DIAGRAMS

8-Lead Plastic Mini-DIP (N),  
Cerdip (Q) and SOIC (R) Packages



20-Lead LCC Pinout



The AD829 provides many of the same advantages that a transimpedance amplifier offers, while operating as a traditional voltage feedback amplifier. A bandwidth greater than 50 MHz can be maintained for a range of gains by changing the external compensation capacitor. The AD829 and the transimpedance amplifier are both unity gain stable and provide similar voltage noise performance (1.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ). However, the current noise of the AD829 (1.5 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ) is less than 10% of the noise of transimpedance amps. Furthermore, the inputs of the AD829 are symmetrical.

### PRODUCT HIGHLIGHTS

1. Input voltage noise of 2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , current noise of 1.5 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$  and 50 MHz bandwidth, for gains of 1 to 20, make the AD829 an ideal preamp.
2. Differential phase error of 0.04° and a 0.02% differential gain error, at the 3.58 MHz NTSC and 4.43 MHz PAL and SECAM color subcarrier frequencies, make it an outstanding video performer for driving reverse-terminated 50  $\Omega$  and 75  $\Omega$  cables to  $\pm 1$  V (at their terminated end).
3. The AD829 can drive heavy capacitive loads.
4. Performance is fully specified for operation from  $\pm 5$  V to  $\pm 15$  V supplies.
5. Available in plastic, cerdip, and small outline packages. Chips and MIL-STD-883B parts are also available.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>  
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 2000

# AD829—SPECIFICATIONS (@ $T_A = +25^\circ\text{C}$ and $V_S = \pm 15\text{ V}$ dc, unless otherwise noted)

Model	Conditions	$V_S$	AD829J/AR			AD829AQ/S			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT OFFSET VOLTAGE		$\pm 5\text{ V}, \pm 15\text{ V}$		0.2	1		0.1	0.5	mV
Offset Voltage Drift	$T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$	$\pm 5\text{ V}, \pm 15\text{ V}$		0.3	1		0.3	0.5	mV $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
INPUT BIAS CURRENT		$\pm 5\text{ V}, \pm 15\text{ V}$		3.3	7		3.3	7	$\mu\text{A}$
	$T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$				8.2/9.5			9.5	$\mu\text{A}$
INPUT OFFSET CURRENT		$\pm 5\text{ V}, \pm 15\text{ V}$		50	500		50	500	nA
Offset Current Drift	$T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$	$\pm 5\text{ V}, \pm 15\text{ V}$		0.5	500		0.5	500	nA $\text{nA}/^\circ\text{C}$
OPEN-LOOP GAIN	$V_O = \pm 2.5\text{ V}$ $R_{\text{LOAD}} = 500\ \Omega$ $T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$ $R_{\text{LOAD}} = 150\ \Omega$ $V_{\text{OUT}} = \pm 10\text{ V}$	$\pm 5\text{ V}$	30	65		30	65		V/mV
	$R_{\text{LOAD}} = 1\ \text{k}\Omega$ $T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$ $R_{\text{LOAD}} = 500\ \Omega$	$\pm 15\text{ V}$	20	40		20	40		V/mV V/mV V/mV
	$R_{\text{LOAD}} = 1\ \text{k}\Omega$ $T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$ $R_{\text{LOAD}} = 500\ \Omega$		50	100		50	100		V/mV V/mV V/mV
			20	85		20	85		
DYNAMIC PERFORMANCE									
Gain Bandwidth Product		$\pm 5\text{ V}$		600			600		MHz
		$\pm 15\text{ V}$		750			750		MHz
Full Power Bandwidth <sup>1,2</sup>	$V_O = 2\text{ V p-p}$ $R_{\text{LOAD}} = 500\ \Omega$	$\pm 5\text{ V}$		25			25		MHz
	$V_O = 20\text{ V p-p}$ $R_{\text{LOAD}} = 1\ \text{k}\Omega$	$\pm 15\text{ V}$		3.6			3.6		MHz
Slew Rate <sup>2</sup>	$R_{\text{LOAD}} = 500\ \Omega$	$\pm 5\text{ V}$		150			150		V/ $\mu\text{s}$
	$R_{\text{LOAD}} = 1\ \text{k}\Omega$	$\pm 15\text{ V}$		230			230		V/ $\mu\text{s}$
Settling Time to 0.1%	$A_V = -19$ $-2.5\text{ V}$ to $+2.5\text{ V}$	$\pm 5\text{ V}$		65			65		ns
	10 V Step	$\pm 15\text{ V}$		90			90		ns
Phase Margin <sup>2</sup>	$C_{\text{LOAD}} = 10\ \text{pF}$ $R_{\text{LOAD}} = 1\ \text{k}\Omega$	$\pm 15\text{ V}$		60			60		Degrees
DIFFERENTIAL GAIN ERROR <sup>3</sup>	$R_{\text{LOAD}} = 100\ \Omega$ $C_{\text{COMP}} = 30\ \text{pF}$	$\pm 15\text{ V}$		0.02			0.02		%
DIFFERENTIAL PHASE ERROR <sup>3</sup>	$R_{\text{LOAD}} = 100\ \Omega$ $C_{\text{COMP}} = 30\ \text{pF}$	$\pm 15\text{ V}$		0.04			0.04		Degrees
COMMON-MODE REJECTION	$V_{\text{CM}} = \pm 2.5\text{ V}$	$\pm 5\text{ V}$	100	120		100	120		dB
	$V_{\text{CM}} = \pm 12\text{ V}$	$\pm 15\text{ V}$	100	120		100	120		dB
	$T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$		96			96			dB
POWER SUPPLY REJECTION	$V_S = \pm 4.5\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$ $T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$		98	120		98	120		dB dB
INPUT VOLTAGE NOISE	$f = 1\ \text{kHz}$	$\pm 15\text{ V}$		1.7	2		1.7	2	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
INPUT CURRENT NOISE	$f = 1\ \text{kHz}$	$\pm 15\text{ V}$		1.5			1.5		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE		$\pm 5\text{ V}$		+4.3			+4.3		V
		$\pm 15\text{ V}$		-3.8			-3.8		V
				+14.3			+14.3		V
				-13.8			-13.8		V
OUTPUT VOLTAGE SWING	$R_{\text{LOAD}} = 500\ \Omega$	$\pm 5\text{ V}$	3.0	3.6		3.0	3.6		$\pm\text{V}$
	$R_{\text{LOAD}} = 150\ \Omega$	$\pm 5\text{ V}$	2.5	3.0		2.5	3.0		$\pm\text{V}$
	$R_{\text{LOAD}} = 50\ \Omega$	$\pm 5\text{ V}$		1.4			1.4		$\pm\text{V}$
	$R_{\text{LOAD}} = 1\ \text{k}\Omega$	$\pm 15\text{ V}$	12	13.3		12	13.3		$\pm\text{V}$
	$R_{\text{LOAD}} = 500\ \Omega$	$\pm 15\text{ V}$	10	12.2		10	12.2		$\pm\text{V}$
Short Circuit Current		$\pm 5\text{ V}, \pm 15\text{ V}$		32			32		mA
INPUT CHARACTERISTICS									
Input Resistance (Differential)				13			13		k $\Omega$
Input Capacitance (Differential) <sup>4</sup>				5			5		pF
Input Capacitance (Common Mode)				1.5			1.5		pF
CLOSED-LOOP OUTPUT RESISTANCE	$A_V = +1, f = 1\ \text{kHz}$			2			2		m $\Omega$

Model	Conditions	V <sub>s</sub>	AD829J/AR			AD829AQ/S			Units	
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max		
POWER SUPPLY Operating Range Quiescent Current	T <sub>MIN</sub> to T <sub>MAX</sub>	±5 V	±4.5	5	±18	±4.5	5	±18	V	
					6.5		6.5		8.2/8.7	mA
		±15 V		5.3	6.8		5.3	6.8		mA
						8.3/8.5			8.5/9.0	mA
TRANSISTOR COUNT	Number of Transistors		46		46					

### NOTES

<sup>1</sup>Full Power Bandwidth = Slew Rate/2 π V<sub>PEAK</sub>.

<sup>2</sup>Tested at Gain = +20, C<sub>COMP</sub> = 0 pF.

<sup>3</sup>3.58 MHz (NTSC) and 4.43 MHz (PAL & SECAM).

<sup>4</sup>Differential input capacitance consists of 1.5 pF package capacitance plus 3.5 pF from the input differential pair.

Specifications subject to change without notice.

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>1</sup>

Supply Voltage . . . . . ±18 V

Internal Power Dissipations<sup>2</sup>

Plastic (N) . . . . . 1.3 Watts

Small Outline (R) . . . . . 0.9 Watts

Cerdip (Q) . . . . . 1.3 Watts

LCC (E) . . . . . 0.8 Watts

Input Voltage . . . . . ±V<sub>s</sub>

Differential Input Voltage<sup>3</sup> . . . . . ±6 Volts

Output Short Circuit Duration . . . . . Indefinite

Storage Temperature Range (Q, E) . . . . . -65°C to +150°C

Storage Temperature Range (N, R) . . . . . -65°C to +125°C

Operating Temperature Range

AD829J . . . . . 0°C to +70°C

AD829A . . . . . -40°C to +85°C

AD829S . . . . . -55°C to +125°C

Lead Temperature Range (Soldering 60 sec) . . . . . +300°C

### NOTES

<sup>1</sup>Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

<sup>2</sup>Maximum internal power dissipation is specified so that T<sub>J</sub> does not exceed +175°C at an ambient temperature of +25°C.

Thermal characteristics:

8-lead plastic package: θ<sub>JA</sub> = 100°C/watt (derate at 8.7 mW/°C)

8-lead cerdip package: θ<sub>JA</sub> = 110°C/watt (derate at 8.7 mW/°C)

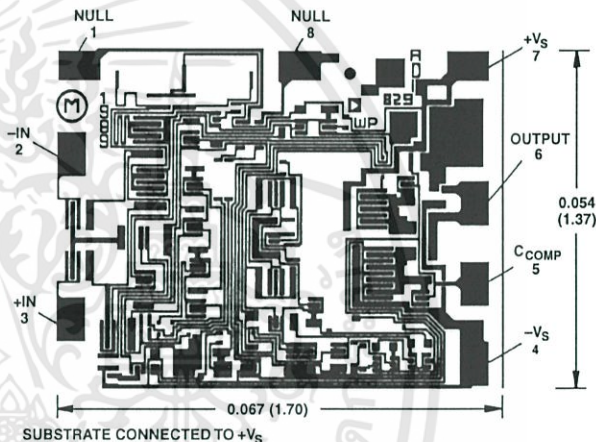
20-lead LCC package: θ<sub>JA</sub> = 150°C/watt

8-lead small outline package: θ<sub>JA</sub> = 155°C/watt (derate at 6 mW/°C).

<sup>3</sup>If the differential voltage exceeds 6 volts, external series protection resistors should be added to limit the input current.

### METALIZATION PHOTO

Contact factory for latest dimensions.  
Dimensions shown in inches and (mm).



SUBSTRATE CONNECTED TO +V<sub>s</sub>

### ESD SUSCEPTIBILITY

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 volts, which readily accumulate on the human body and on test equipment, can discharge without detection. Although the AD829 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may still occur on these devices if they are subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid any performance degradation or loss of functionality.

### ORDERING GUIDE

Model	Temperature Range	Package Description	Package Option*
AD829JN	0°C to +70°C	8-Lead Plastic Mini-DIP	N-8
AD829AR	-40°C to +85°C	8-Lead Plastic SOIC	SO-8
AD829JR	0°C to +70°C	8-Lead Plastic SOIC	SO-8
AD829AR-REEL7	-40°C to +85°C	Tape and Reel 7"	
AD829AR-REEL	-40°C to +85°C	Tape and Reel 13"	
AD829JR-REEL7	0°C to +70°C	Tape and Reel 7"	
AD829JR-REEL	0°C to +70°C	Tape and Reel 13"	
AD829AQ	-40°C to +85°C	8-Lead Cerdip	Q-8
AD829SQ	-55°C to +125°C	8-Lead Cerdip	Q-8
AD829SQ/883B	-55°C to +125°C	8-Lead Cerdip	Q-8
5962-9312901MPA	-55°C to +125°C	8-Lead Cerdip	Q-8
AD829SE/883B	-55°C to +125°C	20-Lead LCC	E-20A
5962-9312901M2A	-55°C to +125°C	20-Lead LCC	E-20A
AD829JCHIPS	0°C to +70°C	Die	
AD829SCHIPS	-55°C to +125°C	Die	

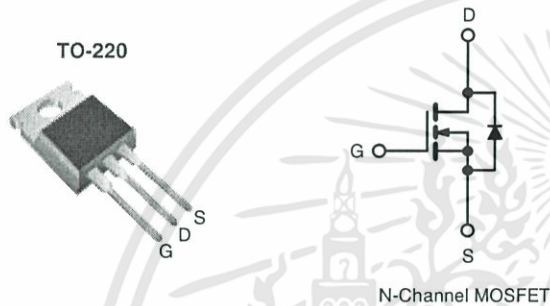
\*E = Leadless Chip Carrier (Ceramic); N = Plastic DIP; Q = Cerdip; SO = Small Outline IC (SOIC).

## Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY	
$V_{DS}$ (V)	100
$R_{DS(on)}$ ( $\Omega$ )	$V_{GS} = 10\text{ V}$   0.54
$Q_g$ (Max.) (nC)	8.3
$Q_{gs}$ (nC)	2.3
$Q_{gd}$ (nC)	3.8
Configuration	Single

### FEATURES

- Dynamic  $dV/dt$  Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- 175 °C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Lead (Pb)-free Available


 Available  
**RoHS\***  
 COMPLIANT


### DESCRIPTION

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

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

ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220
Lead (Pb)-free	IRF510PbF
	SiHF510-E3
SnPb	IRF510
	SiHF510


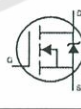
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted				
PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT	
Drain-Source Voltage	$V_{DS}$	100	V	
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$	$\pm 20$		
Continuous Drain Current	$V_{GS}$ at 10 V	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	5.6	A
		$T_C = 100\text{ }^\circ\text{C}$	4.0	
Pulsed Drain Current <sup>a</sup>	$I_{DM}$	20		
Linear Derating Factor		0.29	W/ $^\circ\text{C}$	
Single Pulse Avalanche Energy <sup>b</sup>	$E_{AS}$	100	mJ	
Repetitive Avalanche Current <sup>a</sup>	$I_{AR}$	5.6	A	
Repetitive Avalanche Energy <sup>a</sup>	$E_{AR}$	4.3	mJ	
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	$P_D$	43	W
Peak Diode Recovery $dV/dt^c$	$dV/dt$		5.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range	$T_J, T_{stg}$		- 55 to + 175	$^\circ\text{C}$
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s		300 <sup>d</sup>	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10	lbf · in
			1.1	N · m

#### Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DD} = 25\text{ V}$ , starting  $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $L = 4.8\text{ mH}$ ,  $R_G = 25\text{ }\Omega$ ,  $I_{AS} = 5.6\text{ A}$  (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq 5.6\text{ A}$ ,  $dI/dt \leq 75\text{ A}/\mu\text{s}$ ,  $V_{DD} \leq V_{DS}$ ,  $T_J \leq 175\text{ }^\circ\text{C}$ .
- 1.6 mm from case.

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

THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	$R_{thJA}$	-	62	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	$R_{thCS}$	0.50	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	$R_{thJC}$	-	3.5	

SPECIFICATIONS $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
<b>Static</b>						
Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{DS}$	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	100	-	-	V
$V_{DS}$ Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25\text{ }^\circ\text{C}, I_D = 1\text{ mA}$	-	0.12	-	V/°C
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	$I_{GSS}$	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	$\pm 100$	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	$I_{DSS}$	$V_{DS} = 100\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	25	$\mu\text{A}$
		$V_{DS} = 80\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 3.4\text{ A}^b$	-	-	0.54	$\Omega$
Forward Transconductance	$g_{fs}$	$V_{DS} = 50\text{ V}, I_D = 3.4\text{ A}^b$	1.3	-	-	S
<b>Dynamic</b>						
Input Capacitance	$C_{iss}$	$V_{GS} = 0\text{ V}, V_{DS} = 25\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}, \text{ see fig. 5}$	-	180	-	pF
Output Capacitance	$C_{oss}$		-	81	-	
Reverse Transfer Capacitance	$C_{rss}$		-	15	-	
Total Gate Charge	$Q_g$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 5.6\text{ A}, V_{DS} = 80\text{ V}, \text{ see fig. 6 and 13}^b$	-	-	8.3	nC
Gate-Source Charge	$Q_{gs}$		-	-	2.3	
Gate-Drain Charge	$Q_{gd}$		-	-	3.8	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 50\text{ V}, I_D = 5.6\text{ A}, R_G = 24\text{ }\Omega, R_D = 8.4\text{ }\Omega, \text{ see fig. 10}^b$	-	6.9	-	ns
Rise Time	$t_r$		-	16	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	15	-	
Fall Time	$t_f$		-	9.4	-	
Internal Drain Inductance	$L_D$	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact 	-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	$L_S$		-	7.5	-	
<b>Drain-Source Body Diode Characteristics</b>						
Continuous Source-Drain Diode Current	$I_S$	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode 	-	-	5.6	A
Pulsed Diode Forward Current <sup>a</sup>	$I_{SM}$		-	-	20	
Body Diode Voltage	$V_{SD}$	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_S = 5.6\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	2.5	V
Body Diode Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_F = 5.6\text{ A}, dI/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	100	200	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	$Q_{rr}$		-	0.44	0.88	$\mu\text{C}$
Forward Turn-On Time	$t_{on}$	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S$ and $L_D$ )				

**Notes**

- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- b. Pulse width  $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .

# LM317

## 3-TERMINAL ADJUSTABLE REGULATOR

SLVS044H – SEPTEMBER 1997 – REVISED DECEMBER 2001

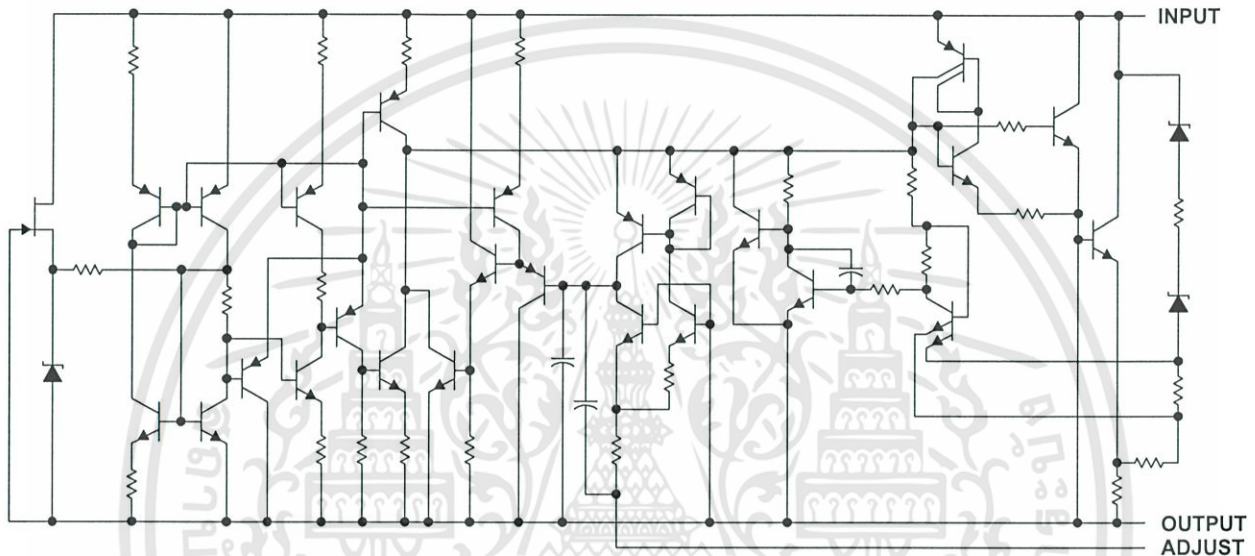
### AVAILABLE OPTIONS

T <sub>J</sub>	PACKAGED DEVICES		
	HEAT-SINK (DCY) <sup>†</sup>	HEAT-SINK MOUNTED, TO-220 (KC)	PLASTIC FLANGE MOUNTED, POWER FLEX (KTE) <sup>‡</sup>
0°C to 125°C	LM317DCY	LM317KC	LM317KTER

<sup>†</sup> The DCY package also is available taped and reeled, e.g., LM317DCYR.

<sup>‡</sup> The KTE package has the same footprint as TO-263 and can be mounted on a TO-263 land pattern. The KTE package is only available taped and reeled.

### schematic diagram



### absolute maximum ratings over virtual junction temperature range (unless otherwise noted)<sup>§</sup>

Input-to-output differential voltage, $V_I - V_O$ .....	40 V
Package thermal impedance, $\theta_{JA}$ (see Notes 1 and 2): DCY package .....	49°C/W
(see Notes 1 and 3): KC package .....	25°C/W
(see Notes 1 and 2): KTE package .....	23°C/W
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds .....	260°C
Storage temperature range, $T_{stg}$ .....	-65°C to 150°C

<sup>§</sup> Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES: 1. Maximum power dissipation is a function of  $T_J(\max)$ ,  $\theta_{JA}$ , and  $T_A$ . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is  $P_D = (T_J(\max) - T_A)/\theta_{JA}$ . Operating at the absolute maximum  $T_J$  of 150°C can affect reliability.
2. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-5.
3. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

### recommended operating conditions

	MIN	MAX	UNIT
$V_I - V_O$ Input-to-output voltage differential	3	37	V
$I_O$ Output current		1.5	A
$T_J$ Operating virtual junction temperature	0	125	°C

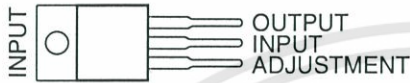


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายใน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265  
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

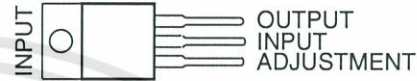
## FEATURES

- Output Voltage Range Adjustable From  $-1.2\text{ V}$  to  $-37\text{ V}$
- Output Current Capability of 1.5 A Max
- Input Regulation Typically 0.01% Per Input-Voltage Change
- Output Regulation Typically 0.3%
- Peak Output Current Constant Over Temperature Range of Regulator
- Ripple Rejection Typically 77 dB
- Direct Replacement for Industry-Standard LM237 and LM337

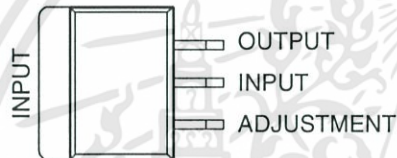
LM237, LM337...KC (TO-220) PACKAGE  
(TOP VIEW)



LM337...KCS (TO-220) PACKAGE  
(TOP VIEW)



LM337...KTE, KTP, OR KVU PACKAGE  
(TOP VIEW)



LM337...KTT (TO-263) PACKAGE  
(TOP VIEW)



## DESCRIPTION/ORDERING INFORMATION

The LM237 and LM337 are adjustable 3-terminal negative-voltage regulators capable of supplying in excess of  $-1.5\text{ A}$  over an output voltage range of  $-1.2\text{ V}$  to  $-37\text{ V}$ . They are exceptionally easy to use, requiring only two external resistors to set the output voltage and one output capacitor for frequency compensation. The current design has been optimized for excellent regulation and low thermal transients. In addition, the LM237 and LM337 feature internal current limiting, thermal shutdown, and safe-area compensation, making them virtually immune to failure by overloads.

The LM237 and LM337 serve a wide variety of applications, including local on-card regulation, programmable output-voltage regulation, and precision current regulation.

## ORDERING INFORMATION

$T_J$	PACKAGE <sup>(1)</sup>		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
$-25^\circ\text{C}$ to $150^\circ\text{C}$	TO-220 – KC	Tube of 50	LM237KC	LM237
$0^\circ\text{C}$ to $125^\circ\text{C}$	PowerFLEX™ – KTE	Reel of 2000	LM337KTER	LM337
	PowerFLEX – KTP	Reel of 3000	LM337KTPR	L337
	TO-220 – KC	Tube of 50	LM337KC	LM337
	TO-220 – KCS	Tube of 50	LM337KCSE3	LM337
	TO-252 – KVU	Reel of 2500	LM337KVURG3	LM337
	TO-263 – KTT	Reel of 500	LM337KTTR	LM337

(1) Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at [www.ti.com/sc/package](http://www.ti.com/sc/package).



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

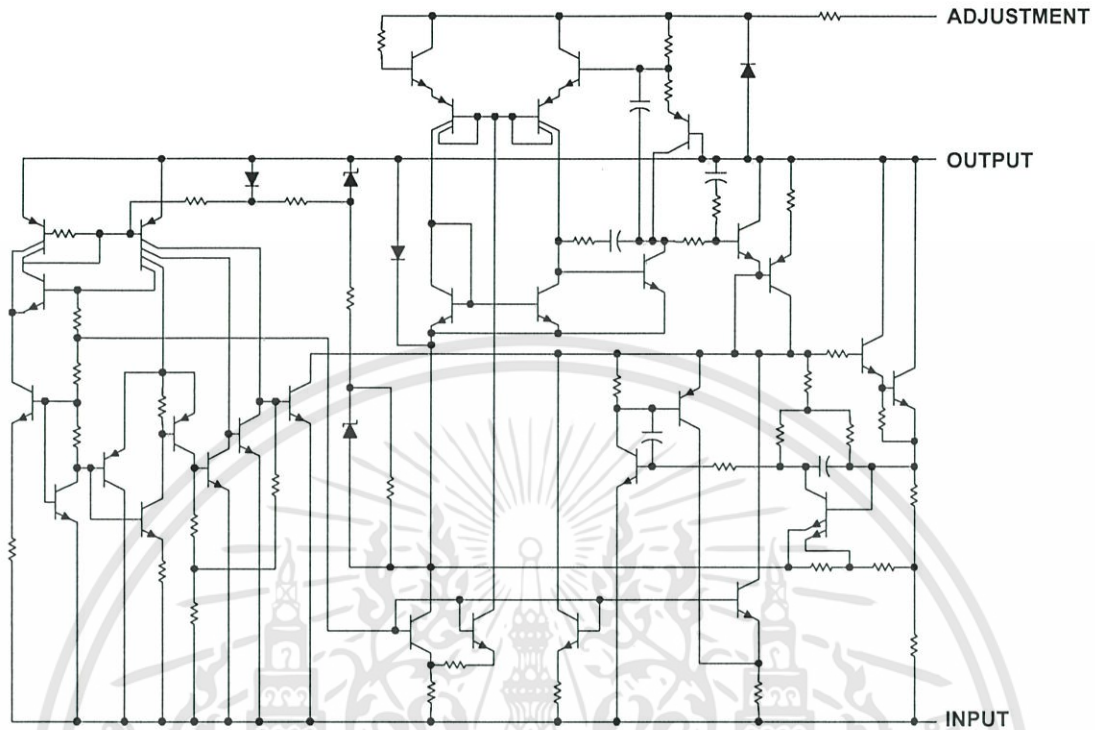
PowerFLEX is a trademark of Texas Instruments.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1981–2007, Texas Instruments Incorporated

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCHEMATIC DIAGRAM



Absolute Maximum Ratings<sup>(1)</sup>

over operating temperature ranges (unless otherwise noted)

		MIN	MAX	UNIT
$V_I - V_O$	Input-to-output differential voltage		-40	V
$T_J$	Operating virtual junction temperature		150	°C
	Lead temperature		260	°C
			1,6 mm (1/16 in) from case for 10 s	
$T_{stg}$	Storage temperature range	-65	150	°C

(1) Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

Package Thermal Data<sup>(1)</sup>

PACKAGE	BOARD	$\theta_{JC}$	$\theta_{JA}$
PowerFLEX (KTE)	High K, JESD 51-5	3°C/W	23°C/W
PowerFLEX (KTP)	High K, JESD 51-5	19°C/W	28°C/W
TO-220 (KC)	High K, JESD 51-5	3°C/W	19°C/W
TO-220 (KCS)	High K, JESD 51-5	3°C/W	24.8°C/W
TO-252 (KVU)	High K, JESD 51-5		30.3°C/W
TO-263 (KTT)	High K, JESD 51-5	18°C/W	25.3°C/W

(1) Maximum power dissipation is a function of  $T_J(\max)$ ,  $\theta_{JA}$ , and  $T_A$ . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is  $P_D = (T_J(\max) - T_A)/\theta_{JA}$ . Operating at the absolute maximum  $T_J$  of 150°C can affect reliability.

## Recommended Operating Conditions

		MIN	MAX	UNIT
$I_O$	Output current	$ V_I - V_O  \leq 40 \text{ V}, P \leq 15 \text{ W}$		mA
		$ V_I - V_O  \leq 10 \text{ V}, P \leq 15 \text{ W}$		
$T_J$	Operating virtual junction temperature	LM237		°C
		LM337		

## Electrical Characteristics

over recommended ranges of operating virtual junction temperature (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS <sup>(1)</sup>		LM237			LM337			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input regulation <sup>(2)</sup>	$V_I - V_O = -3 \text{ V to } -40 \text{ V}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	0.01	0.02		0.01	0.04	%V	
		$T_J = \text{MIN to MAX}$	0.02	0.05		0.02	0.07		
Ripple rejection	$V_O = -10 \text{ V}, f = 120 \text{ Hz}$		60			60			dB
	$V_O = -10 \text{ V}, f = 120 \text{ Hz}, C_{\text{ADJ}} = 10 \mu\text{F}$		66	77		66	77		
Output regulation	$I_O = 10 \text{ mA to } 1.5 \text{ A}, T_J = 25^\circ\text{C}$	$ V_O  \leq 5 \text{ V}$		25			50	mV	
		$ V_O  \geq 5 \text{ V}$	0.3	0.5		0.3	1	%	
	$I_O = 10 \text{ mA to } 1.5 \text{ A}$	$ V_O  \leq 5 \text{ V}$		50			70	mV	
		$ V_O  \geq 5 \text{ V}$		1			1.5	%	
Output-voltage change with temperature	$T_J = \text{MIN to MAX}$		0.6			0.6			%
Output-voltage long-term drift	After 1000 h at $T_J = \text{MAX}$ and $V_I - V_O = -40 \text{ V}$		0.3			0.3			1
Output noise voltage	$f = 10 \text{ Hz to } 10 \text{ kHz}, T_J = 25^\circ\text{C}$		0.003			0.003			%
Minimum output current to maintain regulation	$ V_I - V_O  \leq 40 \text{ V}$		2.5			2.5			10
	$ V_I - V_O  \leq 10 \text{ V}$		1.2			1.5			6
Peak output current	$ V_I - V_O  \leq 15 \text{ V}$		1.5			1.5			2.2
	$ V_I - V_O  \leq 40 \text{ V}, T_J = 25^\circ\text{C}$		0.24			0.4			0.15
ADJUSTMENT current			65			65			100
Change in ADJUSTMENT current	$V_I - V_O = -2.5 \text{ V to } -40 \text{ V}, I_O = 10 \text{ mA to MAX}, T_J = 25^\circ\text{C}$		2			2			5
Reference voltage (OUTPUT to ADJUSTMENT)	$V_I - V_O = -3 \text{ V to } -40 \text{ V}, I_O = 10 \text{ mA to } 1.5 \text{ A}, P \leq \text{rated dissipation}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	-1.225	-1.25	-1.275	-1.213	-1.25	-1.287	V
		$T_J = \text{MIN to MAX}$	-1.2	-1.25	-1.3	-1.2	-1.25	-1.3	
Thermal regulation	Initial $T_J = 25^\circ\text{C}, 10\text{-ms pulse}$		0.002			0.002			0.04

- (1) Unless otherwise noted, the following test conditions apply:  $|V_I - V_O| = 5 \text{ V}$  and  $I_O = 0.5 \text{ A}$ . For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions. All characteristics are measured with a 0.1- $\mu\text{F}$  capacitor across the input and a 1- $\mu\text{F}$  capacitor across the output. Pulse-testing techniques are used to maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible. Thermal effects must be taken into account separately.
- (2) Input regulation is expressed here as the percentage change in output voltage per 1-V change at the input.

# LM237, LM337

## 3-TERMINAL ADJUSTABLE REGULATORS

SLVS047J–NOVEMBER 1981–REVISED MAY 2007

### Electrical Characteristics

$T_J = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS (1)	LM237, LM337			UNIT
		MIN	TYP	MAX	
Input regulation (2)	$V_I - V_O = -3\text{ V to } -40\text{ V}$		0.01	0.04	%/V
Ripple rejection	$V_O = -10\text{ V}, f = 120\text{ Hz}$		60		dB
	$V_O = -10\text{ V}, f = 120\text{ Hz}, C_{\text{ADJ}} = 10\text{ }\mu\text{F}$		66	77	
Output regulation	$I_O = 10\text{ mA to } 1.5\text{ A}$	$ V_O  \leq 5\text{ V}$		50	mV
		$ V_O  \geq 5\text{ V}$		0.3	1
Output noise voltage	$f = 10\text{ Hz to } 10\text{ kHz}$		0.003		%
Minimum output current to maintain regulation	$ V_I - V_O  \leq 40\text{ V}$		2.5	10	mA
	$ V_I - V_O  \leq 10\text{ V}$		1.5	6	
Peak output current	$ V_I - V_O  \leq 15\text{ V}$		1.5	2.2	A
	$ V_I - V_O  \leq 40\text{ V}$		0.15	0.4	
ADJUSTMENT current			65	100	$\mu\text{A}$
Change in ADJUSTMENT current	$V_I - V_O = -2.5\text{ V to } -40\text{ V}, I_O = 10\text{ mA to MAX}$		2	5	$\mu\text{A}$
Reference voltage (OUTPUT to ADJUSTMENT)	$V_I - V_O = -3\text{ V to } -40\text{ V}, I_O = 10\text{ mA to } 1.5\text{ A}, P \leq \text{rated dissipation}$	-1.213	-1.25	-1.287	V

- (1) Unless otherwise noted, the following test conditions apply:  $|V_I - V_O| = 5\text{ V}$  and  $I_O = 0.5\text{ A}$ . All characteristics are measured with a 0.1- $\mu\text{F}$  capacitor across the input and a 1- $\mu\text{F}$  capacitor across the output. Pulse-testing techniques are used to maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible. Thermal effects must be taken into account separately.
- (2) Input regulation is expressed here as the percentage change in output voltage per 1-V change at the input.