



การควบคุมแบบไร้สายสำหรับหลอดไฟลอยบนสนามแม่เหล็ก
WIRELESS CONTROLLABLE LEVITATING MAGNETIC LAMP

นายจිරพงษ์ ทวีชาญวัฒน์ชัย

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2559

การควบคุมแบบไร้สายสำหรับหลอดไฟลอยบนสนามแม่เหล็ก
WIRELESS CONTROLLABLE LEVITATING MAGNETIC LAMP

นายจิรพงษ์ ทวีชาญวัฒน์ชัย

โครงงานวิศวกรรมนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

โครงการวิศวกรรม

เรื่อง

การควบคุมแบบไร้สายสำหรับหลอดไฟลอยบนสนามแม่เหล็ก

ของ

นายจිරพงษ์ ทวีชาญวัฒน์ชัย

ได้รับอนุมัติจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.เวศิน ปิยรัตน์)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม

.....ประธาน

(อาจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.บำรุง ท้าวศรีสกุล)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์)

การควบคุมแบบไร้สายสำหรับหลอดไฟลอยบนสนามแม่เหล็ก

ปีการศึกษา 2559

โดย

นายจิรพงษ์ ทวีชาญวัฒน์ชัย

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ชาราธิร์เศรษฐ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาการควบคุมตำแหน่ง และการส่งถ่ายกำลังสู่อุปกรณ์ส่องแสงสว่างโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในปัจจุบันการส่งพลังงานไร้สายจะช่วยลดอันตรายความเสี่ยงในการป้องกันความร้อนที่อาจทำให้สายละลายได้ และสัตว์ต่างๆที่เข้ามากัดสายไฟ งานก่อนหน้านี้นี้ศึกษาการลอยของลูกปิงปองอยู่ใต้สนามแม่เหล็ก โดยใช้เซนเซอร์ในการตรวจจับตำแหน่งของลูกปิงปอง เพื่อสั่งการควบคุมสนามแม่เหล็ก การศึกษาประกอบไปด้วย การคำนวณตัวเหนี่ยวนำ น้ำหนักของวัตถุที่ใช้ลอย และการออกแบบวงจรขับเคลื่อน ข้อดีของการออกแบบวงจรขับเคลื่อนคือวงจรสวิตช์ที่มีความเร็วไม่เพียงพอสอดคล้องกับการควบคุมสนามแม่เหล็กจึงเป็นผลให้ลูกปิงปองตกลง และมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการลอย รวมทั้งมอเตอร์มีความร้อนมาก โครงการนี้นำเสนอการปรับปรุงการลอยของวัตถุที่มีน้ำหนักมากขึ้น เช่น หลอดไฟ โดยการออกแบบวงจรขับเคลื่อนให้มีความถี่สูงขึ้น และการใช้มอเตอร์ที่มีความถี่สูงขึ้น รวมถึงการป้องกันไม่ให้มอเตอร์ร้อนเกินไป เราจึงเลือกใช้มอเตอร์ที่สามารถทนกระแสได้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังเพิ่มการส่งพลังงานไร้สายให้หลอดไฟสว่าง และการควบคุมการเปิด - ปิดจากสมาร์ตโฟน ประโยชน์ของโครงการนี้ คือความสามารถในการทำให้วัตถุที่มีน้ำหนักลอยได้เสถียรขึ้น และวงจรที่ใช้ในการควบคุมไม่ร้อนจนเกินไป นอกจากนี้จุดเด่นของโครงการประกอบด้วย การส่งถ่ายพลังงานแบบไร้สาย ที่ทำให้ปลอดภัยจากสัตว์ที่เข้ามา และการเชื่อมต่อกับสมาร์ตโฟนที่ทำให้สะดวกสบายในชีวิตประจำวันของผู้คน

คำสำคัญ: หลอดไฟลอยบนสนามแม่เหล็ก การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไร้สาย วงจรเรโซแนนซ์ ควบคุมการทำงานของหลอดไฟผ่าน Smartphone

WIRELESS CONTROLLABLE LEVITATING MAGNETIC LAMP

Academic Year 2016

By

Mr.Jeerapong Taweechanwatchai

Advisor

Assoc. Prof. Vuttipon Tarateeraseth, Ph.D

Abstract

This project studies position control and power transfer of illumination device by using electromagnetic wave. At the present, wireless energy transfers can decrease the risk of danger caused by the heat that may melt wire and the animal that can damage the wire. A former work studies the float of a ping-pong ball under a magnetic field by using Infrared sensor in detection of the position of the ping-pong ball to control the magnetic field. The study consists of inductance calculation, floating object weight, and gate-drive circuit design. The disadvantages of the gate-drive circuit design are that switching circuit does not have enough speed for controlling the magnetic field that causes the ping-pong ball falling down and affects the floating time, and also metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) has much heat. This project presents the float improvement of a heavier object, e.g. light bulb. The gate drive circuit of the light bulb is designed with higher frequency. To protect the MOSFET from too much heat, we choose the MOSFET that can support higher current. In addition, we include wireless energy transfer for the light bulb and on-off control from a smartphone into levitating magnetic lamp. The advantages of this project are the ability to make the light bulb float with more stability, and the control circuit that is not overheat. In addition, the feature of the project includes wireless energy transfer that is safe from the animals and the connection to the smartphone that makes the people convenient for their daily life.

Keywords: Levitation Magnetic Lamp, Wireless Power Transfer, Power Transfer Efficiency, Resonance Power Converter, Controllable Power Lamp for Smartphone

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมศาสตร์เล่มนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการเล่มนี้ ที่กรุณาให้ความรู้ ในด้านวิชาการคอยให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางรวมถึงข้อเสนอแนะที่ดีจนเกิดผลสำเร็จ อีกทั้งยัง สอนให้คิดวิเคราะห์ และแก้ปัญหาด้วยความสามารถ นอกจากนั้นยังคอยให้คำปรึกษา และคำแนะนำ ในการวางแผนชีวิตให้มีคุณภาพมีเป้าหมายที่ชัดเจน ด้วยความรักและความหวังดีที่มีต่อตัวลูกศิษย์ คอยให้กำลังใจ และเคียงข้างเสมอ

ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่คอยให้ความรู้ ทำให้สามารถนำความรู้ความสามารถที่ได้จากการศึกษาเล่าเรียนมาประยุกต์ใช้ในการทำโครงการ วิศวกรรมศาสตร์จนประสบความสำเร็จ

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่คอยสนับสนุนอยู่เคียงข้างกันและรับฟัง ทุกๆปัญหาฝ่าฝืนทุกอุปสรรคผ่านทั้งช่วงเวลาแห่งความสุข และช่วงเวลาแห่งความยากลำบากมาด้วยกัน จนถึงช่วงเวลาสุดท้ายของการเรียน

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา และมารดาของผู้จัดทำที่อบรมสั่งสอนให้เป็นคนดีของสังคม และ ยังคงเป็นกำลังใจที่ยิ่ง ซึ่งคอยสนับสนุนให้ทำในสิ่งที่รัก และชอบคอยปลอบโยนอยู่เคียงข้างในทุกๆ วันที่ ท้อแท้เป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้คณะผู้จัดทำก้าวข้ามผ่านช่วงเวลาความยากลำบากไปด้วยความภาคภูมิใจ

ผู้จัดทำโครงการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ฎ
ประมวลคำย่อ	จ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของวงจร Magnetic Levitation	3
2.1.1 เส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ	3
2.1.2 สนามแม่เหล็กของโซลินอยด์	3
2.1.3 สภาพเหนี่ยวนำของขดลวดโซลินอยด์	4
2.2 หลักการสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation)	5
2.3 การถ่ายโอนพลังงานไร้สาย	7
2.3.1 การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็ก (Inductive Power Transfer)	7
2.3.2 ผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	8
2.4 วงจรเรโซแนนซ์	9
2.4.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance)	9
2.4.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance)	11

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 องค์ประกอบของคุณภาพ (Q-Factor)	14
2.6 ความเหนี่ยวนำ	15
2.6.1 ความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-Inductance)	15
2.6.2 ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)	16
2.6.3 ประเภทของตัวเหนี่ยวนำ	19
2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ	20
2.7 การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กโดยใช้ทฤษฎีคู่ควบ (Coupled Mode)	21
2.8 การเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดคู่ควบ (Mutual Inductance of Coupled Coils)	21
2.9 อินเวอร์เตอร์	24
2.9.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์	24
2.9.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	24
2.10 Eddy Current	25
2.11 วงจรควบคุมไร้สายโดยใช้ Application ผ่าน Smartphone	26
2.11.1 บอร์ด Arduino Uno R3	26
2.11.2 รีเลย์ (Relay)	27
2.11.3 โครงสร้างของรีเลย์	27
2.11.4 หลักการทำงานของรีเลย์	27
2.11.5 ข้อคำนึงถึงการใช้งานรีเลย์ทั่วไป	28
2.11.6 มอดูลรีเลย์แบบ 2 ช่อง	28
2.11.7 NodeMCU Devkit 1.0	30
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการถ่ายโอนพลังงานไร้สาย	32
2.12.1 วงจรสมมูลของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย	32
2.12.2 ประสิทธิภาพของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 แผนการดำเนินงาน	43

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.1 การทดสอบประสิทธิภาพของวงจร Magnetic Levitation Lamp	44
3.1.2 การทดสอบประสิทธิภาพของวงจร Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0	45
3.1.3 การทดสอบประสิทธิภาพของวงจร โดยรวม Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission NodeMCU Devkit 1.0	46
3.2 วงจรภาคส่ง	47
3.2.1 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM ความถี่สูงแบบปรับค่าได้	47
3.2.2 ขดลวดภาคส่ง	47
3.2.3 ตัวเก็บประจุภาคส่ง	49
3.3 วงจรภาครับ	50
3.3.1 วงจรภาครับแบบอนุกรม	50
3.4 การออกแบบเซ็นเซอร์แสงอินฟราเรด	52
3.5 การออกแบบ PID Control Algorithm ใช้ในการควบคุมสนามแม่เหล็ก	54
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง	55
4.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง Magnetic Levitation Lamp	55
4.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง Wireless transmission	55
4.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง Wireless transmission และ NodeMCU Devkit 1.0	56
4.2 วิธีทำการทดลอง	63
4.2.1 วิธีทำการทดลอง Magnetic Levitation Lamp	63
4.2.2 วิธีทำการทดลอง Wireless Transmission and NodeMCU Devkit 1.0	63
4.3 สรุปผลการทดลอง	64
4.3.1 สรุปผลการทดลองจากรูป 4.1 และ 4.2	64
4.3.2 สรุปผลการทดลองจากรูป 4.3 – 4.6	73

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปลผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปลผล	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
เอกสารอ้างอิง	83
ภาคผนวก	85
ประวัติย่อผู้ทำโครงการ	103

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขาสัญญาณและการเชื่อมต่อ	30
2.2 พารามิเตอร์สำหรับความสัมพันธ์ของอัตราขยายแรงดันและความถี่อ้างอิงตามงานวิจัย	35
4.1 ตำแหน่งที่เซนเซอร์ตรวจจับ (Position) ที่แสดงใน Serial monitor เมื่อเวลา (Time) เปลี่ยนแปลงที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet	64
4.2 ค่า DC Power Supply ที่แสดงใน Serial monitor เมื่อเวลา (Time) เปลี่ยนแปลงที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet	66
4.3 ค่า Velocity ที่แสดงใน Serial monitor เมื่อเวลา (Time) เปลี่ยนแปลงที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet	68
4.4 ค่าที่ได้จาก Serial monitor เมื่อเวลา (time) เปลี่ยนแปลงไปที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet	70
4.5 อัตราขยายและประสิทธิภาพของระบบ Magnetic Levitation Lamp ขณะที่หลอดไฟลอยอยู่บนอากาศ	73
4.6 อัตราขยายและประสิทธิภาพของระบบ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง	73
4.7 อัตราขยายและประสิทธิภาพของระบบโดยรวม ขณะเปิดวงจร Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง	77

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ	3
2.2 สนามแม่เหล็กของโซลินอยด์	4
2.3 สัญญาณสามเหลี่ยมเทียบกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง	6
2.4 สัญญาณสามเหลี่ยมเทียบกับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	6
2.5 วงจรสมมูลของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็ก	8
2.6 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	9
2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรีแอกแตนซ์และความถี่	10
2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมูสเฟสและความถี่	10
2.9 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	11
2.10 ความต้านทานรวมของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	11
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างรีแอกแตนซ์และความถี่เรโซแนนซ์	13
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความถี่เรโซแนนซ์	13
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและความถี่	15
2.14 ความเหนี่ยวนำของขดลวด	15
2.15 ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ	19
2.16 ความสัมพันธ์ของกฎฟาราเดย์	22
2.17 การออกแบบการเชื่อมต่อด้วยตัวเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)	22
2.18 การเกิด Eddy current loss	25
2.19 พอร์ต Arduino Uno R3	26
2.20 รีเลย์ที่ใช้งาน	27
2.21 สภาวะการทำงานของรีเลย์	27
2.22 บอร์ดรีเลย์ขนาด 2 ช่อง	28
2.23 ขาสัญญาณ	29
2.24 บอร์ด NodeMCU Devkit 1.0 (ESP-12E) Version 2	31
2.25 NodeMCU Devkit 1.0 (ESP-12E) Version 2	31
2.26 แบบจำลองของระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยแม่เหล็ก	33
2.27 วงจรสมมูลของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็ก	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันและความถี่ของวงจรมอดูเลชัน $k = 0.2$ ซึ่งอ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากงานวิจัย ดังตารางที่ 2.2	36
2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันและความถี่ของวงจรมอดูเลชัน $k = 0.2$ ซึ่งอ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากงานวิจัย ดังตารางที่ 2.2	36
2.30 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรมอดูเลชันซึ่งต่อแบบอนุกรมทำงานที่ ω_H และ ω_S กับ ตัวประกอบคุณภาพของโหลดอ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากงานวิจัย ตามตารางที่ 2.2	39
2.31 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของการถ่ายโอนพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับ องค์ประกอบคุณภาพของโหลด (Q_L) อ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากงานวิจัย ตามตารางที่ 2.2	41
2.32 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการถ่ายโอนพลังงานของวงจรมอดูเลชันและ ขนทาน เมื่ออัตราขยายของระบบเป็นค่าคงที่ใช้ค่าอ้างอิงตามตารางที่ 2.2	41
3.1 ภาคตัดขวางของขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ	49
3.2 ตัวเก็บประจุภาคส่งขนาด 22 nF	50
3.3 วงจรมอดูเลชันแบบอนุกรม	51
3.4 ขดลวดแกนอากาศแบบ Loop	51
3.5 การติดตั้งฮาร์ดแวร์สำหรับการวัดตำแหน่งของแม่เหล็กลอยได้	53
4.1 แผนภาพในการต่ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง Magnetic Levitation Lamp	57
4.2 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตามรูปที่ 4.1	58
4.3 แผนภาพในการต่ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง Wireless transmission	59
4.4 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตามรูปที่ 4.3	60
4.5 แผนภาพในการต่ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง Wireless transmission และการต่อ NodeMCU Devkit 1.0	61
4.6 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตามรูปที่ 4.5	62
4.7 กราฟตำแหน่งที่เซนเซอร์ตรวจจับ (Position) เทียบกับเวลา (Time) ที่ ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet	65

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟ DC Power Supply ที่แสดงใน Serial monitor เมื่อเวลา (Time) เปลี่ยนแปลงที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet	67
4.9 กราฟ Velocity ที่แสดงใน Serial monitor เมื่อเวลา (Time) เปลี่ยนแปลงที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet	69
4.10 ค่าที่ได้จาก Serial monitor เมื่อเวลา (time) เปลี่ยนแปลงไปที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet	72
4.11 อัตราขยายแรงดันของวงจร Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ขณะหลอดไฟลอยอยู่บนอากาศ โดยเปลี่ยนแปลงค่าความถี่	74
4.12 อัตราขยายกระแสของวงจร Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ขณะหลอดไฟลอยอยู่บนอากาศ โดยเปลี่ยนแปลงค่าความถี่	75
4.13 กราฟประสิทธิภาพของวงจร Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ขณะหลอดไฟลอยอยู่บนอากาศ โดยเปลี่ยนแปลงค่าความถี่	76
4.14 อัตราขยายแรงดัน ขณะเปิดวงจร Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง	78
4.15 อัตราขยายกระแส ขณะเปิดวงจร Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง	79
4.16 ประสิทธิภาพของระบบโดยรวม ขณะเปิดวงจร Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง	80

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
a	ค่าเฉลี่ยรัศมีของขดลวด	นิ้ว
B_c	ความเก็บประจุซีเซสแตนส์	ซีเมนต์
B_L	ความเหนี่ยวนำซีเซสแตนส์	ซีเมนต์
C	ตัวเก็บประจุ	ฟารัด
C_T	ตัวเก็บประจุออสซิลเลเตอร์	ฟารัด
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด	เมตร
f	ความถี่	เฮิรตซ์
f_0	ความถี่เรโซแนนซ์	เฮิรตซ์
G	ความนำไฟฟ้าของวงจร	ซีเมนต์
I	กระแส	แอมแปร์
k	ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงของเส้นแรงแม่เหล็ก	-
L	ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า	เฮนรี่
l	ความยาวของขดลวด	นิ้ว
M	ความเหนี่ยวนำร่วม	-
N	จำนวนรอบของขดลวด	รอบ
$Q - Factor$	องค์ประกอบคุณภาพ	-
R	ความต้านทาน	โอห์ม
R_T	ค่าความต้านทานออสซิลเลเตอร์	โอห์ม
V_s	แรงดันที่แหล่งจ่าย	โวลต์
w	ความกว้างของขดลวด	นิ้ว
X_c	ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์	โอห์ม
X_L	ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์	โอห์ม
Y	แอดมิตแตนซ์ของวงจร	ซีเมนต์
Z	อิมพีแดนซ์	โอห์ม
λ	เส้นแรงเชื่อมโยง	เวเบอร์
η	ประสิทธิภาพของระบบ	-

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
μ	ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์	-
ϕ_m	ค่าเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด	เวเบอร์

ประมวลคำย่อ

คำย่อ	คำอธิบาย
<i>AC</i>	ไฟฟ้ากระแสสลับ
<i>DC</i>	ไฟฟ้ากระแสตรง
<i>IC</i>	วงจรรวม
<i>Q-Factor</i>	องค์ประกอบคุณภาพ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

จากเทคนิคในการส่งพลังงานไร้สายจะส่งพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็ก แต่นอกจากส่งพลังงานได้แล้วนั้นยังสามารถสร้างขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยมีจุดเริ่มต้นมาจากนักวิทยาศาสตร์ คือ ฮันส์ คริสเตียน เออร์สเตด(Hans Christian Oersted) ศาสตราจารย์ทางปรัชญาธรรมชาติใน กรุงโคเปนเฮเกน ประเทศเดนมาร์ก และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากนักวิทยาศาสตร์หลายๆ ท่าน โดยกล่าวว่า “กระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กรอบตัวนำขดลวด” การควบคุมค่าสนามแม่เหล็ก โดยใช้ทฤษฎีการเหนี่ยวนำขดลวดตัวนำโซเลนอยด์เกิดขั้วแม่เหล็กเกิดขึ้นเหนือได้ ซึ่งขั้วแม่เหล็กเดียวกันเจอกันจะผลักกัน ขั้วแม่เหล็กต่างกันเจอกันจะดูดเข้าหากัน แต่ถ้าหากควบคุมค่าสนามแม่เหล็กได้ก็จะสามารถควบคุมแรงสมดุลให้ค่าทั้งหมดเป็นศูนย์ได้ วัตถุจะหยุดนิ่งอยู่บนอากาศเรียกว่า Magnetic levitation

ปัจจุบันนี้ ความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ซึ่งได้รับการพัฒนา และความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายนี้เป็นเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากภาคส่ง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ไปยังโหนดที่ต่อเข้ากับระบบไร้สาย ซึ่งที่ความถี่เรโซแนนซ์จะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายนี้เป็นการลดอันตรายที่อาจเกิดจากการเชื่อมต่อโดยใช้สายนำ ซึ่งเทคนิคนี้มีจุดเริ่มต้นมาจากนักวิทยาศาสตร์ คือ นิโคลาส เทสลา (Nikola Tesla) และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากนักวิจัยหลายท่าน และถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลาย เช่น การส่งพลังงานให้กับคอมพิวเตอร์ไร้สาย แต่ปัญหาที่สำคัญของเทคนิคดังกล่าวคือ ประสิทธิภาพของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจะต่ำกว่าระบบที่มีการเชื่อมต่อโดยใช้สายตัวนำซึ่งเป็นผลจากความสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านอากาศ

ส่วน Smartphone ในปัจจุบันได้มีส่วนเข้ามาในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมากกับมนุษย์ ดังนั้นโครงการนี้จึงนำ Smartphone มาใช้กับการควบคุมการเปิด - ปิดในการส่งพลังงานไร้สาย ในขณะที่วัตถุลอยอยู่บนอากาศว่าง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการถ่ายโอนพลังงานไร้สาย
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของ Smartphone กับชุดแบบจำลอง
- 1.2.3 เพื่อนำหลักการขดลวดเหนี่ยวนำมาใช้กับหลอดไฟลอย (Magnetic Levitation Lamp)

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 หลอดไฟสามารถลอยอยู่บนอากาศได้ด้วยแรงของสนามแม่เหล็ก
- 1.3.2 ควบคุมการเปิด - ปิดของหลอดไฟ LED โดยผ่าน Smartphone
- 1.3.3 ศึกษาและออกแบบวงจรการถ่ายโอนพลังงานไร้สาย
- 1.3.4 ตัวควบคุมสามารถแสดงผลบนหน้าจอ Smartphone ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ศึกษาหลักการทางฟิสิกส์ “ความสมดุลของแรง” เมื่อหลอดไฟลอยอยู่บนอากาศ
- 1.4.2 เข้าใจหลักการทำงานและทฤษฎีการถ่ายโอนพลังงานนำไฟฟ้าไร้สาย
- 1.4.3 สามารถนำหลักการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายไปใช้ได้ในชีวิตประจำวัน

บทที่ 2

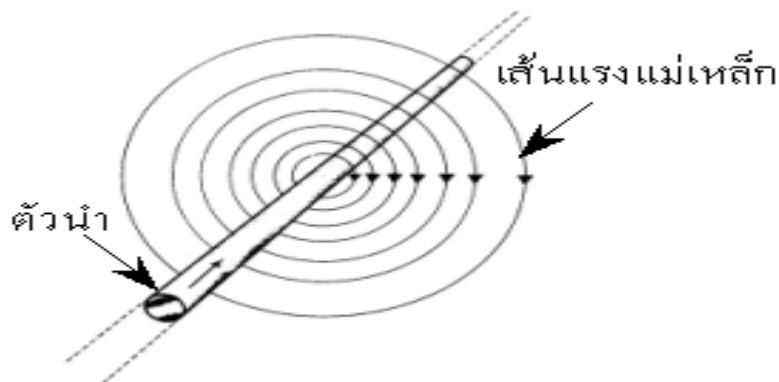
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ได้ใช้ในการศึกษาถึงที่มาของโครงงานวิศวกรรมนี้ โดยจะกล่าวถึง หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของวงจร Magnetic Levitation การสร้างสัญญาณ PWM การถ่ายโอนพลังงานไร้สาย วงจรเรโซแนนซ์ วงจรแม่เหล็ก วงจรอินเวอร์เตอร์ หลักการทำงาน Arduino Uno R3 Relay NodeMCU Devkit 1.0

2.1 หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของวงจร Magnetic Levitation

2.1.1 เส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

จากรูปที่ 2.1 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปวงกลม โดยเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางไปในทิศตามเข็มนาฬิกา เมื่อกระแสมีทิศทางพุ่งเข้า และจะมีไปในทิศทวนเข็มนาฬิกา เมื่อกระแสพุ่งออก

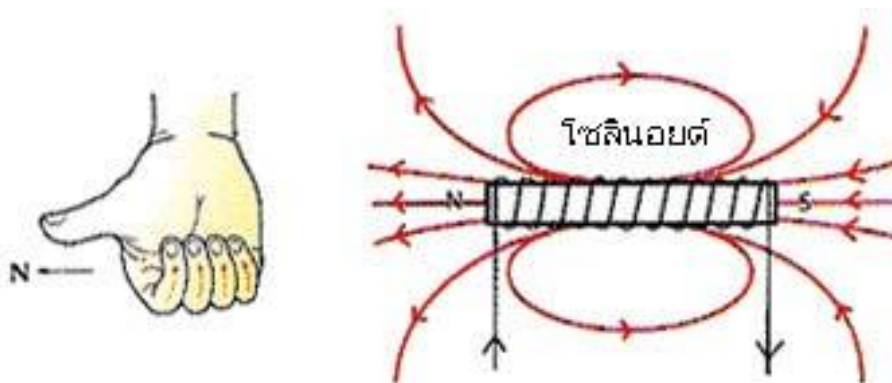


รูปที่ 2.1 เส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

ที่มา: <http://tumelectromagnet.blogspot.com/>

2.1.2 สนามแม่เหล็กของโซลินอยด์

เมื่อนำขดลวดตัวนำที่มีฉนวนหุ้มมาขดเป็นวงกลมหลายๆวง เรียงซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอก ขดลวดที่ได้นี้เรียกว่า โซลินอยด์ (solenoid) เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านโซลินอยด์จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น การหาทิศของสนามแม่เหล็กใช้วิธีการกำมือขวาแบบเดียวกับการหาทิศของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลมปลายขดลวดที่สนามแม่เหล็กพุ่งออกจะเป็นนิ้วเหนือ และอีกปลายหนึ่งซึ่งสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าจะเป็นนิ้วใต้ ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.2 สนามแม่เหล็กของโซลินอยด์

ที่มา: <https://sites.google.com/site/stp62magnetandmagneticfield/home/>

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากโซลินอยด์ มีค่าสูงสุดที่บริเวณแกนกลางของโซลินอยด์ และขนาดของสนามแม่เหล็กนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มหรือจำนวนรอบของขดลวดเพิ่ม ถ้าใส่แท่งเหล็กอ่อนไว้ที่แกนกลางของโซลินอยด์ เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านโซลินอยด์แท่งเหล็กอ่อน จะมีสมบัติเป็นแม่เหล็กโดยแม่เหล็กที่เกิดจากวิธีนี้เรียกว่า แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnet) สนามแม่เหล็กของแม่เหล็กไฟฟ้าจะเพิ่ม เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่ม และจำนวนรอบต่อความยาวของขดลวดเพิ่ม แต่เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้า แท่งเหล็กอ่อนจะหมดสภาพแม่เหล็กทันที ตามสมการ

$$B = \mu \frac{NI}{l} = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- N คือ จำนวนรอบของลวดโซลินอยด์
 - I คือ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านในลวดโซลินอยด์
 - B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กในลวดโซลินอยด์
 - l คือ ความยาวของขดลวดโซลินอยด์
 - μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability)

2.1.3 สภาพเหนี่ยวนำของขดลวดโซลินอยด์

ขดลวดโซลินอยด์ที่มีจำนวนขดลวด N รอบ ยาว l พื้นที่หน้าตัด A จะมีปริมาตรเป็น $V = Al$ และจำนวนขดต่อความยาว $n = NI$ จะมีสภาพเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{N\phi_B}{I} \quad (2.2)$$

โดยฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายในโซลินอยด์ $B = \frac{\mu_0 NI}{l}$

$$L = \frac{NBA}{I} \quad (2.3)$$

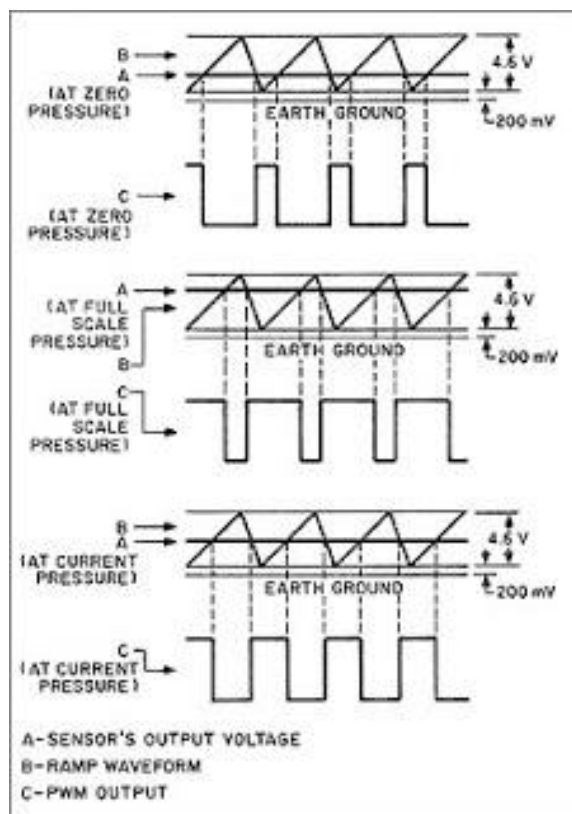
$$L = \frac{NA}{I} \left(\frac{\mu_0 NI}{l} \right) \quad (2.4)$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} = \mu_0 n^2 Al = \mu_0 n^2 V \quad (2.5)$$

สภาพเหนี่ยวนำของโซลินอยด์สามารถเพิ่มขึ้นได้ โดยการใส่วัสดุอื่นที่มีค่าสภาพซึมซาบของตัวกลาง (permeability) สูงเข้าไปแทนที่ว่างปริมาตร V ในแกนของโซลินอยด์

2.2 หลักการสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation)

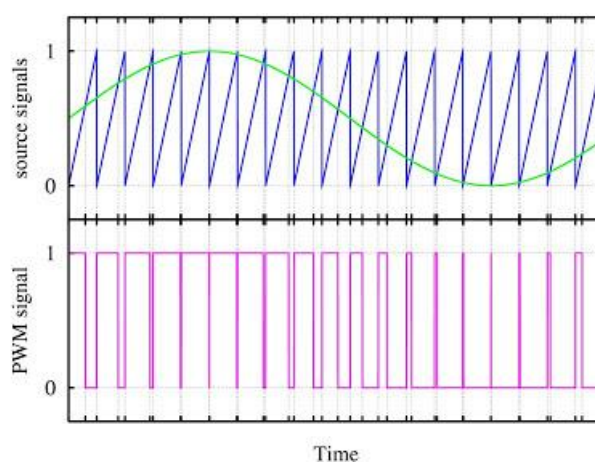
คือ การปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกัน และสองสัญญาณที่วานี้ก็คือสัญญาณ "สามเหลี่ยม" กับสัญญาณที่ต้องการปรับความกว้างของพัลส์ ยกตัวอย่างเช่น ถ้านำสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม เราก็จะได้สัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างคงที่ ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 สัญญาณสามเหลี่ยมเทียบกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มา: <http://introduction-pwm.blogspot.com/2007/09/pwm.html>

แต่ถ้าเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเป็นสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะทำให้เกิดความกว้างของพัลส์ที่เปลี่ยนแปลงตามไป ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 สัญญาณสามเหลี่ยมเทียบกับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ที่มา: Achieving Stable Magnetic Levitation On The Arduino Platform Michael O. Morken and Brett R. Haffner Department of Physics, Wheaton College, Wheaton, IL 60187

2.3 การถ่ายโอนพลังงานไร้สาย

เป้าหมายของการส่งพลังงานแบบไร้สายคือการถ่ายโอนการผลิตไฟฟ้าจากต้นกำเนิดไปยังปลายทาง ซึ่งการส่งพลังงานแบบไร้สายจะช่วยเพิ่มความสะดวกสบายในการพกพา และนอกจากนี้ยังตอบสนองความต้องการของอุปกรณ์ที่ผ่านมา และเทคโนโลยี ซึ่งมีอยู่แล้วใช้เทคนิคแบบไร้สายสำหรับการดำเนินงานที่แตกต่างกัน และการสื่อสารเช่น Wi-Fi ที่ใช้ในแล็ปท็อป และโทรศัพท์มือถือสำหรับการเข้าถึงอินเทอร์เน็ต

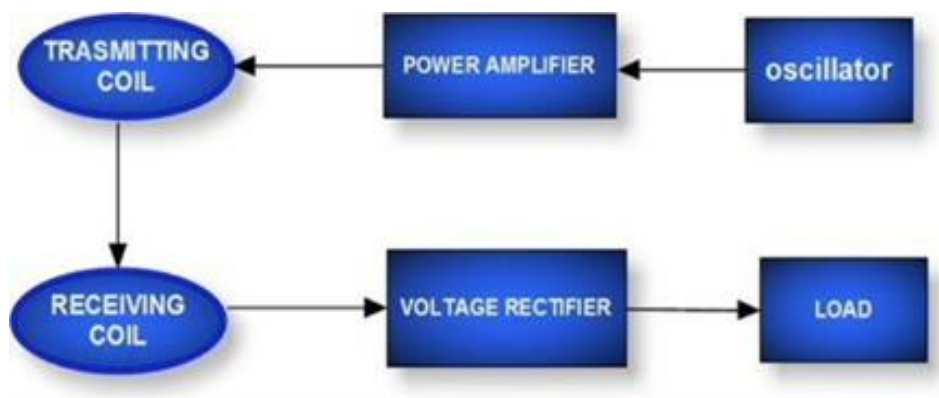
นิโคลาส เทสลา (Nikola Tesla) เป็นผู้บุกเบิกของแนวคิดการส่งพลังงานแบบไร้สาย และเขาดำเนินการแนวความคิดของเขาในปี 1902 ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในเวลานั้น ตั้งแต่นั้นมาผู้คนจำนวนมากอย่างนักวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องในการขยายความคิดนี้และบรรลุผลในเชิงบวกสำหรับการส่งในช่วงปิดในปี 2007 ทีมที่ Massachusetts Institute of Technology (MIT) ประสบความสำเร็จในการถ่ายโอนอำนาจแบบไร้สายในช่วงกลางโดยใช้เสียงสะท้อนโดยแม่เหล็กแสงหลอดไฟ 60W ในระยะ 2 เมตร

2.3.1 การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็ก (Inductive Power Transfer)

การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็ก สามารถใช้งานได้ตั้งแต่แรงดันไฟฟ้าระดับต่ำถึงแรงดันไฟฟ้าระดับสูง โดยการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบนี้จะใช้ขดลวดเป็นอุปกรณ์ภาคส่งและภาครับของระบบ ซึ่งการใช้ขดลวดนั้นจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงเรียกการต่อขดลวดดังกล่าวว่า การเชื่อมต่อของแม่เหล็ก (Magnetic Coupling) การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าด้วยสนามแม่เหล็ก จะเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency)

เมื่อต้องการถ่ายโอนพลังงานจากภาคส่งไปยังภาครับ ซึ่งมีระยะห่างกันค่อนข้างมากนั้นสามารถใช้ระบบ 2 coils หรือ multi-coils มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการโอนถ่ายพลังงานได้ โดยสามารถนำขดลวดมาวางเพิ่มระหว่างภาครับ และภาคส่ง ซึ่งจะเรียกขดลวดดังกล่าวว่า ขดลวดถ่ายทอดพลังงาน

สำหรับระบบการโอนถ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยสนามแม่เหล็กนั้นมีข้อดี คือ สามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในอุปกรณ์มีระยะห่างระหว่างช่องว่างที่กว้างได้ และมีย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 10 kHz ถึง 10 MHz แสดงดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็ก

ที่มา: (Institute of Electrical and Electronic Engineers : IEEE) Mandal, Tanuj Kumar (2006).

Wireless transmission of electricity development and possibility. Proceedings of sixth international symposium Nikola Tesla. Belgrade, Serbia.

2.3.2 ผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เนื่องจากการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายนี้เป็นระบบซึ่งใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการดำเนินงาน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องศึกษาอันตรายที่อาจเกิดจากการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายนี้

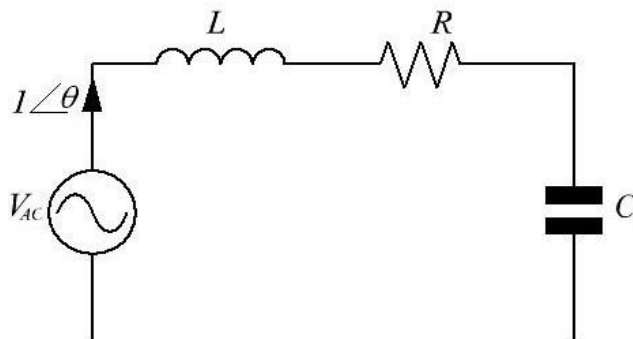
ในอดีตได้มีนักวิทยาศาสตร์ทำการศึกษาถึงอันตรายดังกล่าว คือ Henry Becquerel และ Marie Curie เนื่องจากในระหว่างที่ทำการทดลองเกี่ยวกับสารกัมมันตรังสี คือ ยูเรเนียม และเรเดียม พบว่า บริเวณผิวหนังเกิดรอยไหม้ภายหลังจึงค้นพบว่า รังสีที่แผ่ออกมานั้นมีความอันตราย เนื่องจากความถี่ที่สูงจะทำให้สารมีอำนาจทะลุทะลวง (Penetrating) ที่สูง ดังนั้นสารกัมมันตรังสีดังกล่าว ก็จะมีอำนาจทะลุทะลวงที่สูงเช่นกัน โดยผลกระทบที่จะกล่าวถึงมีดังนี้

- ความถี่ต่ำกว่า 1 *MHz* พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้ จะไม่เหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนในร่างกาย (Body Heating) แต่ถ้าหากว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกจากแหล่งกำเนิดกระแสที่มีความเข้ม 10 *mA/m* จะส่งผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในร่างกาย

- ความถี่สูงกว่า 10 *GHz* และระดับพลังงาน 1000 *w/m* จะทำให้อุณหภูมิในร่างกายสูงขึ้น 1 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้ทำลายเซลล์ดวงตาและเกิดการไหม้บริเวณผิวหนัง

2.4 วงจรเรโซแนนซ์

2.4.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance)



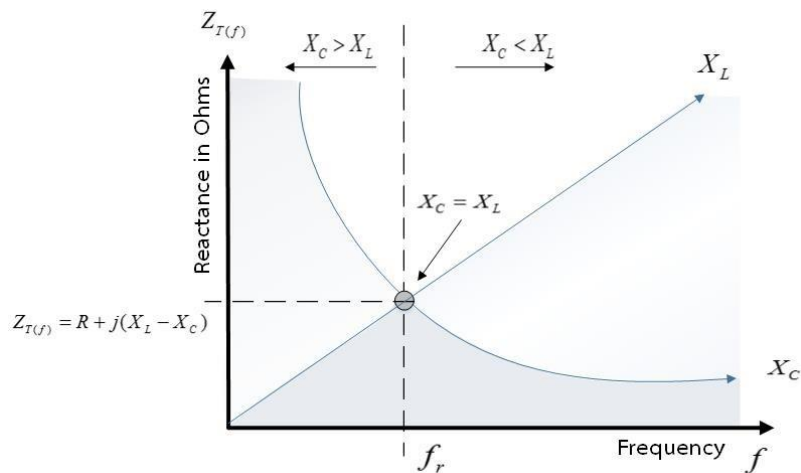
รูปที่ 2.6 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

ที่มา: โครงการวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมดังรูปที่ 2.6 เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ และปรับความถี่ของแหล่งจ่าย ที่ความถี่เรโซแนนซ์ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (X_L) จะเท่ากับค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (X_C) ซึ่งผลของการเรโซแนนซ์ทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าน้อยที่สุด และเหลือเพียงค่าความต้านทานเท่านั้นสามารถพิจารณาได้จาก (2.6) และความถี่เรโซแนนซ์จะสามารถหาได้จาก (2.7)

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.6)$$

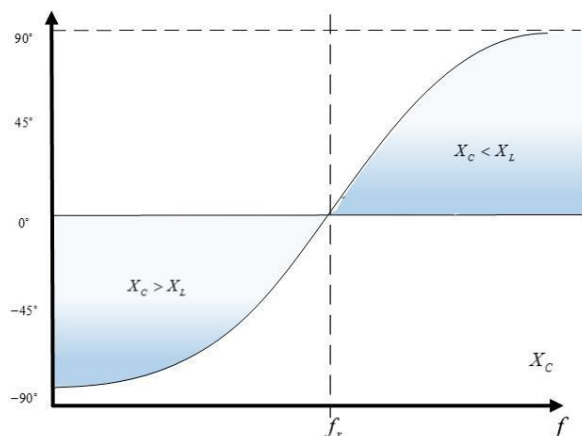
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรีแอกแตนซ์และความถี่

ที่มา: โครงการงานวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

จากกราฟรูปที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติของรีแอกแตนซ์ที่ความถี่ต่างกัน ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่า ที่ความถี่ต่ำๆ รีแอกแตนซ์ของระบบจะแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุมากกว่าตัวเหนี่ยวนำในทางกลับกัน หากพิจารณาที่ความถี่สูงๆ นั้นรีแอกแตนซ์ของระบบจะแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำมากกว่าตัวเก็บประจุ ส่วนที่ความถี่เรโซแนนซ์นั้นค่าความเก็บประจุจะเท่ากับค่าตัวเหนี่ยวนำซึ่งค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นกระแสจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อพิจารณาด้วยกฎของโอห์ม



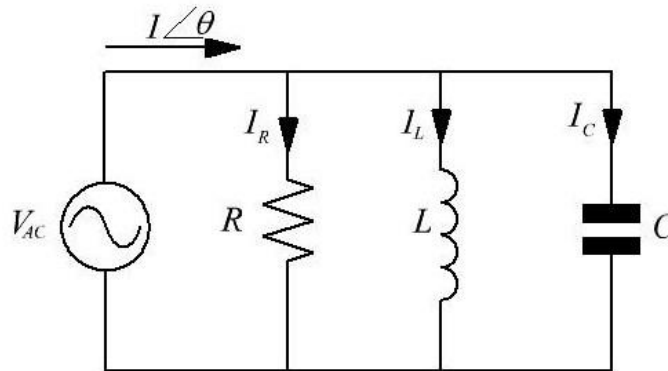
รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสและความถี่

ที่มา: โครงการงานวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

ขณะที่ความถี่มีค่าน้อยกว่าความถี่เรโซแนนซ์ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (Capacitive Reactance) จะมีค่ามากกว่า อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (Inductive Reactance) ทำให้ค่ามุมของอิมพีแดนซ์เป็นลบ และเข้าใกล้ -90° ดังรูปที่รูปที่ 2.8 เช่นเดียวกันในกรณีที่อินดักทีฟรีแอกแตนซ์จะมีค่ามากกว่า

คาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ที่ความถี่ซึ่งมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ และค่ามุมของอิมพีแดนซ์จะเป็นบวกและเข้าใกล้ $+90$

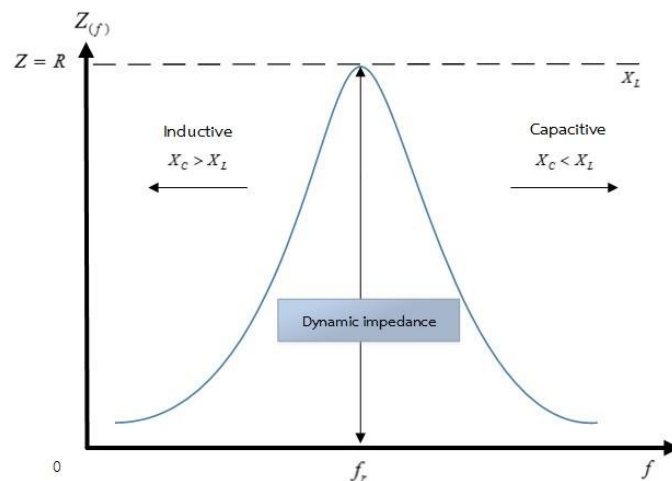
2.4.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance)



รูปที่ 2.9 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

ที่มา: โครงการวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

วงจรไฟฟ้าแบบขนานดังรูปที่ 2.9 ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ โดยค่าความต้านทานรวมของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ความต้านทานรวมของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

ที่มา: โครงการวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

ผลของความต้านทานรวมจะสูงขึ้นมากที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งการกระตุ้นของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานมีผล ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงตกคร่อมอิมพีแดนซ์ และกระแสที่ไหลภายในวงจรจากรูปที่ 2.10 สามารถหาค่าแอมิตแดนซ์ของระบบได้ดังนี้

$$Y = \frac{1}{Z} = \sqrt{G^2 + B^2} \quad (2.8)$$

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.9)$$

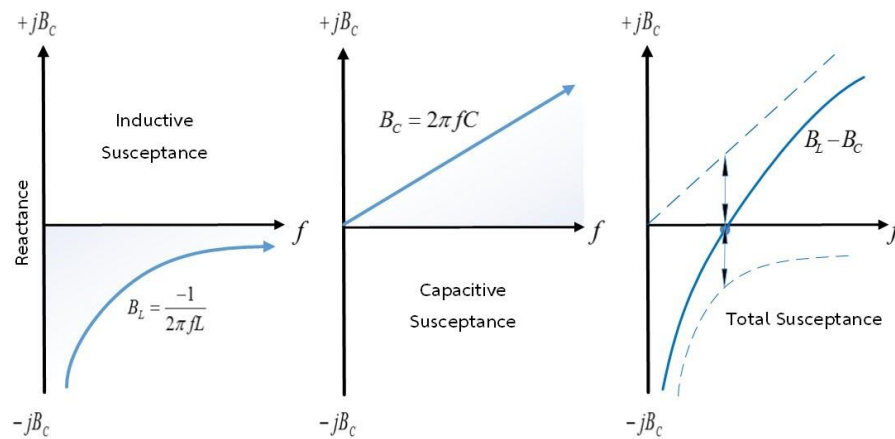
$$B_L = \frac{1}{2\pi fL} \quad (2.10)$$

$$B_C = 2\pi fC \quad (2.11)$$

เมื่อ Y คือ แอทธิตแตนซ์ของวงจร
 G คือ คอนดัคแตนซ์ของวงจร
 B_L คือ อินดัคทีฟซีเชสแตนส์
 B_C คือ คาปาซิทีฟซีเชสแตนส์

เมื่อ $X_L = X_C$ ส่งผลให้วงจรเหลือเพียงค่าความต้านทานเพียงค่าเดียวเช่นเดียวกับวงจร
 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม และค่าความถี่เรโซแนนซ์สามารถคำนวณหาได้จาก (2.12)

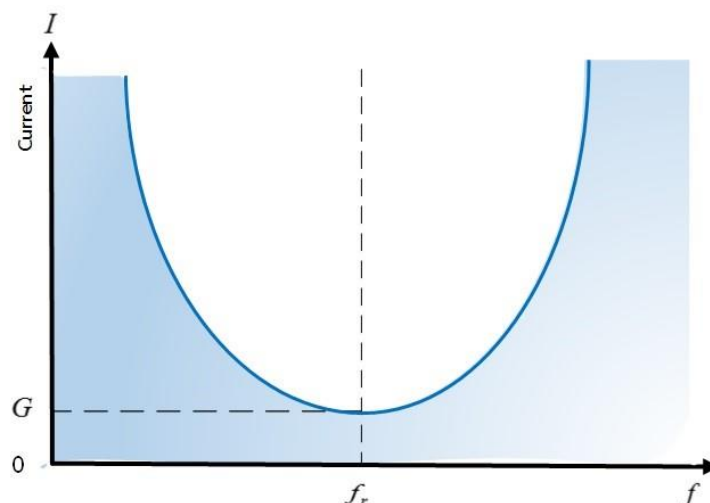
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างรีแอกแตนซ์และความถี่เรโซแนนซ์

ที่มา: โครงการวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

จากรูป 2.11 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างรีแอกแตนซ์และความถี่เรโซแนนซ์ โดย B_L เป็นสัดส่วนตรงข้ามกับความถี่ ดังเห็นได้จากกราฟไฮเพอโบลิก ส่วน B_C จะเป็นส่วนโดยตรงกับความถี่ ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยกราฟเส้นตรง และเมื่อนำกราฟทั้งสองมารวมกัน พิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์ผลต่างของซัสเซปแตนซ์ทั้งสองจะมีค่าเท่ากับที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ รีแอกแตนซ์ของระบบจะเสมือนตัวเหนี่ยวนำ และส่งผลให้เกิดการล้าหลังของตัวประกอบกำลัง แต่เมื่อพิจารณาที่ความถี่ซึ่งมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ รีแอกแตนซ์ของระบบจะเสมือนตัวเก็บประจุ และส่งผลให้เกิดการนำหน้าของตัวประกอบกำลัง โดยตัวประกอบกำลังจะเป็นยูนิตี (Unity) หรือมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อซัสเซปแตนซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความถี่เรโซแนนซ์

ที่มา: โครงการวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

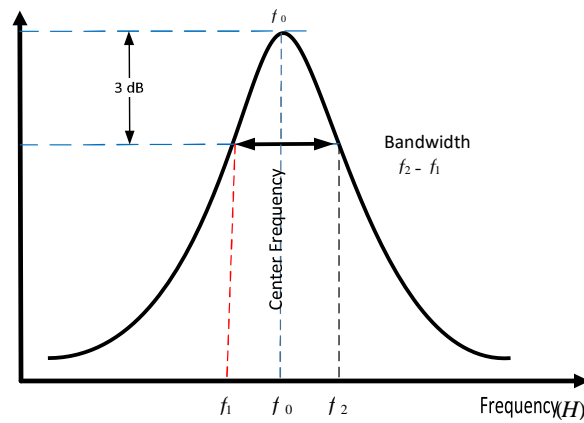
กราฟกระแสดังรูปที่ 2.12 เป็นผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งค่าของกระแสในช่วงเริ่มต้นนั้นจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นลดลง และต่ำที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์แล้วจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้งจนมีค่ามากที่สุด เช่นเดียวกับตอนเริ่มต้นเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงไปที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ค่า B_L จะมากกว่า B_C และค่ามุมของ Y จะเป็นมุมลบของอิมพีแดนซ์ต่อจากนั้นจะกลายเป็นบวก และเข้าใกล้ $+90^\circ$ เมื่อความถี่เข้าใกล้ศูนย์ ส่วนที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์มุมของอิมพีแดนซ์จะเป็นศูนย์ และการเปลี่ยนแปลงของมุมจะอยู่ในฟังก์ชันของความถี่เชิงมุม ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงที่เร็วมากตามค่าความต้านทาน

2.5 องค์ประกอบของคุณภาพ (Q-Factor)

องค์ประกอบของคุณภาพ (Q - Factor) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญมากในเรื่องที่มีความเกี่ยวข้องกับขดลวด (Coil) และวงจรเรโซแนนซ์ (Resonance Circuit) โดยค่าองค์ประกอบคุณภavn นี้จะแสดงคุณสมบัติของขดลวดหรือวงจรเรโซแนนซ์ ว่าจะยอมให้คลื่นผ่านสะดวกในช่วงความถี่กว้างเท่าใดหรือกล่าวได้ว่า องค์ประกอบคุณภavn นี้เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่เก็บสะสมในวงจรเรโซแนนซ์ต่อพลังงานที่ใช้ไปในวงจร ซึ่งค่าองค์ประกอบคุณภavn จะมีค่าสูง เมื่อบางกรณีมีความสูญเสียพลังงานน้อย ดังสมการ (2.13)

$$Q - Factor = \frac{\text{reactive} - \text{power}}{\text{real} - \text{power}} \quad (2.13)$$

ค่าองค์ประกอบคุณภavn (Q - Factor) นี้เป็นค่าที่ใช้กำหนดความเที่ยงตรงของความถี่ที่ใช้ในการเรโซแนนซ์ของขดลวดว่า ครอบคลุมในช่วงความถี่แคบหรือกว้างมากเพียงใด ซึ่งขดลวดที่มีช่วงความถี่แคบจะมีค่าองค์ประกอบคุณภavn (Q - Factor) สูง หมายความว่า ขดลวดชนิดนั้นมีคุณภาพดีค่าองค์ประกอบคุณภavn (Q - Factor) นี้เป็นค่าที่ใช้กำหนดความเที่ยงตรงของความถี่ที่ใช้ในการเรโซแนนซ์ของขดลวดว่าครอบคลุมในช่วงความถี่แคบหรือกว้างมากเพียงใด ซึ่งขดลวดที่มีช่วงความถี่แคบจะมีค่าองค์ประกอบคุณภavn (Q - Factor) สูง หมายความว่า ขดลวดชนิดนั้นมีคุณภาพดี



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและความถี่

ที่มา: โครงการวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

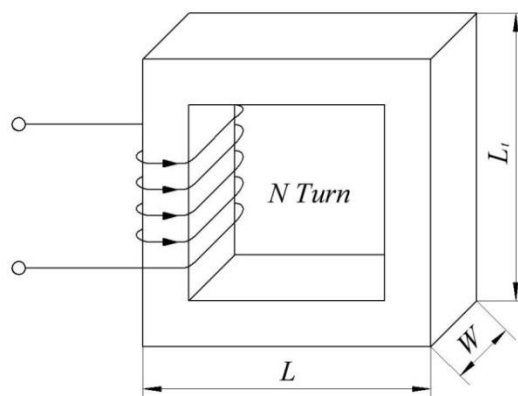
$$Q = \frac{\omega_r}{B} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (2.14)$$

เมื่อ B มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที

2.6 ความเหนี่ยวนำ

ความเหนี่ยวนำเป็นผลจากสนามแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำ โดยมีกระแสไหลผ่านตัวนำ ซึ่งกระแสไฟฟ้าในตัวนำนี้จะเป็นตัวสร้างฟลักซ์ขึ้นมา

2.6.1 ความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-Inductance)



รูปที่ 2.14 ความเหนี่ยวนำของขดลวด

ที่มา: โครงการวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

จากรูปที่ 2.14 มีขดลวดพันจำนวน N รอบ ซึ่งขดลวดดังกล่าวนี้เรียกว่า ความเหนี่ยวนำตัวเอง และสามารถกำหนดให้เส้นแรงเชื่อมโยง (Flux Linkage) ขดลวดต่อแอมแปร์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวมันเอง ดังสมการ

$$\lambda = N\phi \quad (2.15)$$

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (2.16)$$

$$L = \frac{N\phi}{i} \quad (2.17)$$

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (2.18)$$

เมื่อ λ คือ เส้นแรงเชื่อมโยง
 L คือ ความเหนี่ยวนำ
 i คือ กระแสที่จ่ายให้กับขดลวด
 N คือ จำนวนรอบตัวนำ
 ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก

2.6.2 ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

การพิจารณาจรรยาแม่เหล็กนั้น การเปลี่ยนแปลงของกระแส i_1 ที่ไหลในขดลวดปฐมภูมิ จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_1 ซึ่งขณะที่เปิดวงจรด้านขดลวดด้านทุติยภูมิ โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิ สำหรับเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_{21} ซึ่งเกิดขึ้นจากการผ่านกระแสเข้าไปยังขดลวดด้านปฐมภูมินั้นเป็นการเชื่อมโยงของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิไปยังทุติยภูมิ และเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_{21} ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิ

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_1}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (2.19)$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi_{21}}{dt} = N_2 \frac{d\phi_{21}}{dt} \times \frac{di_1}{dt} \quad (2.20)$$

$$M_{21} = N_2 \frac{d\phi_{21}}{di_1} \quad (2.21)$$

เมื่อ L_1 คือ ความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดปฐมภูมิ

M_{21} คือ ความเหนี่ยวนำร่วมที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิกระทำต่อทุติยภูมิด้วยกระแส i_1

แต่ถ้าผ่านกระแส i_2 เข้าไปยังขดลวดทุติยภูมิ ขณะที่ขดลวดปฐมภูมิเปิดวงจร จะมีผลให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_2 และแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิ โดยที่การเชื่อมโยงเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดทุติยภูมิไปยังขดลวดปฐมภูมิ ส่งผลให้มีเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_{21} ไหลผ่านไปยังขดลวดที่ปฐมภูมิ และเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดปฐมภูมิ

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi_2}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2.22)$$

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_{12}}{dt} = N_1 \frac{d\phi_{12}}{dt} \times \frac{di_2}{dt} \quad (2.23)$$

$$M_{12} = N_1 \frac{d\phi_{12}}{di_2} \quad (2.24)$$

เมื่อ L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองในขดลวดทุติยภูมิ

M_{12} คือ ความเหนี่ยวนำร่วมที่เกิดจากขดลวดทุติยภูมิต่อขดลวดปฐมภูมิโดยกระแส i_2 ดังนั้นแรงดันในขดลวดปฐมภูมิ คือ

$$k_1 e_1 = M_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (2.25)$$

ถ้ากำหนดให้

$$M_{12}M_{21} = N_1 \frac{d\phi_{21}}{di_1} N_2 \frac{d\phi_{12}}{di_2} \quad (2.26)$$

เมื่อ $\phi_{21} = k_1\phi_1$ โดยที่ k_1 เป็นค่าคงที่ เนื่องจากการเชื่อมโยงของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ เช่นเดียวกับ $\phi_{12} = k_2\phi_2$ โดยที่ k_2 เป็นค่าคงที่ เนื่องจากการเชื่อมโยงของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขดลวดทุติยภูมิและปฐมภูมิ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$M_{12}M_{21} = k_1k_2L_1L_2 \quad (2.27)$$

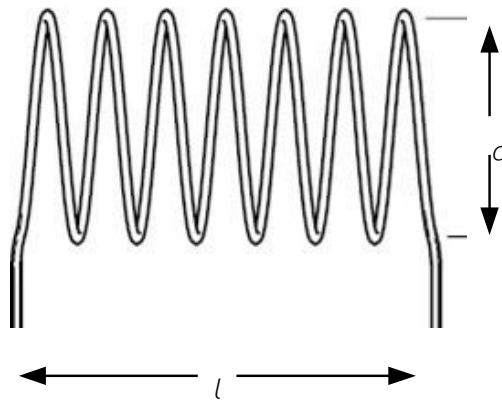
สำหรับในระบบเชิงเส้นนั้นกำหนดให้ $M_{12} = M_{21} = M$ โดยที่ M คือเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$M = k\sqrt{L_1L_2} \quad (2.28)$$

เมื่อ $k = \sqrt{k_1k_2}$ คือ สัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงของเส้นแรงแม่เหล็ก

2.6.3 ประเภทของตัวเหนี่ยวนำ

2.6.3.1 ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ



รูปที่ 2.15 ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ

ที่มา: โครงการวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ เป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีแกนหรือฐานรองทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น ฉนวน เช่น คาร์บอน พลาสติก ไฟเบอร์ หรืออาจพันลอยๆ ไว้โดยไม่มีแกนใดๆ รองรับ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศนี้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ความถี่สูงๆหรือความถี่วิทยุ (RF) จึงมักเรียกว่า RF Choke ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพราะจะไม่สามารถเพิ่มความเหนี่ยวนำที่แกนให้มากขึ้นได้ แต่ถ้าต้องการเพิ่มความเหนี่ยวนำให้มากขึ้นนั้นต้องเพิ่มจำนวนรอบของการพันขดลวด ให้มากขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำแกนอากาศได้ดังสมการ

$$L(\mu H) = \frac{d^2 n^2}{18d + 40l} \quad (2.29)$$

เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำในหน่วยไมโครเฮนรี

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด

n คือ จำนวนรอบของขดลวด

l คือ ความยาวของขดลวดหน่วยเป็นนิ้ว

2.6.3.2 ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็ก

เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานที่รองรับเส้นลวดที่ทำด้วยผงเหล็กอัดแน่น ช่วยลดผลจากกระแสไหลวน (Eddy Current) ซึ่งลดการเกิดสัญญาณในตัวเหนี่ยวนำได้ลดลง สามารถใช้ได้ภายในย่านความถี่สูง

2.6.3.3 ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์

เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานทำด้วยเฟอร์ไรต์ ค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับชนิดของเฟอร์ไรต์ด้วย ซึ่งมีข้อดี คือสามารถใช้งานได้ทั้งความถี่สูง และความถี่ต่ำ

2.6.3.4 ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์

เป็นแกนที่รองรับด้วยฐานเหล็กอัดแน่น โดยสร้างเป็นรูปวงแหวนมีข้อดี คือเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่แพร่กระจายออกไปภายนอก และสนามแม่เหล็กจากภายนอกจะไม่เข้ามารบกวนจึงสามารถทำให้ใช้งานได้ในความถี่สูง และลดขนาดของอุปกรณ์ให้เล็กลง

2.6.3.5 ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก

เป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีแกนหรือฐานรองรับด้วยเหล็กแผ่นบางวางซ้อนกัน ซึ่งแผ่นเหล็กนั้นจะเคลือบด้วยฉนวน มักนำไปใช้งานภายในย่านความถี่ต่ำ

2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ

2.6.4.1 จำนวนรอบของขดลวด

ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบขดลวด ถ้าหากจำนวนรอบของขดลวดมาก ค่าความเหนี่ยวนำจะมากขึ้นด้วย

2.6.4.2 วัสดุที่นำมาทำเป็นแกน

แกนแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กแตกต่างกัน ซึ่งเรียกว่า ค่าความซึมซาบ (Permeability) ถ้าหากมีความซึมซาบมาก ค่าความเหนี่ยวนำก็จะมากขึ้นด้วยเช่นกัน

2.6.4.3 พื้นที่หน้าตัดของแกน

ค่าความเหนี่ยวนำแปรผันตามพื้นที่หน้าตัดของแกน

2.6.4.4 ความยาวของแกน

แปรผกผันกับค่าความเหนี่ยวนำ ถ้าหากความยาวของแกนมากจะทำให้มีค่าความเหนี่ยวนำน้อย

2.7 การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กโดยใช้ทฤษฎีคู่ควบ (Coupled Mode)

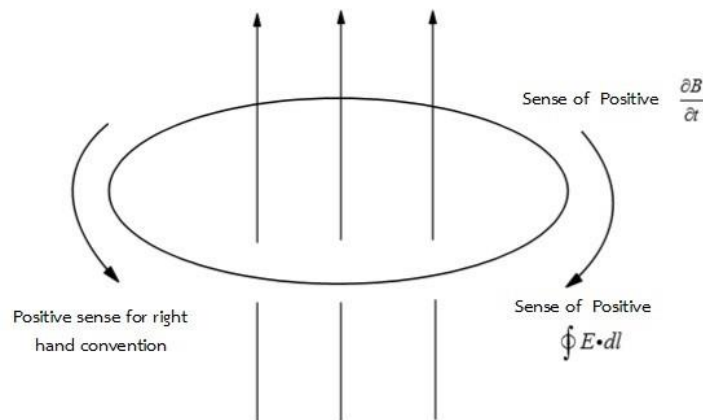
สัญญาณทางไฟฟ้า (Electric Signals) เป็นแนวคิดพื้นฐานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถส่งพลังงานและข้อมูลได้ ในด้านการใช้งานจะใช้หลักการพิจารณาตามหลักการทางฟิสิกส์ โดยการใช้งานนี้อาศัยพื้นฐานแนวคิดสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล (Near and Far fields) และการแผ่กระจายรังสีของคลื่น (Radiative Propagation) ซึ่งเกี่ยวข้องกับเสาอากาศ สนามระยะใกล้จัดเป็นสนามประเภทที่ไม่แผ่รังสี (Non-Radiative) เกิดขึ้นใกล้กับเสาอากาศที่ระยะสั้นๆ ของความยาวคลื่น และสามารถสูญหายรวดเร็ว ส่วนสนามระยะไกล (Far Field) จัดเป็นประเภทแผ่รังสี (Radiative) ซึ่งจะแพร่กระจายด้วยระยะความยาวที่เท่ากับ 2 เท่าของความยาวคลื่น เมื่อพิจารณาตั้งแต่เสาสัญญาณเป็นต้นไป การแผ่รังสีประเภทนี้จะสูญสลายช้ากว่าสนามระยะใกล้ โดยพลังงานที่ปล่อยออกมาจะสูญหายไปโดยเป็นส่วนส่วนกับระยะทางยกกำลังสอง

สำหรับขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มตั้งแต่ระยะความยาวคลื่นจากเสาสัญญาณจนถึงระยะเท่ากับ 2 เท่าของความยาวคลื่น ซึ่งรวมผลกระทบของสนามระยะใกล้ และระยะไกลที่เกิดขึ้นด้วย โดยการแพร่กระจายไปในพื้นที่ว่างเทคโนโลยีนี้จึงเหมาะจะใช้ส่งข้อมูลค่อนข้างมากกว่าการส่งพลังงานแบบไร้สาย หรือ Witricity (Wireless Electricity) จะแตกต่างจากการส่งข้อมูล แบบไร้สายซึ่งในเทคโนโลยีใหม่ๆ นั้นจะมีประโยชน์ในกรณีที่ต้องการพลังงานทันทีหรือต้องการใช้ พลังงานอย่างต่อเนื่อง แต่สายที่เชื่อมต่อนั้นไม่สะดวกเสี่ยงอันตราย เป็นต้น การถ่ายโอนพลังงานจะทำได้ เมื่อระยะสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเข้มพอที่จะถ่ายโอนพลังงานได้อย่างเหมาะสม ซึ่งการถ่ายโอน พลังงานไฟฟ้านั้นจะเกิดขึ้นได้ ถ้าทั้งตัวส่งและตัวรับแม่เหล็กสามารถเกิดการสะท้อนได้สำเร็จ ในหลักการทางฟิสิกส์แนวคิดของ Witricity เป็นรากฐานของสนามระยะใกล้ ซึ่งความสัมพันธ์เกี่ยวกับด้าน Resonant inductive coupling ส่วนการเชื่อมต่อผ่าน Magnetic Resonance หมายถึง การต่อระบบการทำงานของความถี่ที่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) หลักการของวิธีนี้อาศัยการสะท้อนกับ วัตถุแลกเปลี่ยนพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าหากไม่เกิดการสะท้อนกับวัตถุจะทำให้สามารถโอนถ่ายพลังงานได้น้อยมาก ระบบ Witricity ประกอบด้วยอุปกรณ์เรโซแนนซ์ (Resonators) 2 ตัว และแหล่งจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ สัญญาณการแผ่รังสีนั้นไม่เหมาะสมกับการถ่ายโอนพลังงานเหตุผลหลัก คือ การแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะสามารถถ่ายโอนพลังงานได้น้อย เนื่องจากพลังงานส่วนมากสูญเสีย

2.8 การเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดคู่ควบ (Mutual Inductance of Coupled Coils)

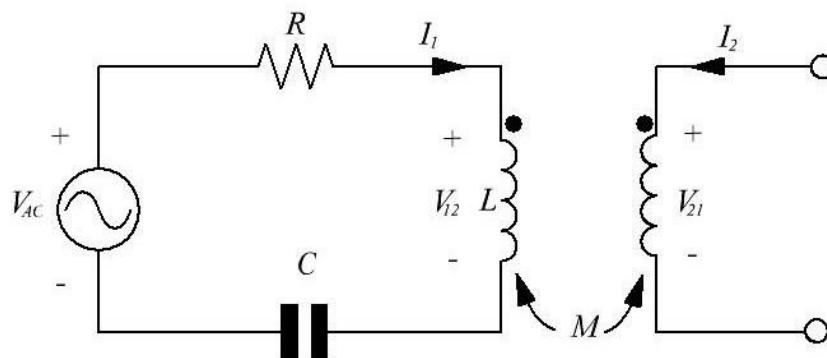
จากการวิเคราะห์ท่วงจรเรโซแนนซ์ เป็นส่วนหนึ่งของแนวคิดของตัวเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) และสิ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับการจำลองการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของสนามระยะใกล้ เมื่อสนามแม่เหล็กค่าหนึ่งถูกต่อเข้ากับส่วนหนึ่งของวงจร ทำให้แรงดันเหนี่ยวนำถูกสร้างขึ้น ภายใต้งैอนไข

ของกฎของฟาราเดย์ ดังแสดงดังรูป 2.16 โดยค่าของ M สามารถหาได้จากเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux) ที่เชื่อมต่อกับส่วนปฐมภูมิ และแบ่งโดยกระแส (I_2)



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของกฎฟาราเดย์

ที่มา: โครงการงานวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย



รูปที่ 2.17 การออกแบบการเชื่อมต่อ ด้วยตัวเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

ที่มา: โครงการงานวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

การพิจารณาวจรแม่เหล็กดังรูป 2.17 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลในขดลวดที่ (I_1) จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ_1) ขึ้นขณะที่เปิดวงจรด้านขดลวดที่ 2 โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าว จะส่งผ่านให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่ 1 สำหรับเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ_{21}) ซึ่งเกิดขึ้นจากการผ่าน กระแสแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่ 2 ดังนั้นจะสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$V_{21} = \frac{\psi_{21}}{I_2} \quad (2.30)$$

แรงดันจะถูกสร้างขึ้นในส่วนปฐมภูมิ

$$V_{21} = \frac{d\psi_{21}}{dt} = M \frac{I_2}{dt} \quad (2.31)$$

เช่นเดียวกันกระแสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในวงจรด้านปฐมภูมิจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสสร้างแรงดันในวงจรด้านทุติยภูมิ

$$V_{21} = \frac{d\psi_{21}}{dt} = M \frac{I_1}{dt} \quad (2.32)$$

ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง (Mutual Inductance) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยสอดคล้องกับความถี่เรโซแนนซ์และขดลวดเหนี่ยวนำภายใต้เงื่อนไขที่ได้ทำการพิจารณา อย่างไรก็ตามค่าความเหนี่ยวนำร่วม (M) จะได้รับผลจากพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต เช่น ความใกล้ชิดกันของขดลวดทั้งภาคส่ง และภาครับ รูปร่างและการกำหนดเป้าหมายตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นนั้นจากที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ คือ การที่กระแสเกิดขึ้นในวงจรหนึ่ง และเหนี่ยวนำให้สร้างแรงดันขึ้นในอีกวงจรหนึ่ง ส่วนเส้นแรงเมื่อเหล็กเชื่อมโยง (Flux Linkages) จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะส่งผลให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น

$$M_{12} = \frac{\int B_2 \cdot dS_1}{I_2} \quad (2.33)$$

เมื่อ B_2 คือ ฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากกระแส I_2

เนื่องจาก $M_{21} = M_{12}$ เมื่อใช้กฎของ Biot-Savart มาพิจารณาจะสามารถเขียนสมการบนแกนได้ดังนี้

$$B_z(0, d) = \frac{\mu I_2 a^2}{2(a^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.34)$$

และ Magnetic Vector Potential Approach เป็นแอปพลิเคชันของทฤษฎีสโตก (Stoke's Theorem) ซึ่งแสดงสมการดังนี้

$$M = \frac{\int (\nabla \times A_2) dS_1}{I_2} \quad (2.35)$$

2.9 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ คือการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ หรือระบบป้องกันไฟฟ้าขาดช่วง ซึ่งการใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อต้องการให้สามารถควบคุมได้ทั้งขนาด และความถี่ ซึ่งอินเวอร์เตอร์สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ประเภท คือ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) และอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI) โดยอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน มักจะเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูง

2.9.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สมมติว่าแรงดันด้านออก และกระแสไฟฟ้านำออกผ่านวงจรกรองความถี่สูงออกไปเหลือเฉพาะความถี่ต่ำ ดังนั้นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ใดจะเป็นรูปไซน์

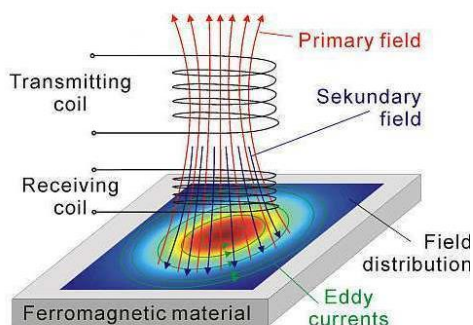
2.9.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิด คือ แบบฮาร์ฟบริดจ์ (Half-Bridge) และฟูลบริดจ์ (Full-Bridge) ในแบบฮาร์ฟบริดจ์ จะมีตัวเก็บประจุสองตัวต่อลำดับกันอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และหากกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุสองตัวมีค่าเท่ากัน จะทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของตัวเก็บประจุแต่ละตัวเท่ากับ ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงกว่าฮาร์ฟบริดจ์สองเท่า จึงเหมาะที่จะเลือกใช้สำหรับโหลดที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น

เงื่อนไขที่สำคัญของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาร์ฟบริดจ์และฟูลบริดจ์ คือ การทำงานของ สวิตช์ และต้องไม่ทำงานพร้อมกันในทุกช่วงเวลา แต่ถ้าหากทำงานพร้อมกันจะเกิดการลัดวงจรระหว่าง บัสบวกและบัสลบในทางอุดมคติเวลาการสวิตช์ซึ่งจะตรงข้ามกัน แต่ในทางปฏิบัติจะต้องการช่วงเวลา ที่สวิตช์ทั้งคู่ไม่นำกระแส ซึ่งจะเรียกว่า เดดไทม์ (Dead Time) โดยเป็นช่วงเวลาก่อนที่จะเปลี่ยน สถานะการสวิตช์ จากนำกระแสเป็นไม่นำกระแส

2.10 Eddy Current

Eddy Current คือกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำในเกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กขึ้น เมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามรูปที่ 2.18 จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่ายพื้นผิวของตัวนำมีค่า ไม่คงที่เกิดกระแสไฟฟ้าวงภายในตัวนำ จากภาพเป็น eddy current ไปใช้ประโยชน์เมื่อเราวางภาชนะ เหล็กบนเตาชนิดนี้ เตาจะเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าคือ eddy current ขึ้นที่ก้น ภาชนะเนื่องจากความต้านทานของภาชนะมีค่าต่ำเพราะทำจากโลหะจะทำให้เกิดกระแสค่อนข้างสูง ทำให้ เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียไปในรูปของความร้อนทำให้ภาชนะร้อนขึ้น

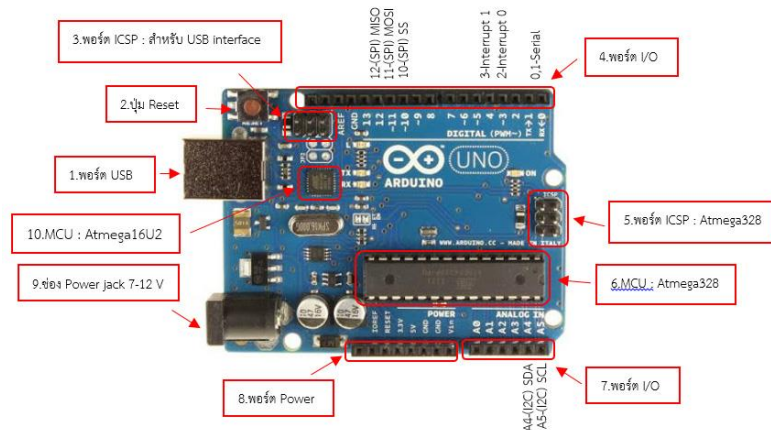


รูปที่ 2.18 การเกิด Eddy current loss

ที่มา: <http://www.mdpi.com/1424-8220/11/3/2525/htm>

2.11 วงจรควบคุมไร้สายโดยใช้ Application ผ่าน Smartphone

2.11.1 บอร์ด Arduino Uno R3



รูปที่ 2.19 พอร์ต Arduino Uno R3

ที่มา: <https://www.ioxhop.com/article/2/arduino>

1. USBPort: ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button: เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ Atmega16U2 เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port: ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2
4. I/O Port: Digital I/O ตั้งแต่ขา D0จนถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆเพิ่มเติมด้วย เช่น Pin 0, 1 เป็นขา Tx, Rx Serial, Pin 3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port: Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
6. MCU: Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
7. I/O Port: นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5
8. Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3V, +5V, GND, V_{in}
9. Power Jack: รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU: ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2

2.11.2 รีเลย์ (Relay)

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ ตัดต่อวงจรคล้ายกับสวิตช์ โดยใช้หลักการหน้าสัมผัส การที่จะทำให้มันทำงานก็ต้องจ่ายไฟให้มันตามที่กำหนด เพราะเมื่อจ่ายไฟให้กับตัวรีเลย์ มันจะทำให้หน้าสัมผัสติดกันกลายเป็นวงจรปิดและตรงกันข้ามทันทีที่ไม่ได้จ่ายไฟให้มัน มันก็จะกลายเป็นวงจรเปิด ไฟที่เราใช้ป้อนให้กับตัวรีเลย์ก็จะเป็นไฟที่มาจากอุปกรณ์ที่รีเลย์ทำการเชื่อมต่อ ดังนั้นทันทีที่เปิด อุปกรณ์เชื่อมต่อก็จะทำให้รีเลย์ทำงาน



รูปที่ 2.20 รีเลย์ที่ใช้งาน

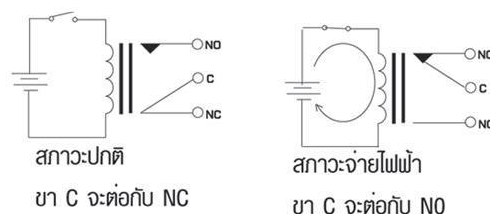
ที่มา: <https://www.arduinoall.com/product/422/%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B9%8C-12vdc-songle-power-relay-12-volt-10a-250vac>

2.11.3 โครงสร้างของรีเลย์

ภายในโครงสร้างของรีเลย์จะประกอบไปด้วยขดลวด 1 ชุด และหน้าสัมผัส ซึ่งในหน้าสัมผัส 1 ชุด จะประกอบไปด้วยหน้าสัมผัสแบบปกติปิด (Normally Close หรือ NC) ซึ่งในสภาวะปกติ ขานี้จะต่ออยู่กับขาร่วม (C) และหน้าสัมผัสปกติเปิด (Normally Open หรือ NO) ขานี้จะต่อเข้ากับขาร่วม (C) เมื่อขดลวดมีแรงดันตกคร่อม หรือกระแสไหลผ่านในปริมาณที่เพียงพอ ในรีเลย์ 1 ตัว อาจมีหน้าสัมผัสมากกว่า 1 ชุด ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ผลิต

2.11.4 หลักการทำงานของรีเลย์

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด จะทำให้ขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กไปดึง แผ่นหน้าสัมผัส ลงมาแตะหน้าสัมผัสอีกอันทำให้มีกระแสไหลผ่านหน้าสัมผัสไปได้



รูปที่ 2.21 สภาวะการทำงานของรีเลย์

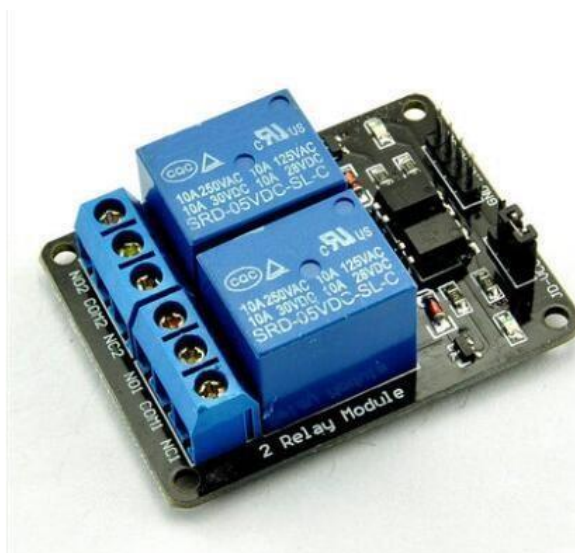
2.11.5 ข้อคำนึงถึงการใช้งานรีเลย์ทั่วไป

แรงดันใช้งาน คือแรงดันที่ทำให้รีเลย์ทำงานได้หากเราดูที่ตัวรีเลย์จะระบุค่าแรงดันที่ใช้งานเอาไว้ ซึ่งถ้าหากใช้แรงดันมากกว่าที่ระบุไว้จะขดลวดภายในตัวรีเลย์อาจจะขาดได้ หรือหากใช้แรงดันต่ำกว่ามาก รีเลย์จะไม่ทำงาน ส่วนในการต่อวงจรนั้นสามารถต่อขั้วใดก็ได้ เพราะตัวรีเลย์จะไม่ระบุขั้วต่อไว้ นอกจากรีเลย์ ชนิดพิเศษ

การใช้กระแสผ่านหน้าสัมผัส ยกตัวอย่างเช่นตัวรีเลย์ระบุไว้ 10A 250VAC คือหน้าสัมผัสของรีเลย์นั้นสามารถทน กระแสได้ 10 แอมแปร์ ที่ 250 โวลต์ (ไฟฟ้ากระแสสลับ) แต่การใช้งานควรที่จะใช้ งานที่ระดับกระแสต่ำกว่าที่ระบุไว้ เพราะถ้ากระแสผ่านหน้าสัมผัสของรีเลย์จะเสียหายได้

2.11.6 มอดูลรีเลย์แบบ 2 ช่อง

บอร์ดรีเลย์ขนาด 2 ช่อง มีตัวต่อเอาต์พุตที่รีเลย์เป็น NO COM NC สามารถใช้ขับโหลดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) โดยใช้สัญญาณในการควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์ลอจิก (TTL)



รูปที่ 2.22 บอร์ดรีเลย์ขนาด 2 ช่อง

ที่มา: <http://buaya-instrument.com/module-relay-2-channel-1109000002.html>

- คุณสมบัติ (Features)

(1) รีเลย์เอาต์พุตแบบมีหน้าสัมผัส 2 ชุดคือ หน้าสัมผัสแบบปกติเปิด (NO) และ หน้าสัมผัสแบบปกติปิด (NC) เรียกว่า single-doublethrow (SPDT)

(2) สั่งงานด้วยระบบแรงดัน 0-5 โวลต์ (TTL)

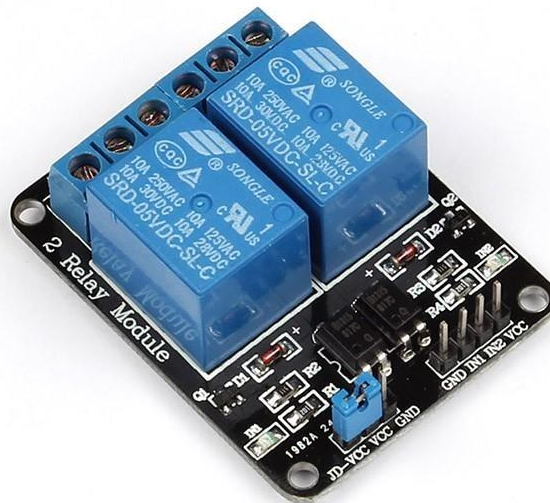
(3) รับแรงดันได้สูงสุด 250 โวลต์ (กระแสสลับ) 10 แอมแปร์ หรือ 30 โวลต์ (กระแสตรง)

10 แอมแปร์

- (4) มีแอลอีดี (LED) แสดงสถานะการทำงานของรีเลย์และแสดงสถานะของบอร์ด
- (5) มีจัมเปอร์สำหรับเลือกว่าจะใช้กราวด์ร่วมหรือแยก
- (6) มี OPTO-ISOLATED เพื่อแยกกราวด์ส่วนของสัญญาณควบคุมกับไฟที่ขับรีเลย์ออกจากกัน

- คุณสมบัติ (Specification)

- (1) ควบคุมไฟกระแสตรงได้สูงสุด 10 โวลต์ 10 แอมแปร์ และไฟกระแสสลับสูงสุด 250 โวลต์ 10 แอมแปร์
- (2) ระดับสัญญาณอินพุตควบคุมแบบทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์ลอจิก (TTL) ทำงานด้วยสัญญาณแบบ Active High
- (3) ขนาดรูยัดบอร์ด 3 มิลลิเมตร
- (4) ขนาด ยาว 55 มิลลิเมตร กว้าง 40 มิลลิเมตร และสูง 20 มิลลิเมตร
- (5) ขาสัญญาณและการเชื่อมต่อ (Pin Definition and Rating)



รูปที่ 2.23 ขาสัญญาณ

ที่มา: <https://www.arduinothai.com/product/44/2-channel-relay-10a-with-optocoupler-module>

ตารางที่ 2.1 ขาสัญญาณและการเชื่อมต่อ

ขาที่	คำอธิบาย
1	+VCC ขาไฟ 5 โวลต์กระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอก
2	GND กราวด์ของบอร์ด
3	GND กราวด์ของรีเลย์
4	ขาสัญญาณอินพุตรีเลย์ 1
5	ขาสัญญาณอินพุตรีเลย์ 2
6	+VCC ขาไฟ 5 โวลต์กระแสตรงจากบอร์ดอาร์ดูโน้
7	NC (Normally Closed) ซึ่งหมายถึงหน้าสัมผัสแบบปกติปิด
8	COM (Common) ที่จะตัดหรือต่อวงจรจากขาหน้าสัมผัสแบบปกติปิด (NC) หรือขาหน้าสัมผัส ปกติเปิด (NO)
9	NO (Normally Opened) ซึ่งหมายถึงหน้าสัมผัสแบบปกติเปิด

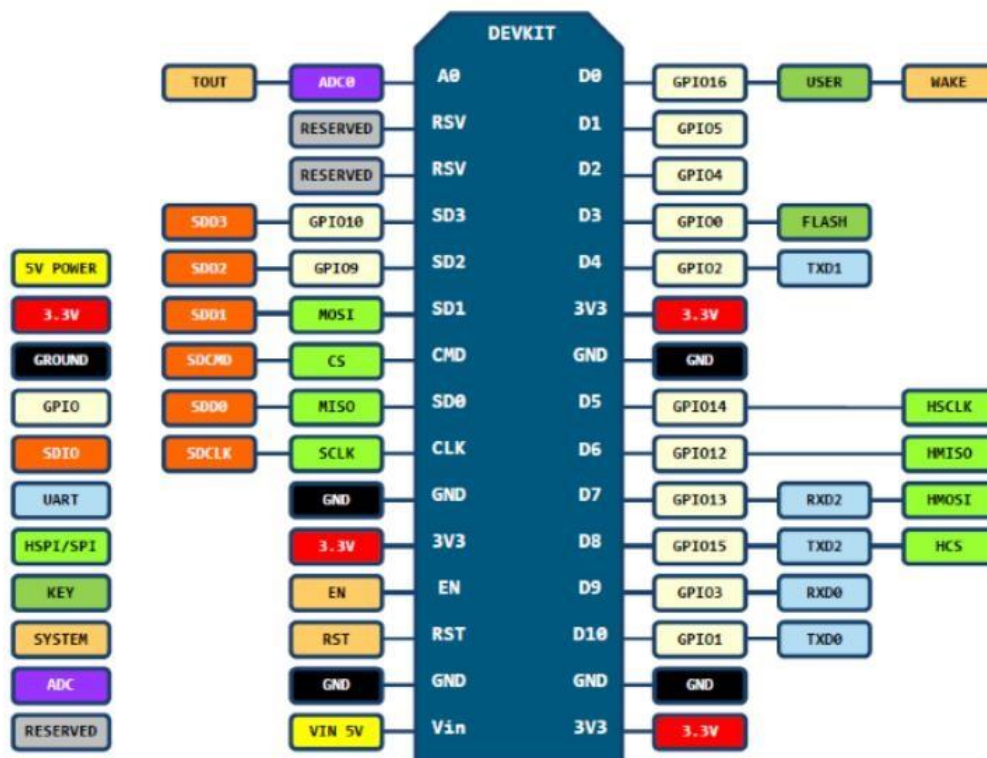
2.11.7 NodeMCU Devkit 1.0

NodeMCU คือ ประกอบไปด้วยตัวบอร์ด (Development Kit) และซอฟต์แวร์บนบอร์ด (Firmware) ที่เป็นโอเพ่นซอร์ส (Open source) สามารถเขียนด้วยภาษา Lau ได้ ทำให้การใช้งานได้ง่ายขึ้น มาพร้อมกับมอดูลสายพาย (WIFI ESP8266) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการใช้เชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต ตัวมอดูล ESP8266 นั้นมีอยู่ด้วยกัน หลายรุ่นมาก ตั้งแต่เวอร์ชัน ESP-01 ไปเรื่อยๆ จนถึง ESP-12 และที่ฝังอยู่ใน NodeMCU เวอร์ชันแรก นั้นเป็น ESP-12 แต่ในเวอร์ชัน 2 นั้นจะเป็น ESP-12E แทน ซึ่งการใช้งานโดยรวมก็ไม่ได้แตกต่างกันมากนัก NodeMCU นั้นมีลักษณะคล้ายอาร์ดูโน้ (Arduino) ตรงที่มีพอร์ตอินพุต และเอาต์พุตในตัว สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมอุปกรณ์ได้ โดยไม่ต้องผ่านอุปกรณ์อื่นๆ และเมื่อไม่นานมานี้ก็มีนักพัฒนาที่สามารถ ทำให้ Arduino IDE ใช้งานร่วมกับ NodeMCU ได้จึงทำให้ใช้ภาษา C หรือ C++ ในการเขียนโปรแกรมได้ ทำให้สามารถใช้งานได้หลากหลายยิ่งขึ้น NodeMCU สามารถทำอะไรได้มากมาย



รูปที่ 2.24 บอร์ด NodeMCU Devkit 1.0 (ESP-12E) Version 2

ที่มา: https://www.ebay.com/p/2pcs-NodeMCU-Devkit-1-0-WiFi-Network-Development-Board-Based-Esp8266-Module/1547127009?_trksid=p2047675.m4097.l9055



D0(GPI016) can only be used as gpio read/write, no interrupt supported, no pwm/i2c/ow supported.

รูปที่ 2.25 NodeMCU Devkit 1.0 (ESP-12E) Version 2

ที่มา: <https://embedded523372.wordpress.com/2016/04/15/nodemcu/>

- คุณลักษณะของ NodeMCU Devkit 1.0

- (1) ชุดพัฒนานี้ประกอบไปด้วยโมดูล ESP8266
- (2) มี GPIO PWM, 12C, 1-Wire และ ADC รวมอยู่บนบอร์ดเดียว
- (3) มี USB-TTL มาในตัวไม่จำเป็นต้องซื้อแยกเหมือนการใช้ ESP8266 ปกติทำให้ใช้งานได้

สะดวกขึ้น

- (4) มีขา GPIO 10 ขา ทุกๆขาสามารถเป็น PWM, 12C และ 1-Wire ได้
- (5) มี PCB Antenna สำหรับส่งสัญญาณไร้สาย
- (6) ใช้คอนเนกเตอร์แบบไมโครยูเอสบี (Micro-USB) สำหรับจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง เท่ากับ +5

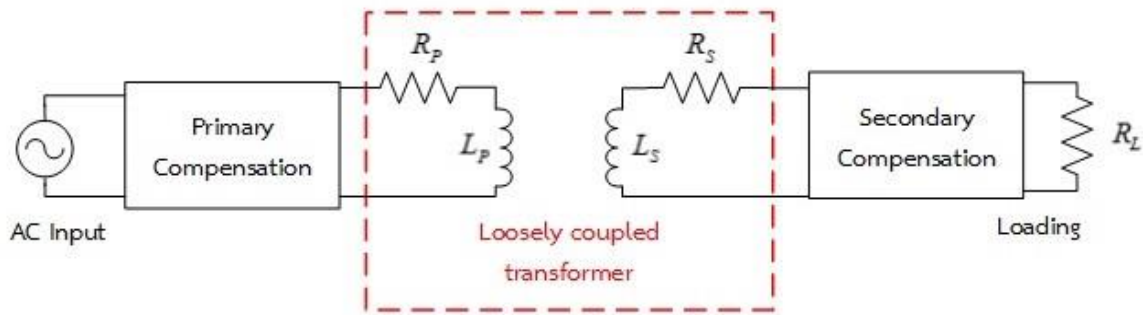
โวลต์ และสำหรับดาวน์โหลดซอฟต์แวร์

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการถ่ายโอนพลังงานไร้สาย

โครงการวิศวกรรมนี้ นำการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายมาใช้ โดยนำอัตราขยายแรงดันและประสิทธิภาพของระบบที่ดีที่สุดมาใช้ ซึ่งมีลักษณะการต่อของวงจรภาครับ ซึ่งมีแนวความคิดมาจากงานวิจัยจากสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์นานาชาติ (Institute of Electrical and Electronic Engineers: IEEE) Analysis and Comparison of Secondary Series- and Parallel-compensated Inductive Power Transfer System Operating for Optimal Efficiency and Load-Independent Voltage-Transfer Ratio

2.12.1 วงจรสมมูลของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็ก (Inductive Wireless Power Transfer System) นั้นเป็นระบบที่ใช้หลักการความเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก (Magnetic Induction) นำมาใช้งานอย่างแพร่หลายสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าทางกล เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ จะถูกพัฒนาเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแกนอากาศ (Loosely Coupled Transformer) โดยสามารถจำลองวงจรได้ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งมีวงจรเรโซแนนซ์ทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิที่ใช้ในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีการคู่ควบแบบร่วม (Mutual Coupling) ของขดลวดตัวนำทั้งสองด้าน โดยสิ่งที่แตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าแบบทั่วไป คือค่าการคู่ควบแบบร่วมจะมีค่าน้อยกว่า Leakage Inductance ของขดลวดด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ



รูปที่ 2.26 แบบจำลองของระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยแม่เหล็ก

ที่มา: (Institute of Electrical and Electronic Engineers : IEEE) Analysis and Comparison of Secondary Series- and Parallel-compensated Inductive Power Transfer System Operating for Optimal Efficiency and Load-Independent Voltage-Transfer Ratio

รูปที่ 2.26 แสดงแบบจำลองของระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยแม่เหล็ก ซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแหล่งจ่ายกระแส โดยแทนความต้านทานโหลดของระบบ และเป็นความต้านทานของขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ตามลำดับ ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบได้ดังสมการ

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (2.36)$$

เมื่อ L_p คือ ค่าความเหนี่ยวนำของแม่เหล็กด้านปฐมภูมิ

L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำของแม่เหล็กด้านทุติยภูมิ

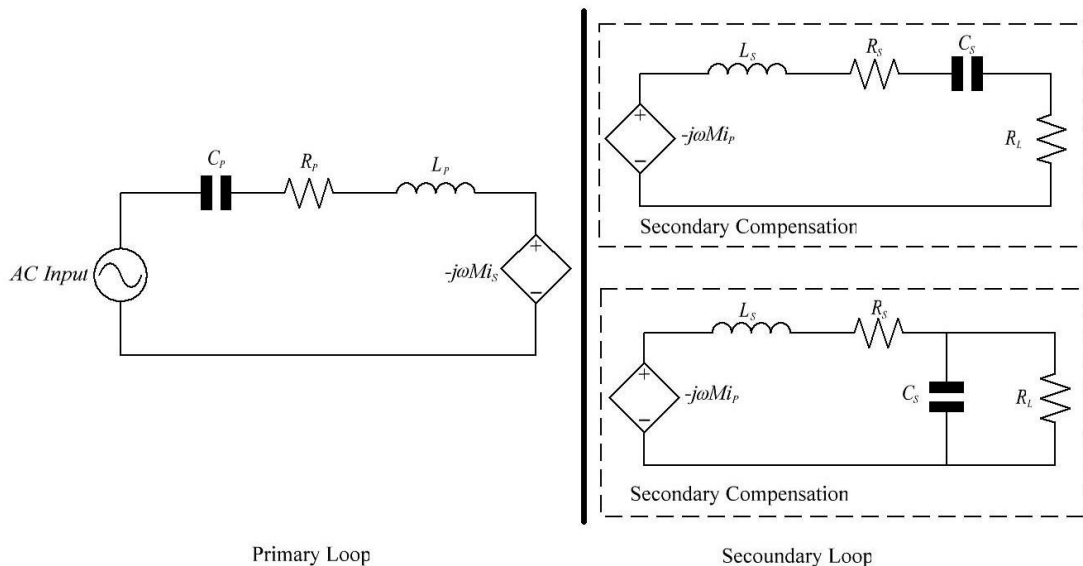
M คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วม

ค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแกนอากาศมักจะมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไปที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

2.12.2 ประสิทธิภาพของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการนำประสิทธิภาพเทียบกับย่านความถี่ใช้งานของภาครับซึ่งต่อแบบอนุกรมและขนาน โดยจะทำการแทนแหล่งจ่ายต้านปฏุมุมุมิ ดังรูปที่ 2.26 ด้วย ซึ่งเป็นการคำนวณ โดยละเว้นกระแสที่ไหลในวงจรปฏุมุมุมิ และวงจรปฏุมุมุมิ นั้นจะแยกออกจากวงจรทุติยภูมิ

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \quad (2.37)$$



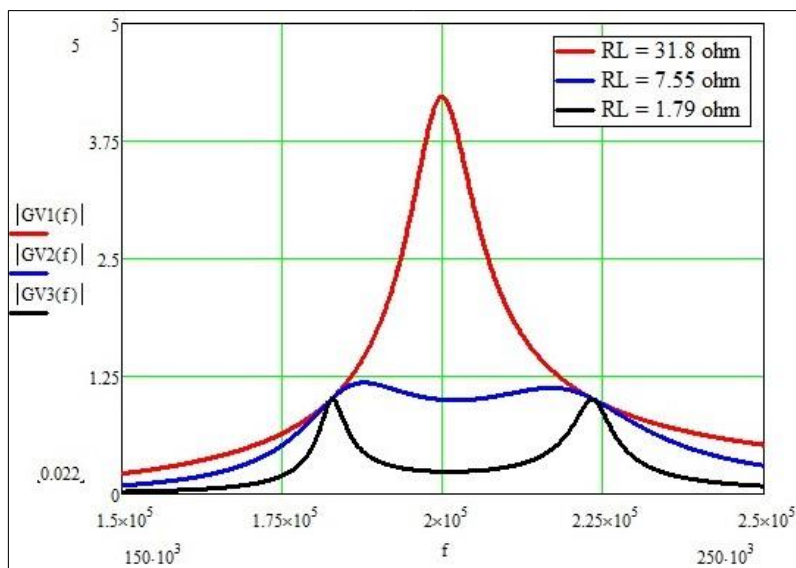
รูปที่ 2.27 วงจรสมมูลของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็ก

ที่มา: (Institute of Electrical and Electronic Engineers : IEEE) Analysis and Comparison of Secondary Series- and Parallel-compensated Inductive Power Transfer System Operating for Optimal Efficiency and Load-Independent Voltage-Transfer Ratio

อัตราขยายแรงดันของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายนั้นมีความสัมพันธ์กับความถี่ ซึ่งที่ความถี่เรโซแนนซ์จะมีกระแสไหลในวงจรสูงสุด ส่งผลให้มีอัตราขยายแรงดันของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายที่ดีกว่าความถี่อื่น ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.27 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.2

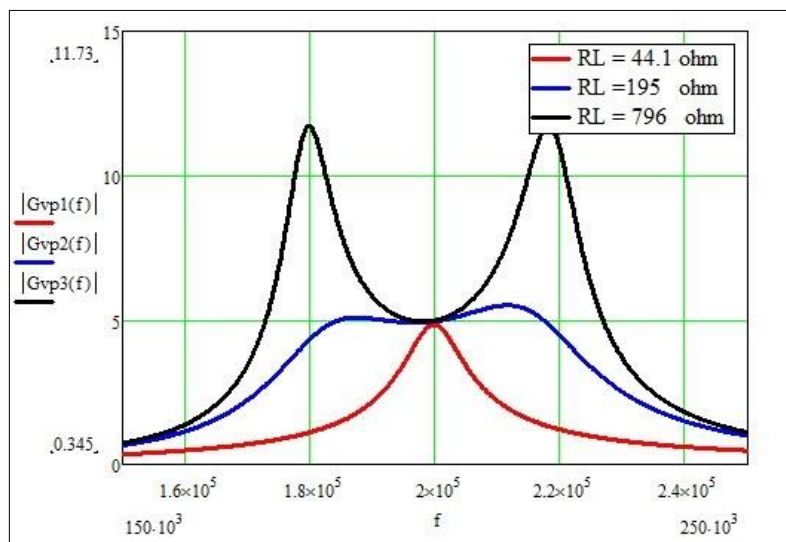
ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์สำหรับความสัมพันธ์ของอัตราขยายแรงดันและความถี่อ้างอิงตามงานวิจัย

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ	0.2
ความถี่เรโซแนนซ์	200 kHz
องค์ประกอบคุณภาพของขดลวดต้านปฐมภูมิและ ทุติยภูมิ	100
วงจรรอนุกรม - ค่าความเก็บประจุต้านปฐมภูมิ - ค่าความเก็บประจุต้านทุติยภูมิ - ค่าความเหนี่ยวนำต้านปฐมภูมิ - ค่าความเหนี่ยวนำต้านทุติยภูมิ	19.45 nF 20.13 nF 31.45 μF 32.55 μF
วงจรถนนาน - ค่าความเก็บประจุต้านปฐมภูมิ - ค่าความเก็บประจุต้านทุติยภูมิ - ค่าความเหนี่ยวนำต้านปฐมภูมิ - ค่าความเหนี่ยวนำต้านทุติยภูมิ	20.13 nF 20.13 nF 31.45 μF 32.55 μF



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันและความถี่ของวงจรถอนุกรม $k = 0.2$ ซึ่งอ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากงานวิจัย ดังตารางที่ 2.2

ที่มา: (Institute of Electrical and Electronic Engineers: IEEE) Analysis and Comparison of Secondary Series- and Parallel-compensated Inductive Power Transfer System Operating for Optimal Efficiency and Load-Independent Voltage-Transfer Ratio



รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันและความถี่ของวงจรถอนุกรม $k = 0.2$ ซึ่งอ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากงานวิจัย ดังตารางที่ 2.2

ที่มา: (Institute of Electrical and Electronic Engineers: IEEE) Analysis and Comparison of Secondary Series- and Parallel-compensated Inductive Power Transfer System Operating for Optimal Efficiency and Load-Independent Voltage-Transfer Ratio

ส่วนประสิทธิภาพของการถ่ายโอนพลังงานจะพิจารณาเพียงกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) โดยสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรภาคส่งและภาครับได้ ดังนี้

$$\eta_p = \frac{\Re(Z_r)}{R_p + \Re(Z_s)} \quad (2.38)$$

$$\eta_s = \frac{\Re(Z_s) - R_s}{\Re(Z_s)} \quad (2.39)$$

$$\eta_T = \eta_p \eta_s \quad (2.40)$$

เมื่อ η_p คือ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานของวงจรด้านปฐมภูมิ
 η_s คือ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานของวงจรด้านทุติยภูมิ
 η_T คือ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานของระบบ

2.12.2.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรภาครับซึ่งต่อแบบอนุกรม (Efficiency Analysis of Secondary Series Compensation)

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลของภาครับซึ่งต่อแบบอนุกรม จะสามารถพิสูจน์อิมพีแดนซ์ของวงจรได้ ดังนี้

$$\Re(Z_{r-s}) = \frac{\omega^2 M^2 R_0}{R_0^2 + X_s^2} \quad (2.41)$$

เมื่อ $R_0 = R_s + R_L$ และ $X_s = \omega L_s - \frac{1}{\omega C_s}$

และประสิทธิภาพของระบบซึ่งต่อวงจรแบบอนุกรมสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\eta(\omega) = \frac{1 - a(\omega)}{1 + b(\omega)} \quad (2.42)$$

$$a(\omega) = \frac{Q_{L-S}}{Q_{L-S} + Q_S(\omega)} \quad (2.43)$$

$$b(\omega) = \frac{1 + Q_0^2(\omega) \left(\frac{\omega}{\omega_S} - \frac{\omega_S}{\omega} \right)^2}{k^2 \frac{\omega}{\omega_P} \frac{\omega}{\omega_S} Q_P(\omega) Q_0(\omega)} \quad (2.44)$$

ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ จากสมการของโดเวลล์ (Dowell's equation) จะมีความเหมาะสมสำหรับความถี่ซึ่งต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ และตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) จะสามารถแสดงได้ ดังนี้

$$Q_S(\omega) = \frac{2Q_{S,\max}}{\frac{\omega_{Q_S}}{\omega} + \frac{\omega}{\omega_{Q_S}}} \quad (2.45)$$

$$Q_P(\omega) = \frac{2Q_{P,\max}}{\frac{\omega_{Q_P}}{\omega} + \frac{\omega}{\omega_{Q_P}}} \quad (2.46)$$

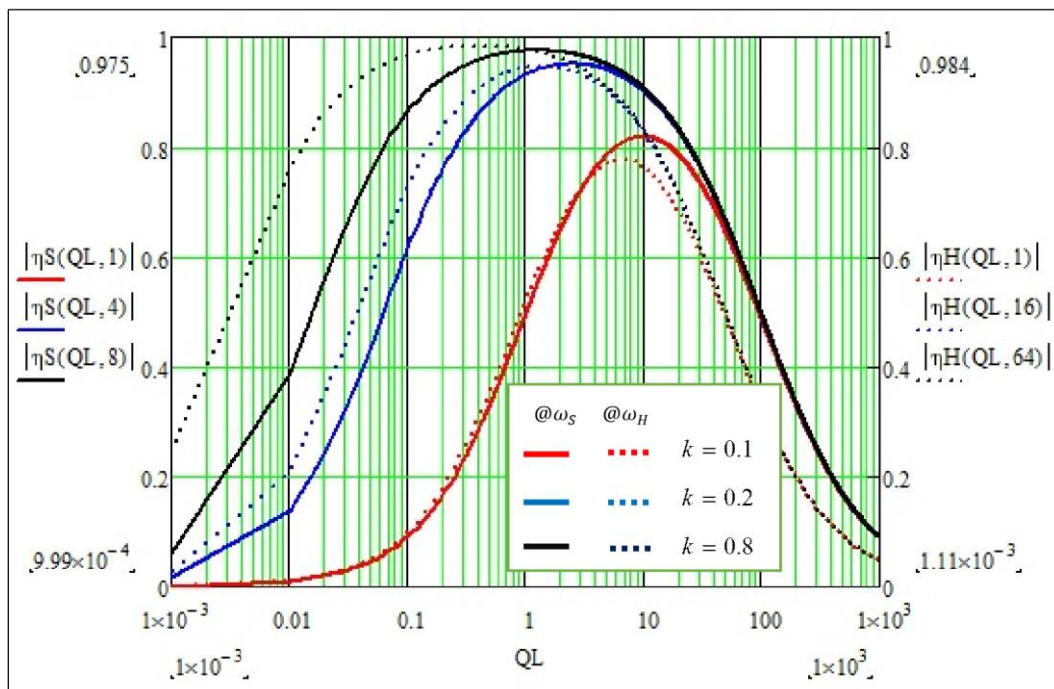
เมื่อ Q_S คือ ตัวประกอบคุณภาพของขดลวดของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ
 Q_P คือ ตัวประกอบคุณภาพของขดลวดของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ

$$Q_0(\omega) = \frac{Q_s(\omega)Q_{L-s}}{Q_s(\omega) + Q_{L-s}} \quad (2.47)$$

$$Q_{L-s} = \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \frac{1}{R_L} \quad (2.48)$$

ค่าตัวประกอบคุณภาพของขดลวดของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ จะมีค่ามากที่สุด เมื่อ $\omega = \omega_s$ เช่นเดียวกันกับตัวประกอบคุณภาพของขดลวดของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ ถ้าหากกำหนดให้ $Q_s(\omega)$ และ $Q_p(\omega)$ เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งแทนด้วย Q_s และ Q_p

เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) และค่าตัวประกอบคุณภาพของโหลด (Q_L) ได้ดังรูปที่ 2.30 และ 2.31



รูปที่ 2.30 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรภาครับซึ่งต่อแบบอนุกรมทำงานที่ ω_H และ ω_s กับตัวประกอบคุณภาพของโหลดอ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากงานวิจัย ตามตารางที่ 2.2

ที่มา: (Institute of Electrical and Electronic Engineers : IEEE) Analysis and Comparison of Secondary Series- and Parallel-compensated Inductive Power Transfer System Operating for Optimal Efficiency and Load-Independent Voltage-Transfer Ratio

2.12.2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรภาครับซึ่งต่อแบบขนาน (Efficiency Analysis of Secondary Parallel Compensation)

เมื่อพิจารณาวจรสมมูลของภาครับซึ่งต่อแบบอนุกรมจะสามารถพิสูจน์อิมพีแดนซ์ของวงจรได้ดังนี้

$$\Re(Z_{r-p}) = \frac{\omega^2 k^2 L_p L_s (R_s + R_L + \omega^2 C_s^2 R_L^2 R_s)}{(R_s + R_L - \omega^2 L_s C_s R_L)^2 + (\omega L_s + \omega C_s R_L R_s)^2} \quad (2.49)$$

$$\Re(Z_{s-p}) = R_s + \frac{R_L}{1 + \omega^2 C_s^2 R_L^2} \quad (2.50)$$

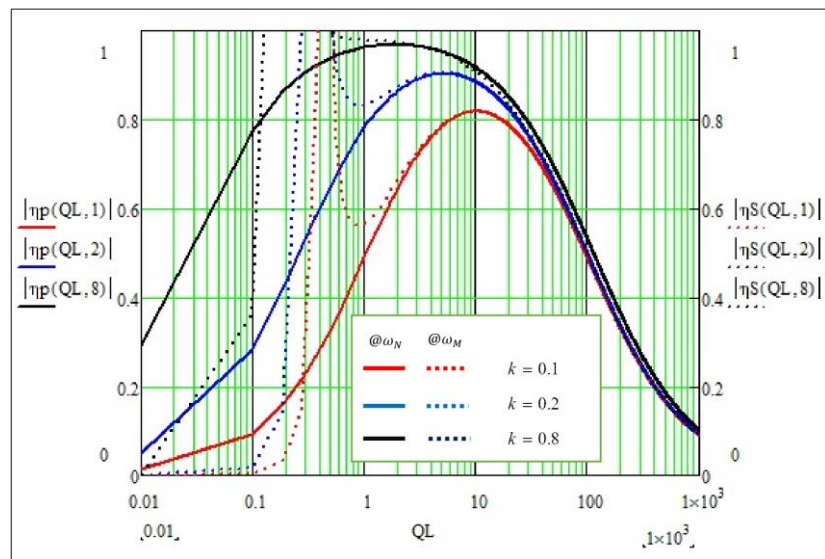
และสามารถหาประสิทธิภาพของวงจรซึ่งต่อแบบขนานได้ดังนี้

$$\eta(\omega) = \frac{1}{1 + c(\omega)} \frac{1}{1 + d(\omega)} \quad (2.51)$$

เมื่อ
$$c(\omega) = \frac{1}{Q_L Q_s} + \frac{\omega^2 Q_{L-p}}{\omega_s^2 Q_s}$$

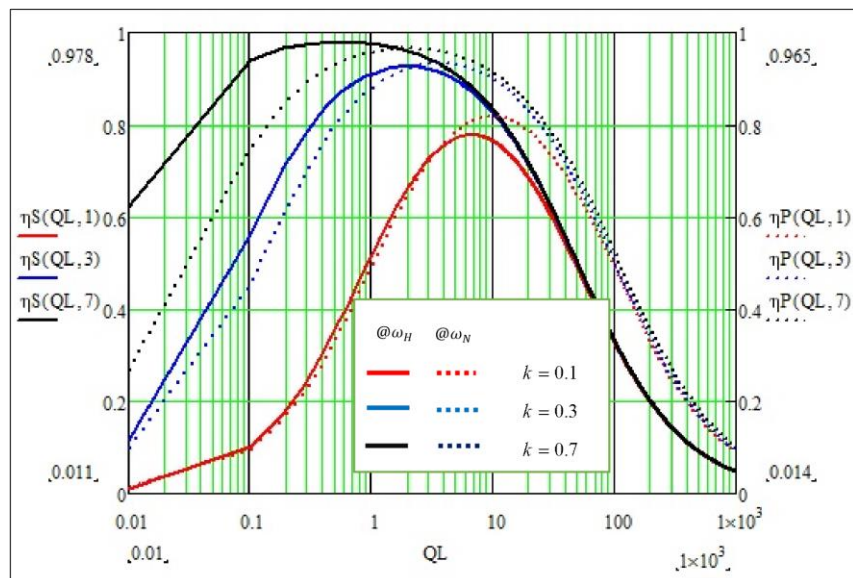
$$d(\omega) = \frac{\frac{1}{Q_p} \left[\left(\frac{1}{Q_s} + Q_L - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} Q_L \right)^2 + \left(1 + \frac{Q_L}{Q_s} \right)^2 \right]}{\frac{k^2 \omega^2}{\omega_p \omega_s} \left[\frac{1}{Q_s} + Q_L + \frac{\omega Q_L^2}{\omega Q_s} \right]}$$

$$Q_{L-p} = R_L \sqrt{\frac{C_s}{L_s}}$$



รูปที่ 2.31 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของการถ่ายโอนพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบคุณภาพของโหลด (Q_L) อ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากงานวิจัย ตามตารางที่ 2.2

ที่มา: (Institute of Electrical and Electronic Engineers : IEEE) Analysis and Comparison of Secondary Series- and Parallel-compensated Inductive Power Transfer System Operating for Optimal Efficiency and Load-Independent Voltage-Transfer Ratio



รูปที่ 2.32 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการถ่ายโอนพลังงานของวงจรอนุกรมและขนาน เมื่ออัตราขยายของระบบเป็นค่าคงที่ใช้ค่าอ้างอิงตามตารางที่ 2.2

ที่มา: (Institute of Electrical and Electronic Engineers : IEEE) Analysis and Comparison of Secondary Series- and Parallel-compensated Inductive Power Transfer System Operating for Optimal Efficiency and Load-Independent Voltage-Transfer Ratio

รูปที่ 2.32 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ด้านทุติยภูมิต่อแบบอนุกรมและขนาน โดยด้านทุติยภูมิที่ต่อแบบอนุกรมทำงานที่ความถี่ ω_H และด้านทุติยภูมิที่ต่อแบบขนานทำงานที่ความถี่ ω_N เพื่อทำให้เกิดอัตราส่วนเช่นเดียวกับอัตราส่วนของแรงดันที่ทำงานขณะไร้โหลด

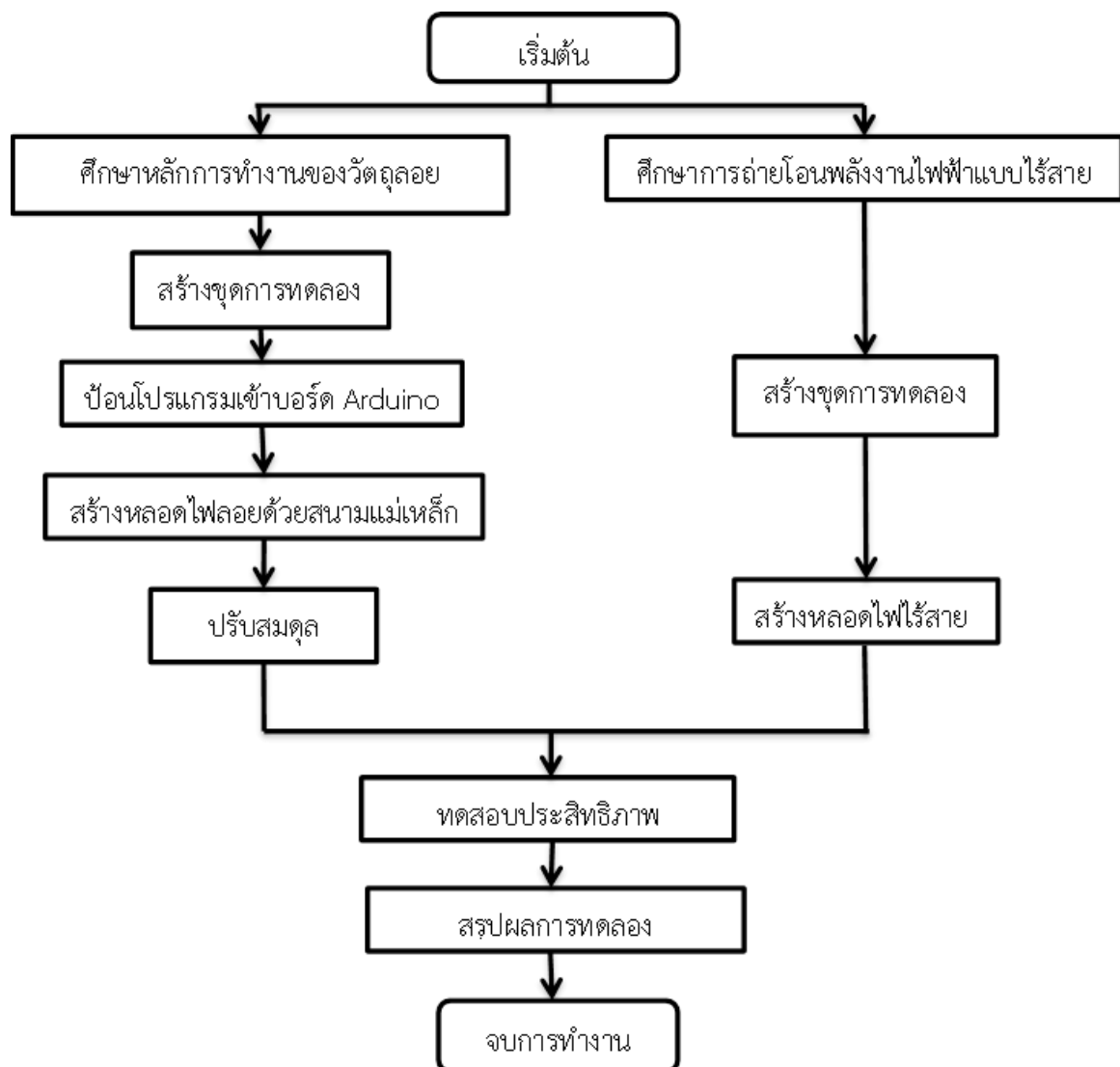
จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบ (Coupling Coefficient) ยิ่งมีค่ามากจะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพของการถ่ายโอนที่ดีขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

การออกแบบวงจรส่งพลังงานไร้สายบนหลอดไฟลอยได้นั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบที่ดี เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานที่ดีที่สุด และลอยอยู่บนอากาศที่สมดุลที่สุด เพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น จึงนำทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบมาใช้ในการออกแบบ

3.1 แผนการดำเนินงาน



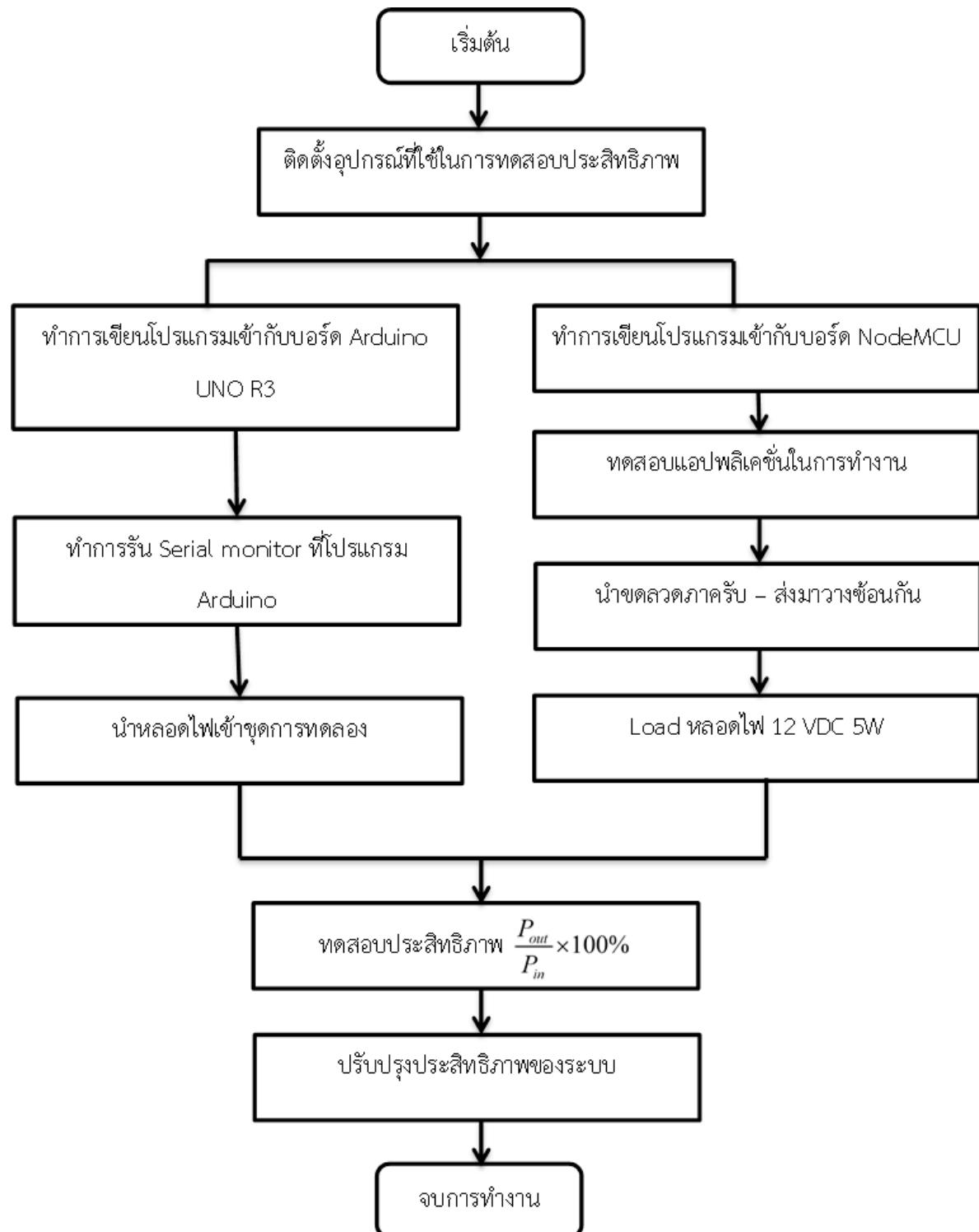
3.1.1 การทดสอบประสิทธิภาพของวงจร Magnetic Levitation Lamp



3.1.2 การทดสอบประสิทธิภาพของวงจร Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0



3.1.3 การทดสอบประสิทธิภาพของวงจร โดยรวม Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission NodeMCU Devkit 1.0



3.2 วงจรภาคส่ง

วงจรภาคส่งของระบบถ่ายโอนพลังงานเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง โดยใช้ไอซี PWM เป็นตัวกำเนิดความถี่ และใช้ PWM ในการขับเกต (Gate) ของมอสเฟต (MOSFET) และใช้วงจร H-bridge driver เป็นตัวขับขดลวดตัวส่งเพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านอากาศไปยังขดลวดตัวรับ ซึ่งในการออกแบบวงจรภาคส่งของระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายจะต้องมีการออกแบบที่ดี เพื่อให้ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายมีประสิทธิภาพสูงสุด

3.2.1 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM ความถี่สูงแบบปรับค่าได้

ในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM ความถี่สูงแบบปรับค่าได้จะใช้ไอซีเบอร์ SG3524 ซึ่งเป็นไอซี PWM กำเนิดสัญญาณ PWM ความถี่สูง โดยออกแบบให้สามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 10 - 60 kHz และสามารถปรับ Duty Cycle ได้ โดยความถี่ของไอซีเบอร์ SG3524 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$f = \frac{1.3}{R_T C_T} \quad (3.1)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ (Hz)

R_T คือ ค่าความต้านทานออกซิเลเตอร์

C_T คือ ค่าตัวเก็บประจุออกซิเลเตอร์

โดยค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุที่นำมาต่อกับวงจรกำเนิดความถี่ต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0.001 ถึง 0.1 μF ค่า R_T มีค่าอยู่ระหว่าง 1.8 - 100 $k\Omega$ และค่าความถี่ต่ำสุดและสูงสุด คือ 130 และ 722 kHz ตามลำดับ โดยเลือกใช้ค่า $C_T = 1 nF$ และตัวต้านทานปรับค่าได้ 100 $k\Omega$ ในการปรับค่า Duty Cycle จะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 10 $k\Omega$

3.2.2 ขดลวดภาคส่ง

3.2.2.1 การเลือกขนาดของขดลวดภาคส่ง

การเลือกขนาดของขดลวดภาคส่งและภาครับนั้นถือว่ามีความจำเป็นอย่างมากในการออกแบบระบบถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย โดยจะออกแบบภาคส่งให้ส่งพลังงานได้สูงสุด 120 วัตต์ ที่แรงดัน 220 โวลต์ ดังนั้นในการเลือกขดลวดภาคส่งต้องคิดจากค่ากระแสที่ขดลวดสามารถทนได้ โดยไม่ร้อนคือจะเลือกใช้ขดลวดที่ทนกระแสได้ 0.5454 แอมแปร์ นั่นคือ ขดลวดเบอร์ 24 ซึ่งมีพิสัยการทนกระแสได้เท่ากับ 0.817 แอมแปร์ และมีพื้นที่หน้าตัดขดลวดเท่ากับ 0.56 ตารางมิลลิเมตร

3.2.2.2 การหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแกนอากาศ

(1) การหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแกนอากาศแบบวงรอบ

การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดภาคส่งและภาครับสามารถคำนวณหาได้จากสูตรของวีลเลอร์ (Wheeler's formulas) ดังนี้

$$L = \frac{0.8 \cdot a^2 \cdot n^2}{6 \cdot a + 9 \cdot l + 10 \cdot c} \quad (3.2)$$

$$a = \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (3.3)$$

$$c = r_2 - r_1 \quad (3.4)$$

เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (ไมโครเฮนรี่)

r_1 คือ รัศมีภายในของขดลวด (นิ้ว)

r_2 คือ รัศมีภายนอกของขดลวด (นิ้ว)

l คือ ค่าความยาวของขดลวด (นิ้ว)

n คือ จำนวนรอบของขดลวด

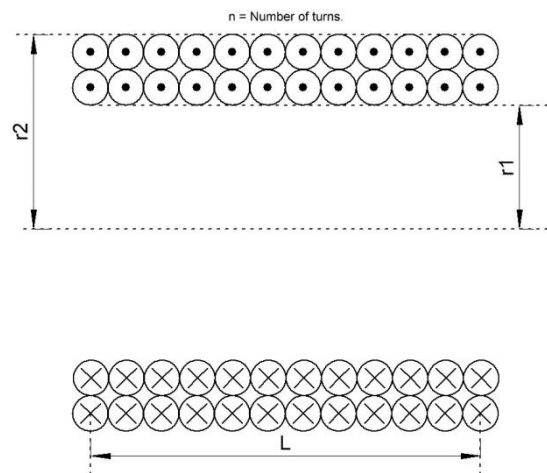
a คือ ค่าเฉลี่ยรัศมีของขดลวด (นิ้ว)

c คือ ค่าความต่างของรัศมีขดลวด

$$L = \frac{0.8 \times 1.89^2 \times 140^2}{(6 \times 1.89) + (9 \times 3.8) + (10 \times 0.22)}$$

$$L = 1.173 \text{ mH}$$

จากการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำขดลวดแกนอากาศแบบวงกลมของภาคส่งและภาครับในโครงการวิศวกรรมนี้ เลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำ 1.2 mH เพื่อให้สะดวกในการคำนวณและจัดหาอุปกรณ์



รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางของขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ

ที่มา: โครงการวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

3.2.3 ตัวเก็บประจุภาคส่ง

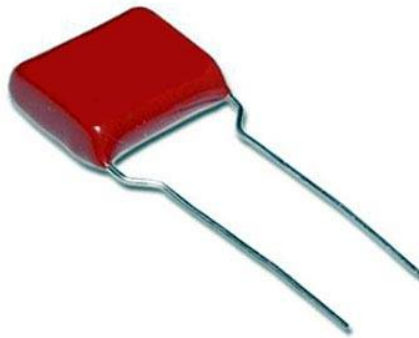
ในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุภาคส่งจะต้องทำการออกแบบให้ได้ค่าความจุ เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 30 kHz ซึ่งสามารถคำนวณค่าความจุได้ ดังนี้

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L^2} \quad (3.5)$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 (30 \times 10^3)^2 (1.2 \times 10^{-3})}$$

$$C = 23.45 \text{ nF}$$

จากสมการ (3.5) สามารถคำนวณขนาดตัวเก็บประจุ และทำการเลือกตัวเก็บประจุขนาด 22 nF เพื่อให้สะดวกในการจัดหาอุปกรณ์



รูปที่ 3.2 ตัวเก็บประจุภาคส่งขนาด 22 nF

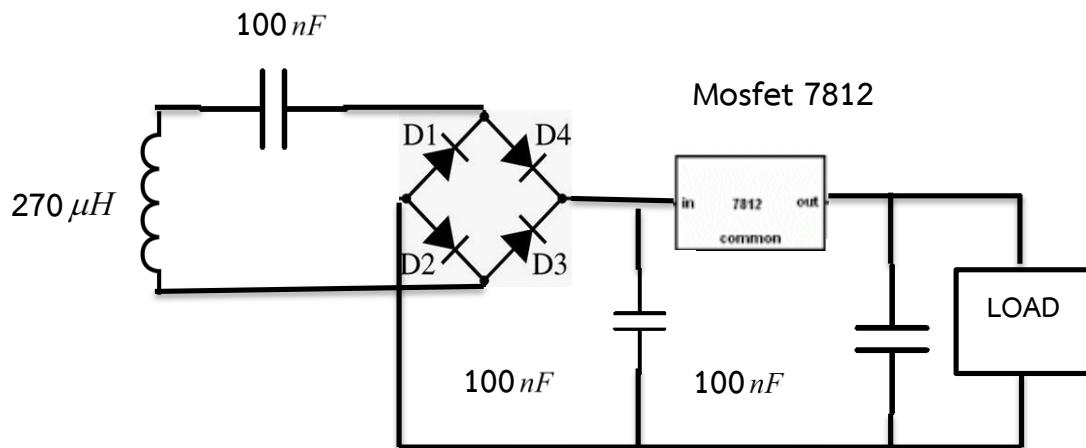
ที่มา: <https://www.westfloridacomponents.com/J339APF08/0.027uF+800V+Metallized+Polypropylene+Film+Capacitor+Panasonic+ECWH8273RJT.html>

3.3 วงจรภาครับ

การออกแบบวงจรภาครับของระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย จะต้องทำการออกแบบให้มีความสอดคล้องกับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรภาคส่ง แต่ต้องคำนึงถึงน้ำหนักจึงทำการต่อหม้อแปลงเพื่อ Step up แรงดัน เพื่อลดกระแสและขนาดของขดลวด ซึ่งต้องให้จำนวนขดลวดน้อยลง และเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ แต่ต้องคำนวณที่จุดเรโซแนนซ์เดียวกันเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากภาคส่งไปยังภาครับ โดยวงจรภาครับประกอบไปด้วยขดลวดภาครับ ตัวเก็บประจุ ซึ่งในการทดลอง ภาครับแบบอนุกรม

3.3.1 วงจรภาครับแบบอนุกรม

วงจรภาครับแบบอนุกรมประกอบด้วยขดลวดตัวรับต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ โดยใช้ขดลวดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ $270\ \mu\text{H}$ และตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุ $100\ \text{nF}$ จากนั้นต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแส และตัวเก็บประจุกรองแรงดัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้คงแรงดันที่ $12\ \text{VDC}$ จึงทำการต่อ IC 7812 และตัวกรองความถี่ให้ Load ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

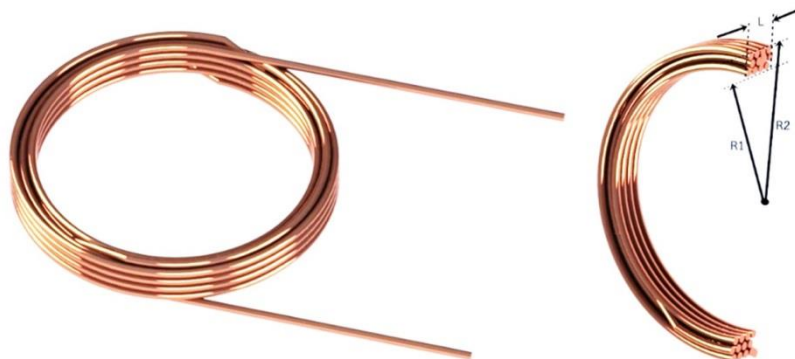


รูปที่ 3.3 วงจรภาครับแบบอนุกรม

3.3.1.1 การออกแบบขดลวดภาครับแบบอนุกรม

ในการออกแบบขดลวดภาครับแบบอนุกรมจะใช้ขดลวดทองแดงแทนอากาศ โดยพันขดลวดทองแดง แบบวงรอบ (Loop) ซึ่งสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำดังนี้

ขดลวดตัวรับแบบวงรอบ (Loop) สามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำได้จากสมการ (3.2)



รูปที่ 3.4 ขดลวดแกนอากาศแบบ Loop

ที่มา: โครงการงานวิศวกรรมการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

$$L = \frac{0.8 \times 1.62^2 \times 48^2}{(6 \times 1.62) + (9 \times 0.8) + (10 \times 0.16)}$$

$$L = 261.19 \mu H$$

จากการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำขดลวดแกนอากาศแบบวงกลมของภาคส่ง และภาครับในโครงการวิศวกรรมนี้ เลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำ $270 \mu H$ เพื่อให้สะดวกในการคำนวณ และจัดหาอุปกรณ์

3.3.1.2 การแบบตัวเก็บประจุภาครับแบบอนุกรม

ในการออกแบบตัวเก็บประจุภาครับที่ต่อแบบอนุกรม เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์สามารถคำนวณค่าตัวเก็บประจุที่จะนำมาต่อแบบอนุกรมได้จากสมการ (3.5)

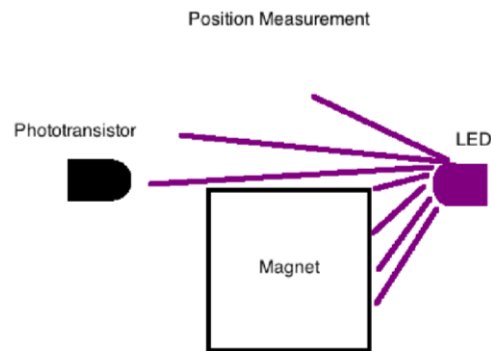
$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} \quad (3.6)$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 (30 \times 10^3)^2 \times (270 \times 10^{-6})} = 104.23 nF$$

ในการจัดทำโครงการวิศวกรรมนี้ เลือกใช้ความเหนี่ยวนำ $100 nF$ ที่ความถี่ $30 kHz$ สามารถคำนวณค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ดังนี้

3.4 การออกแบบเซ็นเซอร์แสงอินฟราเรด

เพื่อตรวจสอบตำแหน่งของแม่เหล็ก สำหรับโครงการนี้จะเลือกที่จะใช้เซ็นเซอร์แสงอินฟราเรด (Phototransistor) ร่วมกับ LED อินฟราเรด เซ็นเซอร์แสงอินฟราเรด (Phototransistor) นี้จะช่วยให้การป้อนข้อมูลแบบอะนาล็อกที่เราจะสามารถจัดรูปแบบดิจิทัลกับ ADC Arduino ของการตั้งค่าของ LED จะต้องตรงในแนวเดียวกันกับ Phototransistor นี้จะทำให้ค่าของ Phototransistor ที่แทนตำแหน่งของแม่เหล็กกลายเป็นข้อมูลในการคำนวณ



รูปที่ 3.5 การติดตั้งฮาร์ดแวร์สำหรับการวัดตำแหน่งของแม่เหล็กลอยได้

ที่มา: Achieving Stable Magnetic Levitation On The Arduino Platform Michael O. Morken and Brett R. Haffner Department of Physics, Wheaton College, Wheaton, IL 60187

จากรูปที่ 3.4 เมื่อแม่เหล็กยกขึ้นไปทีชดลวด มีผลในการบล็อกแสงมากขึ้นและเพิ่มเติมของแสงที่ไฟ LED จะส่งออกในทุกทิศทาง ดังนั้น Phototransistor จะรับสัญญาณได้น้อยเมื่อนำ LED มาต่อวัดพบว่า LED มีความสว่างน้อย ซึ่งการทดลองบางอย่างมันก็แสดงให้เห็นว่าความสว่างของ Phototransistor สอดคล้องกับตำแหน่งของแม่เหล็ก สิ่งหนึ่งที่จะต้องมีการดำเนินการเกี่ยวกับด้านซอฟต์แวร์ของการติดตั้งนี้คือการที่สัญญาณของ Phototransistor ที่จำเป็นจะต้องตรงกับ LED อินฟราเรดเซ็นเซอร์ เพื่อให้การวัด Phototransistor นี้ในการบันทึกแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น เมื่อแสงถูกบล็อก เพื่อให้แม่เหล็กเดินทางขึ้นไปทำให้สัญญาณเพิ่มขึ้น นี้จะมีความสัมพันธ์กับอำนาจมากขึ้นในชดลวด ดังนั้นก่อนที่ค่าดิจิทัลของอนาล็อกถูกส่งผ่านไปยังขั้นตอนวิธีการควบคุม จะต้องผ่าน CODE :

```
int raw = 1023 - analogRead(sensorPin);
```

นี่เป็นสิ่งที่น่าสนใจเพราะเซ็นเซอร์จะอ่าน 1023 เมื่อถูกบล็อกอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น $1023 - 1023 = 0$ ซึ่งเป็นสัญญาณขนาดเล็กมากเมื่อไฟทั้งหมดถูกบล็อกและสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ (1023) เมื่อแสงเซ็นเซอร์เข้าทั้งหมด จึงช่วยให้ตำแหน่งที่จะถูกบันทึกไว้โดย Arduino อย่างถูกต้อง และสามารถใช้ในอัลกอริทึมการควบคุมที่จะทำการคำนวณเพื่อป้องกันการลอยตัวของแม่เหล็กอย่างมั่นคง

```
int readAmbient()
{
  digitalWrite(irPin, LOW);
  // allow time for LED and phototransistor to settle
```

```

delayMicroseconds(100);
int ambient = 1024 - analogRead(sensorPin);
digitalWrite(irPin, HIGH);
return ambient;
}

```

3.5 การออกแบบ PID Control Algorithm ใช้ในการควบคุมสนามแม่เหล็ก

ระบบควบคุมที่เราใช้เพื่อปรับกระแสไฟฟ้าให้กับแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นตัวควบคุม PID (Proportional Integral Derivative) ระบบควบคุม PID ใช้ไปยังจุดที่ตั้งไว้ ซึ่งเป็นสถานะที่ต้องการของระบบแล้วคำนวณข้อผิดพลาดโดยการเปรียบเทียบระบบสถานะปัจจุบันเทียบกับค่าที่ตั้งไว้เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสมเพื่อที่จะย้ายระบบไปยังจุดตั้งค่า อัลกอริทึมที่ใช้สำหรับตัวควบคุม PID คือ

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.7)$$

เมื่อ $u(t)$ = สัญญาณ output ที่ถูกควบคุม
 $e(t)$ = ค่าผิดพลาดที่เป็นฟังก์ชันเทอมเวลา
 K_p, K_i, K_d = ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสัดส่วนค่าคงที่อินทิกรัล และส่วนประกอบอนุพันธ์ของตัวควบคุม

สำหรับโครงงานวิศวกรรมนี้จะกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ใน Arduino $K_p = 2, K_d = 20, K_i = 60$ ในกรณีค่าที่ต้องการคือตำแหน่งที่เราต้องการให้เป็นแม่เหล็ก levitating ไปยังคั้งหนึ่งอยู่ ค่าที่ตั้งไว้ถูก โดยการอ่านเซ็นเซอร์บน Arduino เพื่อกำหนดตำแหน่งที่ต้องการ ค่านี้ได้รับการทดลองอ่านข้อมูลบน Arduino ผ่านจอแสดงผลแบบอนุกรม รหัสเฉพาะที่จะใช้นี้คือตำแหน่ง `int = analogRead(sensorPin)`; ระยะเวลาข้อผิดพลาดถูกกำหนดโดยการลบตำแหน่งออกจากข้อผิดพลาด:

```
int error = position - setPoint;
```

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ในการทดลองประสิทธิภาพของระบบเมื่อทำการต่อหลอดไฟ โดยขณะที่หลอดไฟลอยอยู่บนอากาศ ด้วยพลังสนามแม่เหล็กที่ส่งจากขดลวดภาคส่งไปยังแม่เหล็กถาวรภาครับ ซึ่งในการทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพของหลอดไฟ ขณะลอยอยู่บนอากาศนั้นจะตรวจสอบการตรวจจับตำแหน่งของวัตถุ เพื่อไปประมวลกับซอฟต์แวร์ในบอร์ด Arduino :ซึ่งจะส่งข้อมูลไปยังขดลวดภาคส่งให้สร้างสนามแม่เหล็ก

4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

4.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง Magnetic Levitation Lamp

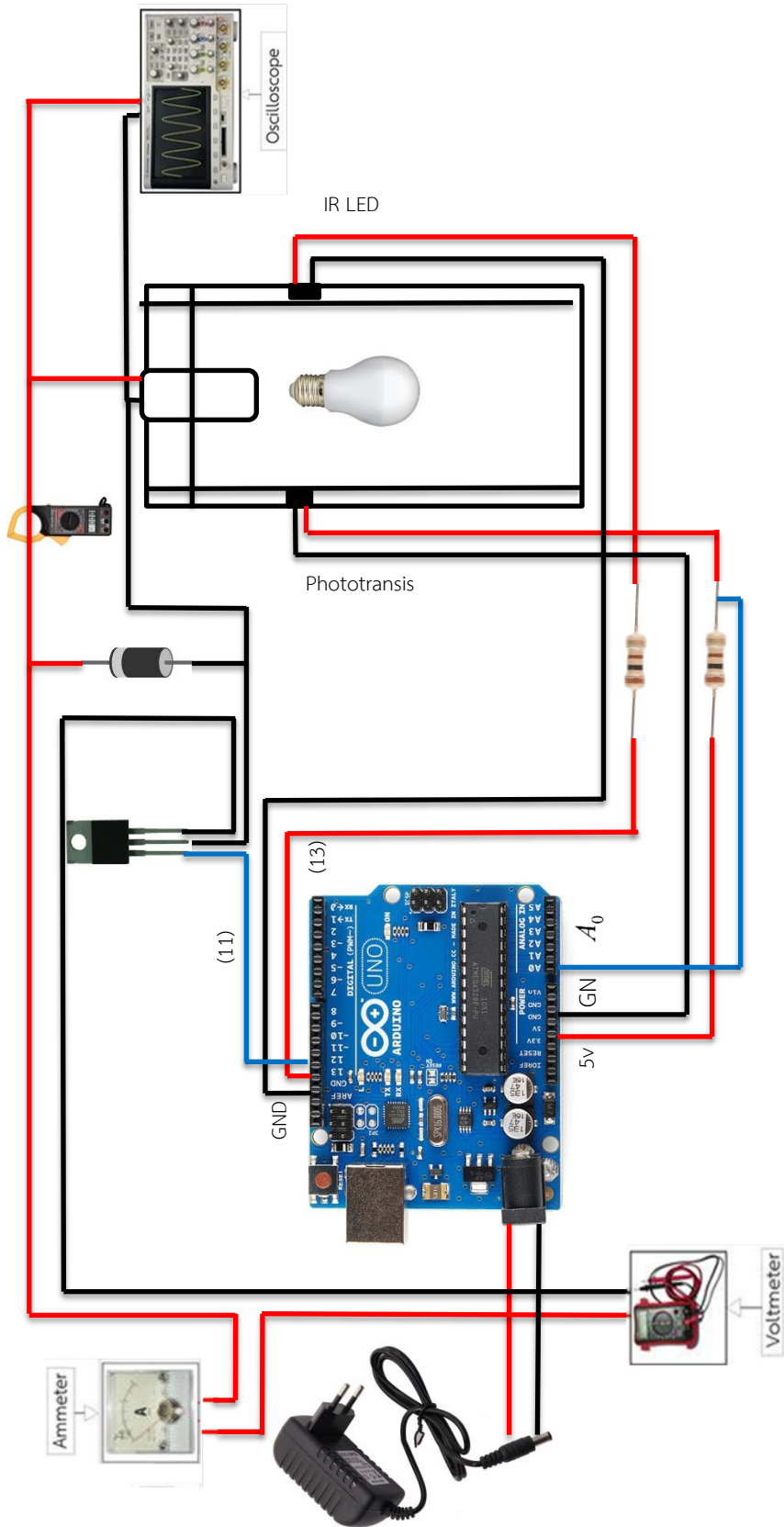
- คอมพิวเตอร์, Ammeter, Voltmeter, Oscilloscope
- ชุดขดลวดภาคส่ง
- Magnet 100 g 2 ก้อน
- DC Power Supply ขนาด 12 โวลต์ 2 แอมป์
- หลอดไฟ ขนาด 12 โวลต์ 5 วัตต์
- ชุดวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ (บอร์ด Arduino UNO R3)
- เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งตัวรับ-ส่ง
- มอเตอร์ FQP 33N15
- Diode 1N4004 , Resistor 100 Ω และ 3 $k\Omega$

4.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง Wireless transmission

- DC Power Supply ขนาด 12 โวลต์ 10 แอมป์
- Ammeter, Voltmeter, Oscilloscope
- High Frequency inverter
- หม้อแปลง 12 – 0 – 12 เป็น 220 V
- ขดลวดภาคส่ง ขนาด 1.2 มิลลิเมตร และ ขดลวดภาครับ ขนาด 270 ไมโครเมตร
- ตัวเก็บประจุภาคส่ง ขนาด 22 นาโนฟารัด และ ตัวเก็บประจุภาครับ 100 นาโนฟารัด
- ชุดเรียงกระแสความถี่สูง (High Frequency Rectifier)
- หลอดไฟ ขนาด 12 โวลต์ 5 วัตต์

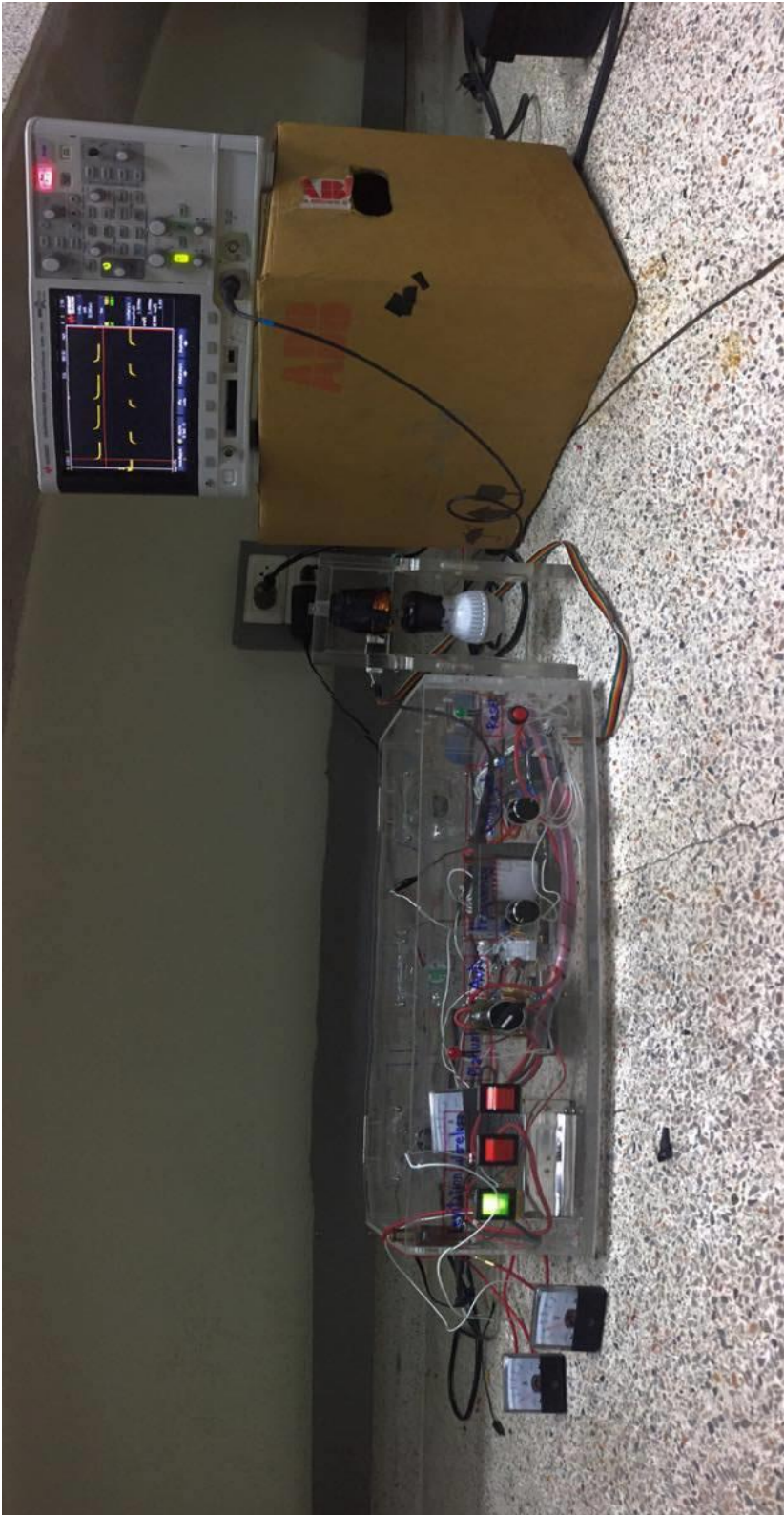
4.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง Wireless transmission และ NodeMCU

- DC Power Supply ขนาด 12 โวลต์ 10 แอมป์
- Ammeter, Voltmeter, Oscilloscope
- High Frequency inverter
- หม้อแปลง 12 – 0 – 12 เป็น 220 V
- ขดลวดภาคส่ง ขนาด 1.2 มิลลิเฮนรี และ ขดลวดภาครับ ขนาด 270 ไมโครเฮนรี
- ตัวเก็บประจุภาคส่ง ขนาด 22 นาโนฟารัด และ ตัวเก็บประจุภาครับ 100 นาโนฟารัด
- ชุดเรียงกระแสความถี่สูง (High Frequency Rectifier)
- หลอดไฟ ขนาด 12 โวลต์ 5 วัตต์
- Relay 2 Channel 10A 30VDC
- NodeMCU Devkit 1.0

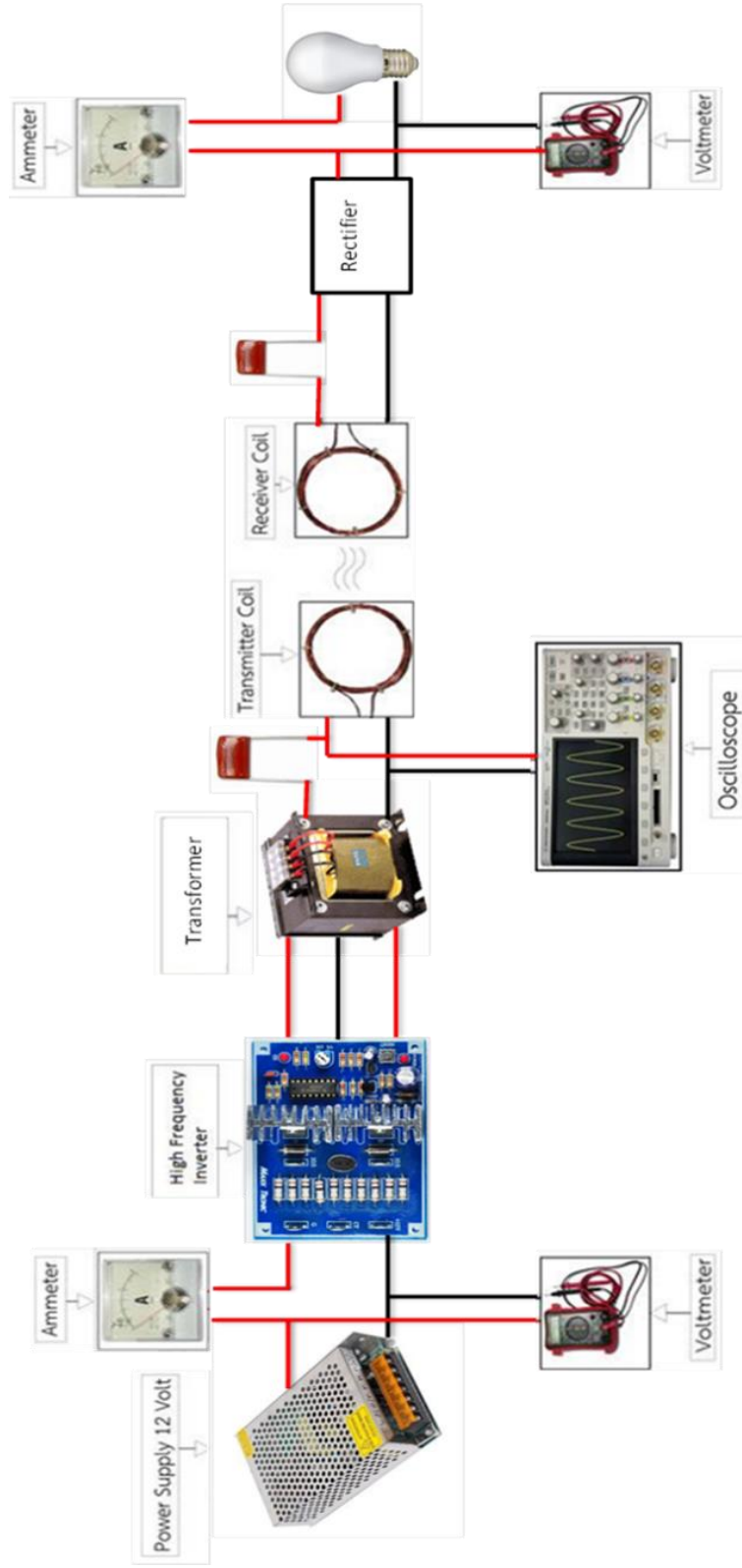


รูปที่ 4.1 แผนภาพในการต่ออุปกรณ์และเครื่องมือนี้อุปกรณ์ทดลอง

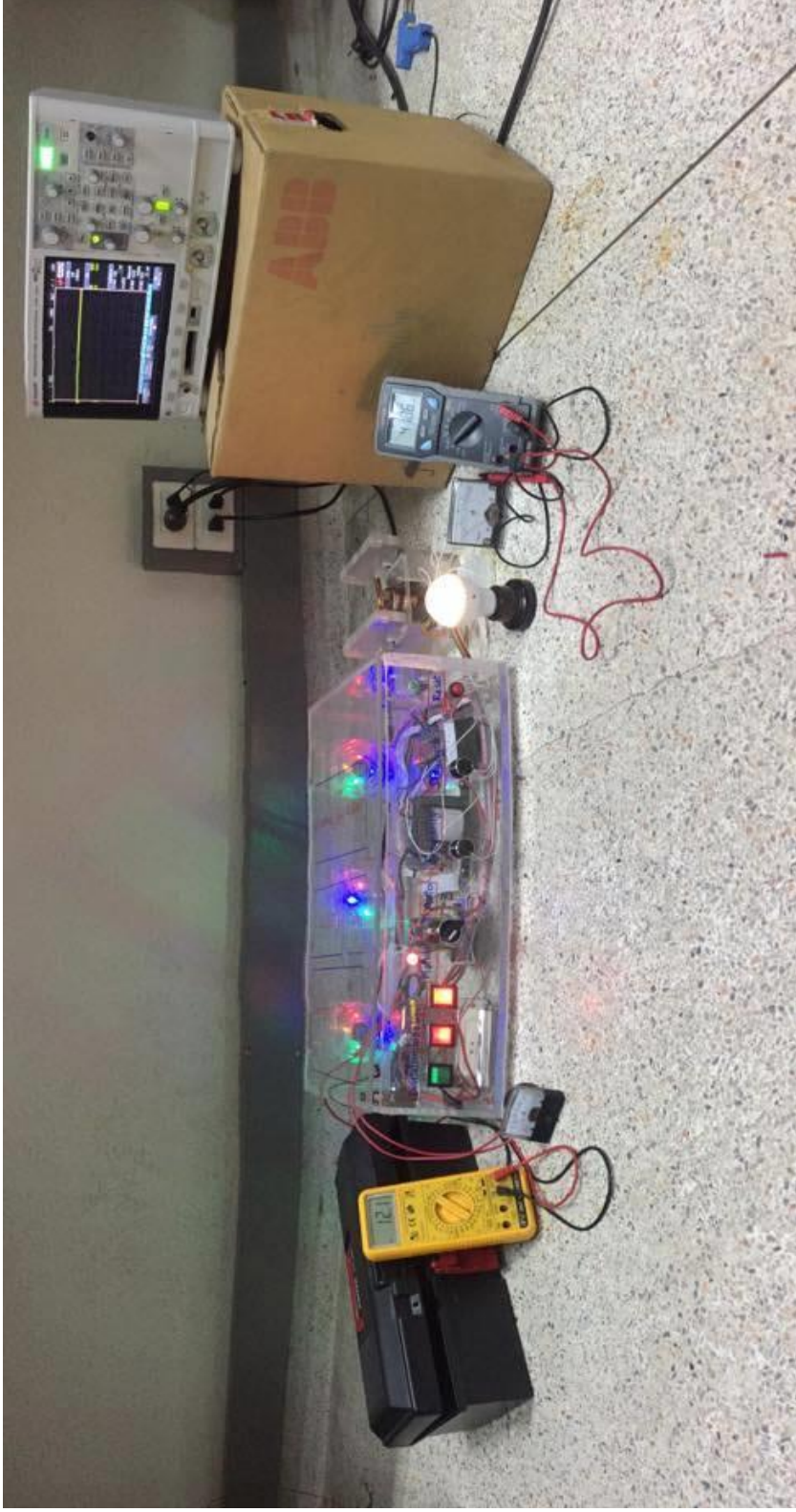
Magnetic Levitation Lamp



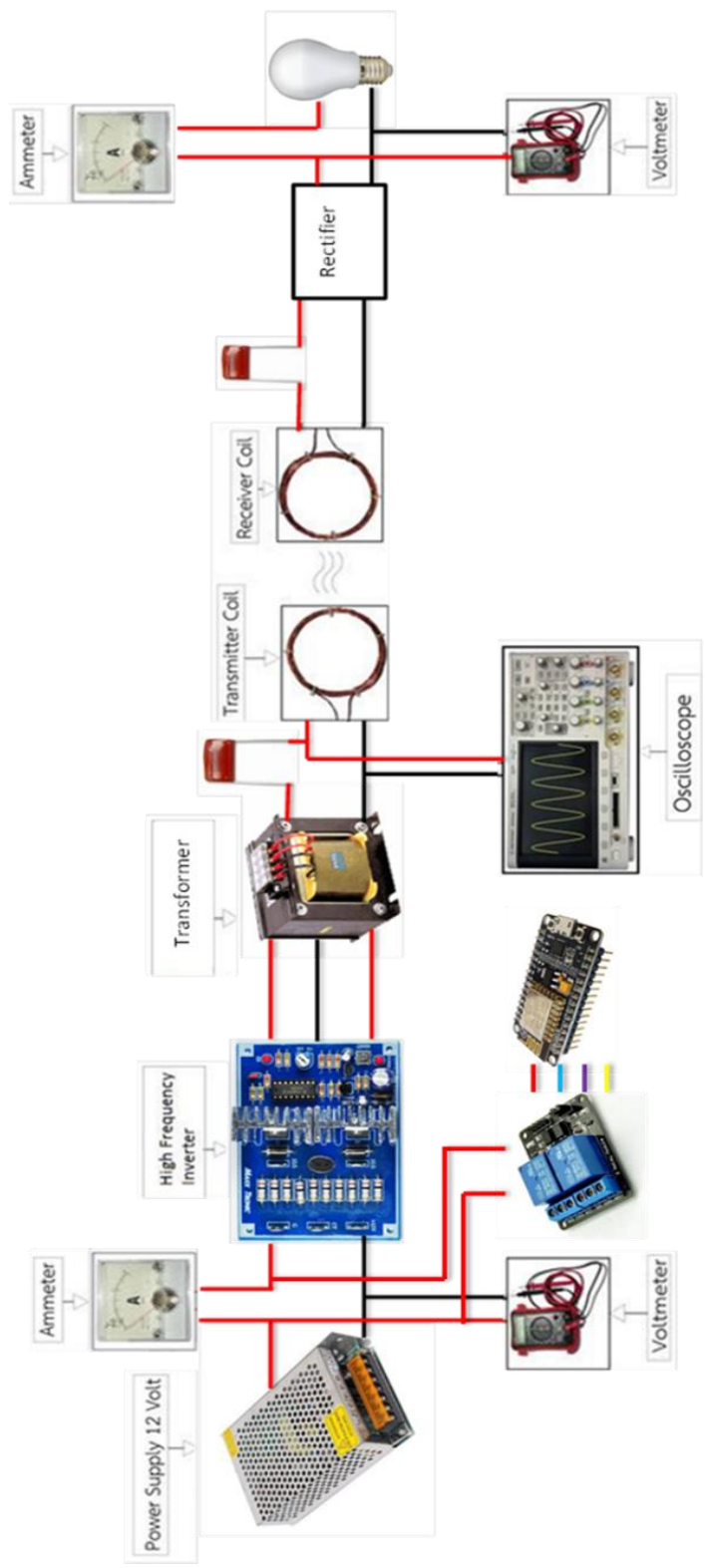
รูปที่ 4.2 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.3 แผนภาพในการต่ออุปกรณ์และเครื่องมีื่อในการทดลองWireless transmission



รูปที่ 4.4 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.5 แผนภาพในการต่ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

Wireless transmission และการต่อ NodeMCU Devkit 1.0



รูปที่ 4.6 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตามรูปที่ 4.5

4.2 วิธีทำการทดลอง

4.2.1 วิธีทำการทดลอง Magnetic Levitation Lamp

- ต่ออุปกรณ์ตามรูปที่ 4.1 และ 4.2
- ทำการเขียนโปรแกรมจากคอมพิวเตอร์เข้าบอร์ด Arduino UNO R3
- ต่อ DC Power Supply เข้าบอร์ด Arduino
- ทำการรัน Serial monitor โดยพิมพ์ “m” เข้าโปรแกรม Arduino
- นำหลอดไฟเข้าสู่การทดลอง
- ทำการทดลองวงจรที่ได้จากการออกแบบ
- จดบันทึกค่าจาก Serial monitor ,Voltmeter,AmpmeterและOscilloscope
- ปรับปรุงประสิทธิภาพ ของระบบ
- นำนวัตกรรมที่ได้สร้างมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันให้เกิดประโยชน์สูงสุด

4.2.2 วิธีทำการทดลอง Wireless Transmission and NodeMCU Devkit 1.0

- ต่ออุปกรณ์ตามรูปที่ 4.3 - 4.6
- ทำการเขียนโปรแกรม เข้ากับ NodeMCU Devkit 1.0
- นำขดลวดมาวางซ้อนกันที่ระยะเดียวกับตำแหน่งวัตถุลอย
- ต่อ DC Power Supply 12V เข้ากับ ชุดเรียงกระแสความถี่สูง
- ทำการปรับความถี่ และ Duty cycle
- จดบันทึกค่าจาก Voltmeter,Ampmeter และ Oscilloscope
- ปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ
- ทำการเขียนโปรแกรม เข้ากับ NodeMCU Devkit 1.0

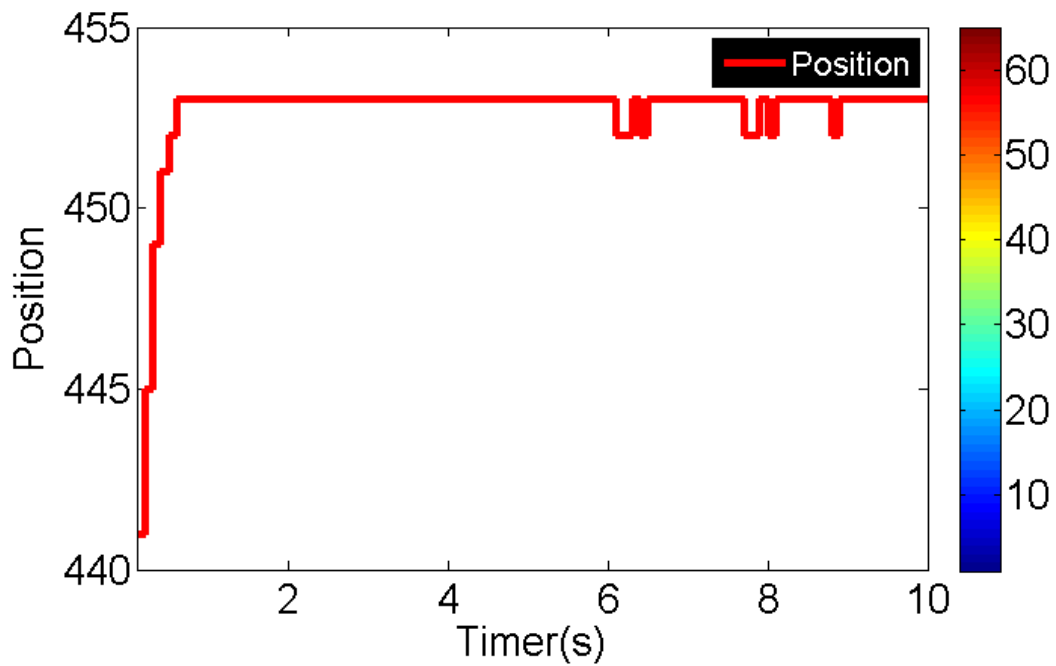
4.3 สรุปผลการทดลอง

4.3.1 สรุปผลการทดลองจากรูป 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งที่เซนเซอร์ตรวจจับ (Position) ที่แสดงใน Serial monitor เมื่อเวลา (Time)

เปลี่ยนแปลงที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจากจุดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet

t(s)	Position	t(s)	Position	t(s)	Position	t(s)	Position	t(s)	Position
0.1	441	2.1	453	4.1	453	6.1	452	8.1	453
0.2	445	2.2	453	4.2	453	6.2	452	8.2	453
0.3	449	2.3	453	4.3	453	6.3	453	8.3	453
0.4	451	2.4	453	4.4	453	6.4	452	8.4	453
0.5	452	2.5	453	4.5	453	6.5	453	8.5	453
0.6	453	2.6	453	4.6	453	6.6	453	8.6	453
0.7	453	2.7	453	4.7	453	6.7	453	8.7	453
0.8	453	2.8	453	4.8	453	6.8	453	8.8	452
0.9	453	2.9	453	4.9	453	6.9	453	8.9	453
1.0	453	3.0	453	5.0	453	7.0	453	9.0	453
1.1	453	3.1	453	5.1	453	7.1	453	9.1	453
1.2	453	3.2	453	5.2	453	7.2	453	9.2	453
1.3	453	3.3	453	5.3	453	7.3	453	9.3	453
1.4	453	3.4	453	5.4	453	7.4	453	9.4	453
1.5	453	3.5	453	5.5	453	7.5	453	9.5	453
1.6	453	3.6	453	5.6	453	7.6	453	9.6	453
1.7	453	3.7	453	5.7	453	7.7	452	9.7	453
1.8	453	3.8	453	5.8	453	7.8	452	9.8	453
1.9	453	3.9	453	5.9	453	7.9	453	9.9	453
2.0	453	4.0	453	6.0	453	8.0	452	10.0	453

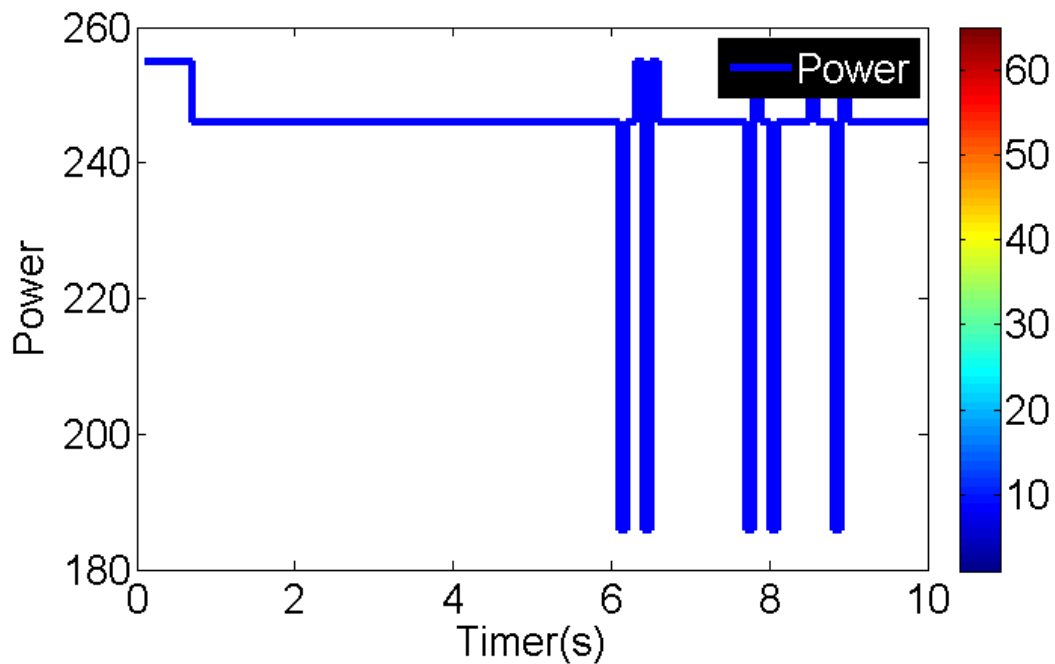


รูปที่ 4.7 กราฟตำแหน่งที่เซนเซอร์ตรวจจับ (Position) เทียบกับเวลา (Time) ที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับmagnet

จากกราฟรูปที่ 4.7 เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปตำแหน่งของหลอดไฟยังคงคงที่ แต่ก็มีส่วนน้อยที่ตำแหน่งของหลอดไฟต่างออกไป โดยสังเกตจากกราฟพบว่า เมื่อหลอดไฟกำลังจะตก ค่า Position จะเท่ากับ 452 ซึ่งค่าที่ได้จะนำไปคำนวณเพื่อหาค่าสนามแม่เหล็กที่จะทำให้หลอดไฟกลับมาที่สภาพสมดุลอีกครั้ง

ตารางที่ 4.2 ค่า DC Power Supply ที่แสดงใน Serial monitor เมื่อเวลา (Time) เปลี่ยนแปลงที่
ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet

t(s)	Power	t(s)	Power	t(s)	Power	t(s)	Power	t(s)	Power
0.1	255	2.1	246	4.1	246	6.1	186	8.1	246
0.2	255	2.2	246	4.2	246	6.2	246	8.2	246
0.3	255	2.3	246	4.3	246	6.3	255	8.3	246
0.4	255	2.4	246	4.4	246	6.4	186	8.4	246
0.5	255	2.5	246	4.5	246	6.5	255	8.5	255
0.6	255	2.6	246	4.6	246	6.6	246	8.6	246
0.7	246	2.7	246	4.7	246	6.7	246	8.7	246
0.8	246	2.8	246	4.8	246	6.8	246	8.8	186
0.9	246	2.9	246	4.9	246	6.9	246	8.9	255
1.0	246	3.0	246	5.0	246	7.0	246	9.0	246
1.1	246	3.1	246	5.1	246	7.1	246	9.1	246
1.2	246	3.2	246	5.2	246	7.2	246	9.2	246
1.3	246	3.3	246	5.3	246	7.3	246	9.3	246
1.4	246	3.4	246	5.4	246	7.4	246	9.4	246
1.5	246	3.5	246	5.5	246	7.5	246	9.5	246
1.6	246	3.6	246	5.6	246	7.6	246	9.6	246
1.7	246	3.7	246	5.7	246	7.7	186	9.7	246
1.8	246	3.8	246	5.8	246	7.8	255	9.8	246
1.9	246	3.9	246	5.9	246	7.9	246	9.9	246
2.0	246	4.0	246	6.0	246	8.0	186	10.0	246

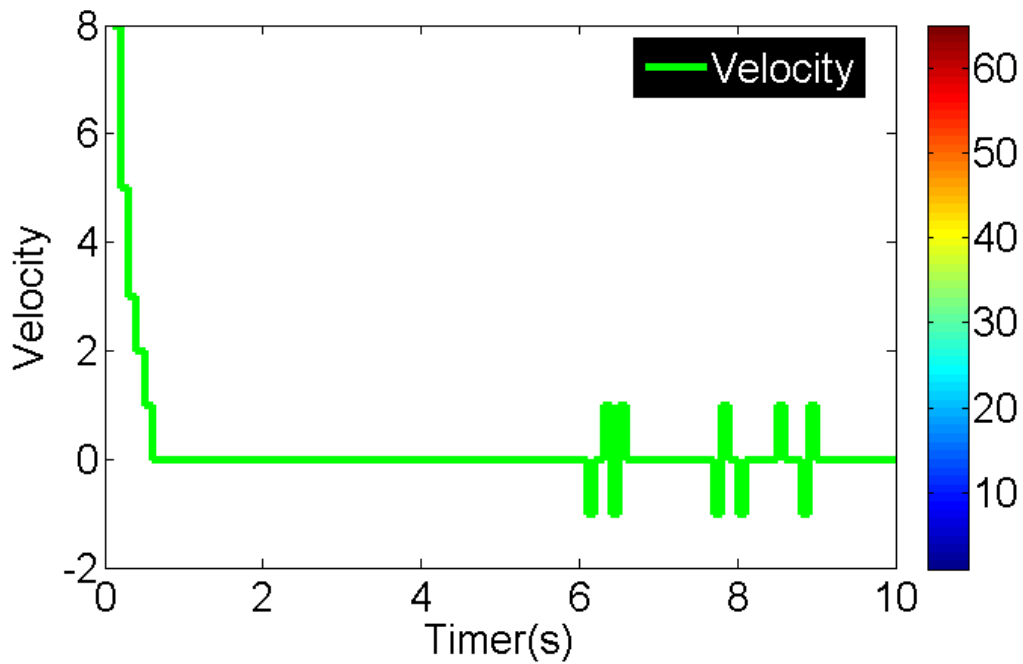


รูปที่ 4.8 กราฟ DC Power Supply ที่แสดงใน Serial monitor เมื่อเวลา (Time) เปลี่ยนแปลงที่ ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับmagnet

จากกราฟรูปที่ 4.8 เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปพบว่าค่า Power Supply ที่จ่ายมีค่าคงที่ แต่เมื่อหลอดไฟกำลังจะตกหรือจะลอยขึ้นมากกว่าจุดสมดุล จะสังเกตได้จากตารางที่ 4.2 ค่า DC Power Supply จะมีค่าลง หรือคงค่าไว้ เช่น เมื่อหลอดไฟลอยสูงกว่าจุดสมดุลค่าแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดจะถูกลดลง โดยนำค่าพิกัดแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับขดลวด 12 โวลต์ 2 แอมป์ มาคำนวณได้ $\frac{186}{255} * 12 = 8.75$ โวลต์ มีผลทำให้ค่าสนามแม่เหล็กลดลงเนื่องจากค่าสนามแม่เหล็ก B แปรผันตรงกับค่ากระแส และแรงดันที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำ

ตารางที่ 4.3 ค่า Velocity ที่แสดงใน Serial monitor เมื่อเวลา (Time) เปลี่ยนแปลงที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet

t(s)	Velocity	t(s)	Velocity	t(s)	Velocity	t(s)	Velocity	t(s)	Velocity
0.1	8	2.1	0	4.1	0	6.1	-1	8.1	0
0.2	5	2.2	0	4.2	0	6.2	0	8.2	0
0.3	3	2.3	0	4.3	0	6.3	1	8.3	0
0.4	2	2.4	0	4.4	0	6.4	-1	8.4	0
0.5	1	2.5	0	4.5	0	6.5	1	8.5	1
0.6	1	2.6	0	4.6	0	6.6	0	8.6	0
0.7	0	2.7	0	4.7	0	6.7	0	8.7	0
0.8	0	2.8	0	4.8	0	6.8	0	8.8	-1
0.9	0	2.9	0	4.9	0	6.9	0	8.9	1
1.0	0	3.0	0	5.0	0	7.0	0	9.0	0
1.1	0	3.1	0	5.1	0	7.1	0	9.1	0
1.2	0	3.2	0	5.2	0	7.2	0	9.2	0
1.3	0	3.3	0	5.3	0	7.3	0	9.3	0
1.4	0	3.4	0	5.4	0	7.4	0	9.4	0
1.5	0	3.5	0	5.5	0	7.5	0	9.5	0
1.6	0	3.6	0	5.6	0	7.6	0	9.6	0
1.7	0	3.7	0	5.7	0	7.7	-1	9.7	0
1.8	0	3.8	0	5.8	0	7.8	1	9.8	0
1.9	0	3.9	0	5.9	0	7.9	0	9.9	0
2.0	0	4.0	0	6.0	0	8.0	-1	10.0	0



รูปที่ 4.9 กราฟ Velocity ที่แสดงใน Serial monitor เมื่อเวลา (Time) เปลี่ยนแปลงที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับmagnet

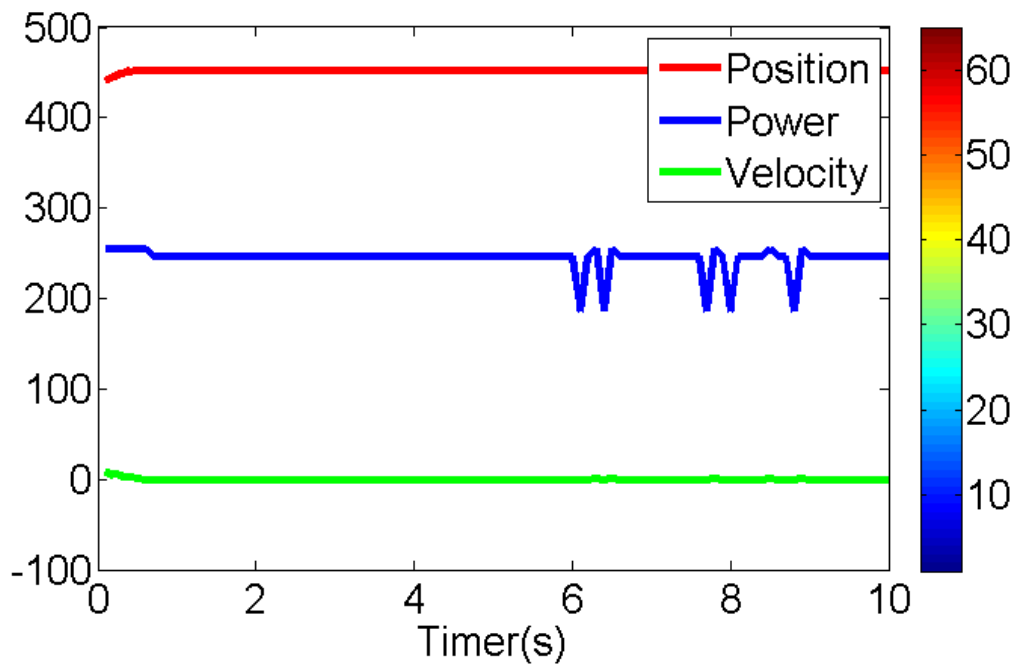
จากกราฟรูปที่ 4.9 เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป พบว่า ก่อนนำหลอดไฟเข้าสู่ระบบความเร็วที่จับได้มีค่าสูงมากๆ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป 0.7 วินาที หลอดไฟเข้าสู่จุดสมดุลความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงจะแสดงอยู่ในรูป 1 และ -1 ตามลำดับ แต่เมื่อผ่านไปเป็นเวลา 7.7 วินาที พบว่า มีค่าเท่ากับ -1 เนื่องจากหลอดไฟกำลังจะตก และที่เวลา 7.8 วินาที จะเห็นว่า velocity มีค่าเท่ากับ 1 แล้วก็กลับเข้าสู่สมดุลอีกครั้งที่เวลา 7.9 วินาที

ตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จาก Serial monitor เมื่อเวลา (time) เปลี่ยนแปลงไปที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจาก
ขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet

t(s)	Power	Velocity	Position	t(s)	Power	Velocity	Position
0.1	255	8	441	2.6	246	0	453
0.2	255	5	445	2.7	246	0	453
0.3	255	3	449	2.8	246	0	453
0.4	255	2	451	2.9	246	0	453
0.5	255	1	452	3.0	246	0	453
0.6	255	1	453	3.1	246	0	453
0.7	246	0	453	3.2	246	0	453
0.8	246	0	453	3.3	246	0	453
0.9	246	0	453	3.4	246	0	453
1.0	246	0	453	3.5	246	0	453
1.1	246	0	453	3.6	246	0	453
1.2	246	0	453	3.7	246	0	453
1.3	246	0	453	3.8	246	0	453
1.4	246	0	453	3.9	246	0	453
1.5	246	0	453	4.0	246	0	453
1.6	246	0	453	4.1	246	0	453
1.7	246	0	453	4.2	246	0	453
1.8	246	0	453	4.3	246	0	453
1.9	246	0	453	4.4	246	0	453
2.0	246	0	453	4.5	246	0	453
2.1	246	0	453	4.6	246	0	453
2.2	246	0	453	4.7	246	0	453
2.3	246	0	453	4.8	246	0	453
2.4	246	0	453	4.9	246	0	453
2.5	246	0	453	5.0	246	0	453

ตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จาก Serial monitor เมื่อเวลา (time) เปลี่ยนแปลงไปที่ระยะห่าง 2 cm
เทียบจากขดลวดภาคส่งถึงตัวรับ Magnet (ต่อ)

t(s)	Power	Velocity	Position	t(s)	Power	Velocity	Position
5.1	246	0	453	7.6	246	0	453
5.2	246	0	453	7.7	186	-1	452
5.3	246	0	453	7.8	255	1	452
5.4	246	0	453	7.9	246	0	453
5.5	246	0	453	8.0	186	-1	452
5.6	246	0	453	8.1	246	0	453
5.7	246	0	453	8.2	246	0	453
5.8	246	0	453	8.3	246	0	453
5.9	246	0	453	8.4	246	0	453
6.0	246	0	453	8.5	255	1	453
6.1	186	-1	452	8.6	246	0	453
6.2	246	0	452	8.7	246	0	453
6.3	255	1	453	8.8	186	-1	452
6.4	186	-1	452	8.9	255	1	453
6.5	255	1	453	9.0	246	0	453
6.6	246	0	453	9.1	246	0	453
6.7	246	0	453	9.2	246	0	453
6.8	246	0	453	9.3	246	0	453
6.9	246	0	453	9.4	246	0	453
7.0	246	0	453	9.5	246	0	453
7.1	246	0	453	9.6	246	0	453
7.2	246	0	453	9.7	246	0	453
7.3	246	0	453	9.8	246	0	453
7.4	246	0	453	9.9	246	0	453
7.5	246	0	453	10.0	246	0	453



รูปที่ 4.10 ค่าที่ได้จาก Serial monitor เมื่อเวลา (time) เปลี่ยนแปลงไปที่ระยะห่าง 2 cm เทียบจาก
ขดลวดภาคส่งถึงตัวรับMagnet

จากรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อตำแหน่ง (Position) เปลี่ยนแปลงจากจุดสมมูลค่า Velocity ก็จะมี
เปลี่ยนไป 1 หรือ -1 อยู่กับว่าหลอดไฟกำลังตกหรือกำลังลอยสูงกว่าจุดสมมูล เพื่อเป็นจากชดเชยค่า
Power ก็จะมีแปรผันตามตำแหน่ง และค่า velocity เนื่องจากค่า Power ที่แสดงใน Serial monitor
จะแสดงค่าที่สูงสุด 255 เหมือนเปรียบเทียบกับค่าแรงดัน และกระแสที่จ่ายให้กับวงจร 12 โวลต์ 2 แอมป์
จะคำนวณได้ $\frac{255}{255} \times 2 = 12$ โวลต์ ดังนั้นจากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อหลอดไฟกำลังจะลอยสูงกว่า
จุดสมมูล ค่า Power ก็จะมีชดเชยให้ค่ากระแสและแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดลดลง เพื่อให้ค่า
สนามแม่เหล็กน้อยลง

4.3.2 สรุปผลการทดลองจากรูป 4.3 – 4.6

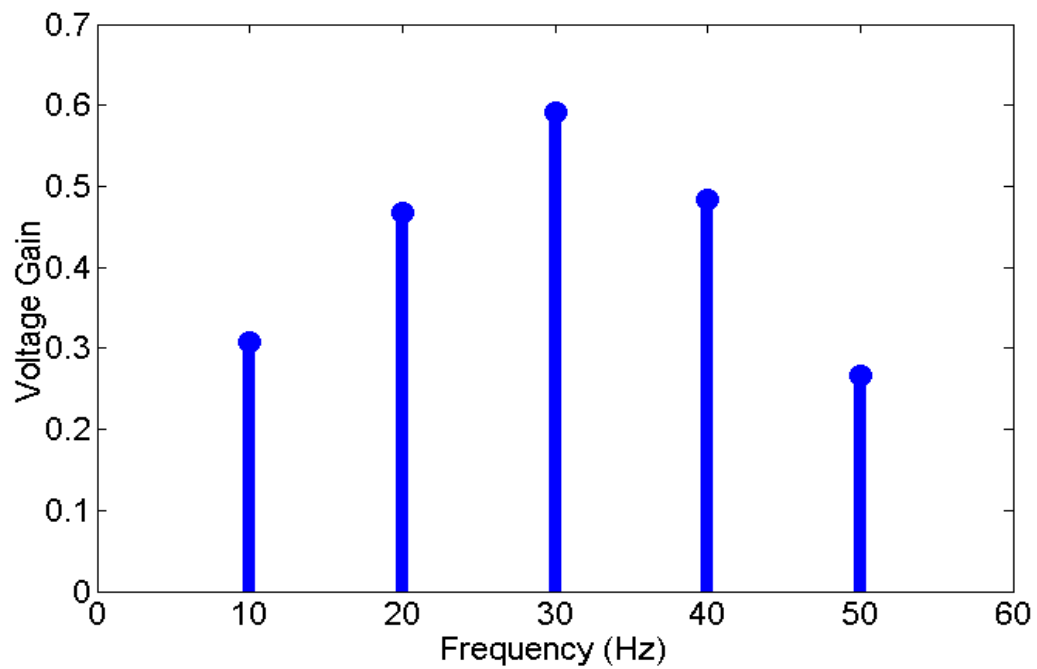
ตารางที่ 4.5 อัตราขยายและประสิทธิภาพของระบบ Magnetic Levitation Lamp ขณะที่หลอดไฟลอยอยู่บนอากาศ

f (kHz)	V_{in}	V_{out}	G_V	I_{in}	I_{out}	G_I	P_{in}	P_{out}	η
293.1	12.0	11.8	0.9833	1.0	0.5	0.5	12	5.9	49.1667

จากตาราง 4.5 ประสิทธิภาพของระบบ Magnetic Levitation Lamp ค่อนข้างมีเสถียรภาพในการวัดประสิทธิภาพในบางส่วนเป็นเพียงการยกตัวอย่างที่กระแส ณ จุดๆหนึ่งเนื่องจากกระแส I_{out} จะเปลี่ยนแปลงตลอดขึ้นอยู่กับตำแหน่งของวัตถุที่ลอย ดังนั้นการวัดจึงเป็นไปได้ยาก

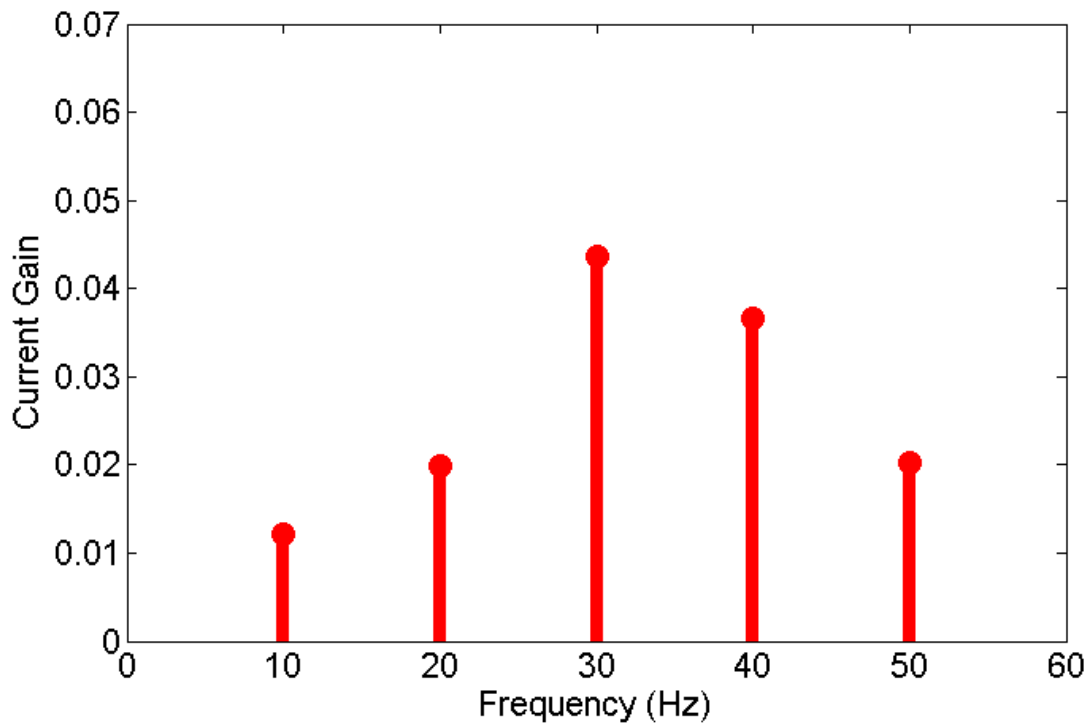
ตารางที่ 4.6 อัตราขยายและประสิทธิภาพของระบบ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง

f (kHz)	V_{in}	V_{out}	G_V	I_{in}	I_{out}	G_I	P_{in}	P_{out}	η
10	12	3.7	0.3083	4.13	0.05	0.0121	49.6	0.185	0.3729
20	12	5.6	0.4667	5.01	0.10	0.0199	60.1	0.56	0.9318
30	12	7.1	0.5917	9.18	0.40	0.04356	110.2	2.84	2.5771
40	12	5.8	0.4833	8.18	0.30	0.0367	98.2	1.74	1.7719
50	12	3.2	0.2667	4.93	0.10	0.0203	59.2	0.32	0.5405



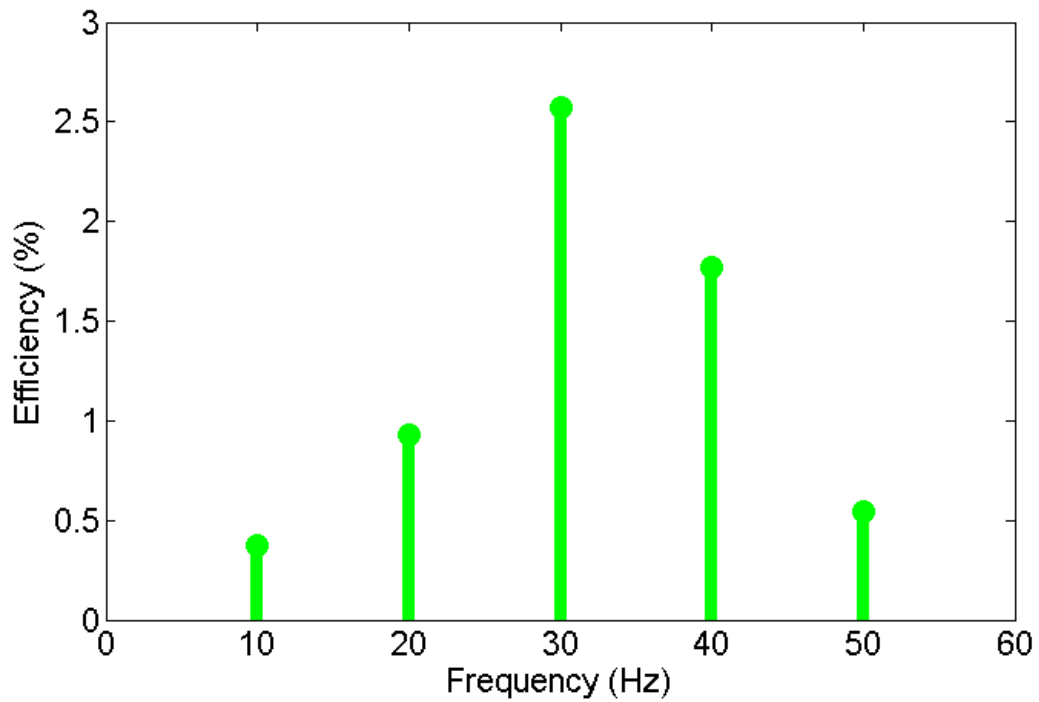
รูปที่ 4.11 อัตราขยายแรงดันของวงจร Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ขณะหลอดไฟลอยอยู่บนอากาศ โดยเปลี่ยนแปลงค่าความถี่

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าอัตราขยายแรงดันที่จุดเรโซแนนซ์จะมีอัตราการขยายสูง เมื่อเทียบกับจุดอื่นๆจะมีอัตราการขยายแรงดันต่ำลง เนื่องจากผลของค่าอิมพีแดนซ์ มีค่าสูงขึ้น เป็นผลมาจากค่า Inductor และ Capacitor ซึ่งในทางปฏิบัติ พบว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย จึงทำการออกแบบวงจร Inverter ที่สามารถปรับความถี่และ Duty cycle ได้



รูปที่ 4.12 อัตราขยายกระแสของวงจร Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ขณะหลอดไฟลอยอยู่บนอากาศ โดยเปลี่ยนแปลงค่าความถี่

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าอัตราขยายกระแสที่จุดเรโซแนนซ์จะมีอัตราการขยายสูง เมื่อเทียบกับจุดอื่นๆจะมีอัตราการขยายกระแสต่ำลง ในการเปลี่ยนแปลงความถี่อัตราการขยายของกระแสจะขึ้นอยู่กับโหนดที่ต่อว่ากินกระแสเท่าไร ดังนั้นผลของค่ากำลังที่โหนดจะมีผลต่อกระแสยิ่งโหนดมีวัตต์สูงก็จะกินกระแสสูงขึ้น ในทางกลับกันยิ่งวัตต์ต่ำกระแสก็จะต่ำลงเช่นกัน

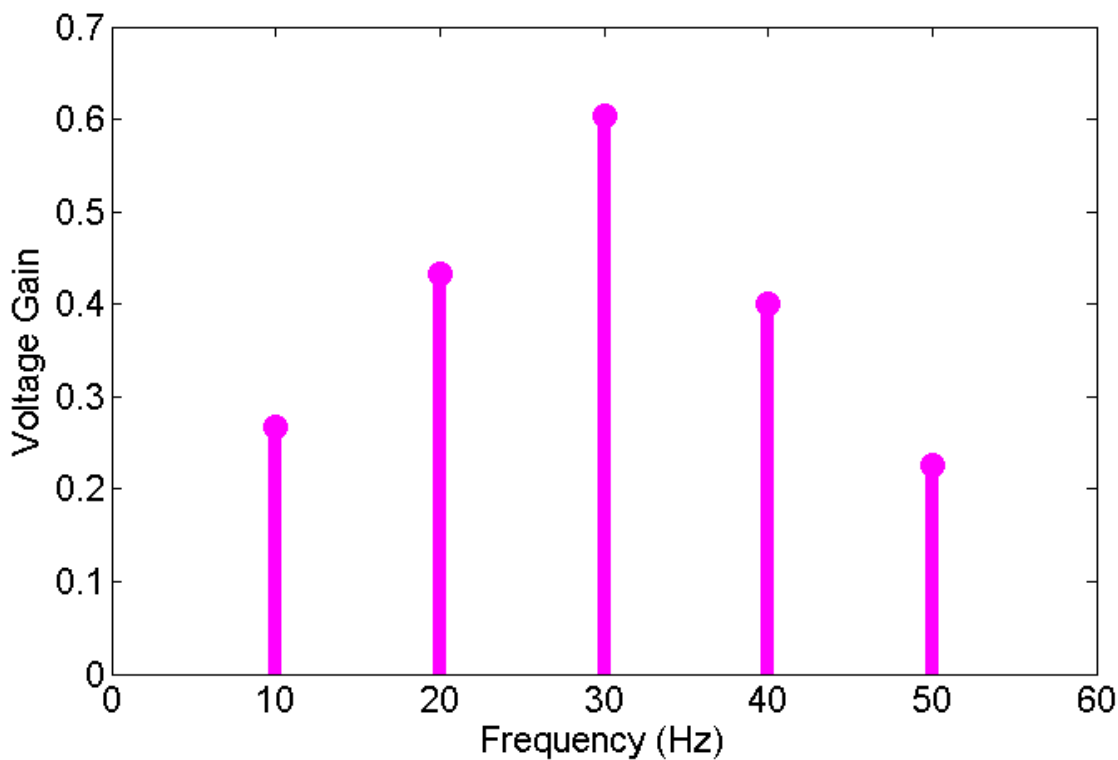


รูปที่ 4.13 กราฟประสิทธิภาพของวงจร Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ขณะหลอดไฟลอยอยู่บนอากาศ โดยเปลี่ยนแปลงค่าความถี่

จากรูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพของระบบ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ขณะหลอดไฟลอยอยู่บนอากาศ เมื่อปรับค่าความถี่ต่างๆ จะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ความถี่ต่างกัน ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิรตซ์ มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 2.5771 เปอร์เซ็นต์

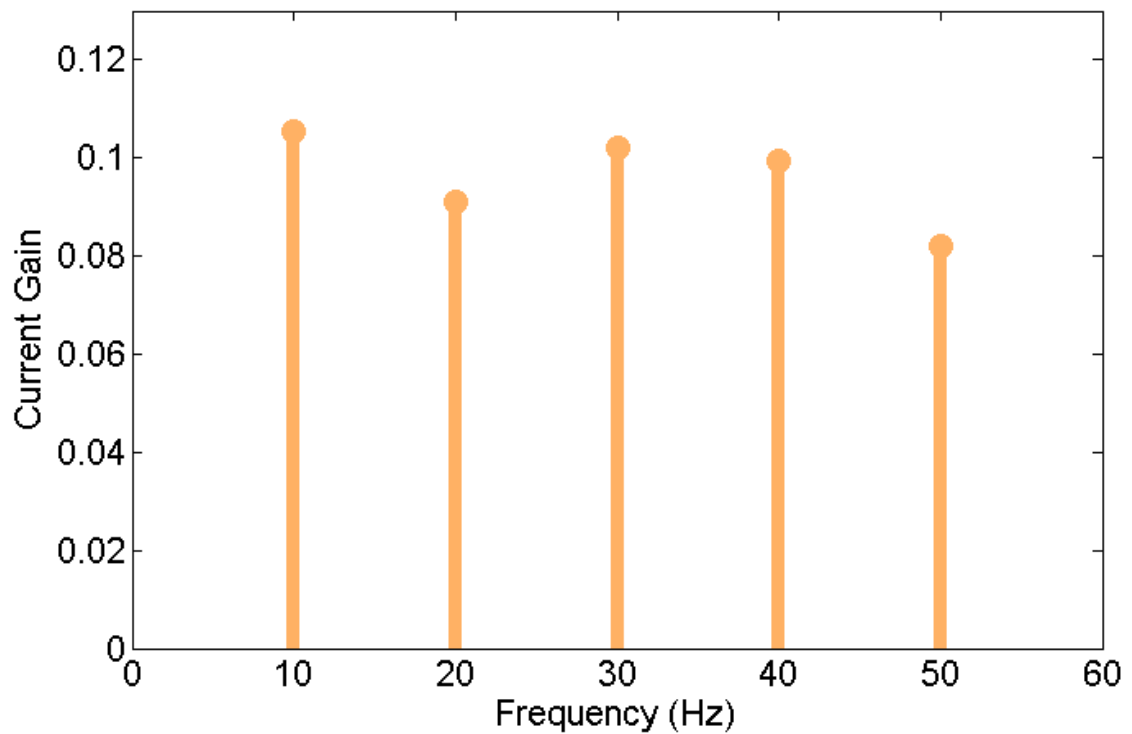
ตารางที่ 4.7 อัตราขยายและประสิทธิภาพของระบบโดยรวม ขณะเปิดวงจร Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง

$f(kHz)$	V_{in}	V_{out}	G_V	I_{in}	I_{out}	G_I	P_{in}	P_{out}	η
10	12	3.2	0.2667	5.32	0.56	0.1053	63.84	1.792	2.8070
20	12	5.2	0.4333	6.93	0.63	0.0909	83.16	3.276	3.9394
30	12	7.24	0.6033	9.80	1.00	0.1020	117.60	7.240	6.1565
40	12	4.8	0.4000	8.75	0.87	0.0994	105.00	4.176	3.9771
50	12	2.7	0.2250	6.78	0.56	0.0826	81.36	1.512	1.8584



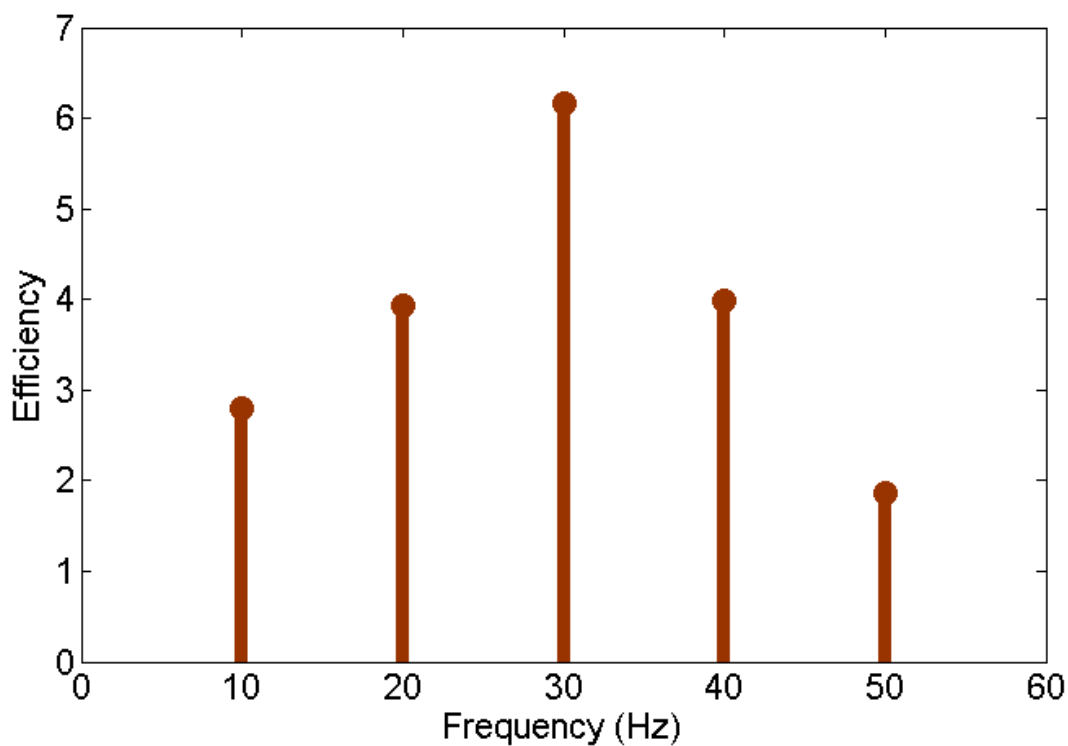
รูปที่ 4.14 อัตราขยายแรงดัน ขณะเปิดวงจร Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.14 อัตราขยายแรงดัน ขณะเปิดวงจร Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง พบว่า ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิรตซ์ มีอัตราขยายแรงดันที่สูงกว่าที่ความถี่อื่นๆ ซึ่งในทางปฏิบัติ พบว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจึงทำการออกแบบวงจร Inverter ที่สามารถปรับความถี่และ Duty cycle ได้



รูปที่ 4.15 อัตราขยายกระแส ขณะเปิดวงจร Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.15 อัตราขยายกระแส ขณะเปิดวงจร Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง พบว่า อัตราการขยายกระแส ค่อนข้างเสถียร หรือที่ความถี่ใดๆก็ตามอัตราการขยายกระแสมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพของระบบโดยรวม ขณะเปิดวงจร Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพของระบบโดยรวม ขณะเปิดวงจร Magnetic Levitation Lamp และ Wireless transmission and NodeMCU Devkit 1.0 ที่ความถี่เปลี่ยนแปลง พบว่า ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ประสิทธิภาพของระบบมีค่าเท่ากับ 6.1565 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเปรียบเทียบกับความถี่อื่นๆจะมีค่าประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของระบบจะทดสอบ 2 ส่วน คือ 1.เสถียรภาพในการลอยของโคมไฟบนสนามแม่เหล็ก โดยความเร็วในการสวิทชิงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการส่งสัญญาณของอินฟราเรดต้องมีความเร็วที่เพียงพอต่อการประมวลผลให้วัตถุหยุดนิ่ง 2.การถ่ายโอนพลังงานไร้สายในวงจรถอดรับและภาคส่งที่ระยะห่างน้อยๆจะมีประสิทธิภาพดีกว่าระยะห่างมากๆ ดังนั้นระยะห่างของขดลวดมีผลต่อประสิทธิภาพ นอกจากนี้จำนวนขดลวดภาคส่งและภาครับก็มีผลต่อประสิทธิภาพการส่งพลังงานไร้สาย

โดยจากการทดลองทั้งหมดเมื่อทดสอบประสิทธิภาพของวงจร Magnetic Levitation Lamp พบว่า เมื่อจ่ายแรงดัน 12 โวลต์ ให้กับขดลวดและบอร์ด Arduino โดยบอร์ดจะทำหน้าที่ประมวลผลจากการรับค่าตำแหน่งของอินฟราเรด เพื่อควบคุม Gate drive ให้กับมอสเฟตในการควบคุมกระแส และแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวด โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าสนามแม่เหล็กคือจำนวนรอบในการพันขดลวด และค่ากระแสที่จ่ายให้ขดลวด ดังนั้นขดลวดจะต้องทนกระแสสูงสุดที่จ่ายให้กับขดลวดได้ ซึ่งในการออกแบบขดลวดจะต้องไม่ให้ขดลวดร้อนเกินไปจึงออกแบบให้ขดลวดมีขนาดใหญ่ขึ้น

โดยจากการทดลองทั้งหมดเมื่อทดสอบประสิทธิภาพของวงจร Wireless transmission พบว่า เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้าขนาดเท่ากับ 12 โวลต์ และนำไปแปลงกระแสด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูง และ Step Up Transformer ที่แรงดัน 220 โวลต์และส่งผ่านอากาศไปยังภาครับ คือหลอดไฟไร้สาย โดยวงจรถอดรับของหลอดไฟไร้สายเป็นการต่อวงจรถอดรับแบบอนุกรม เพราะมีความต้านทานโหลด คือ หลอดไฟ ซึ่งมีค่าความต้านทานน้อยเหมาะกับแบบอนุกรมมากกว่าการต่อวงจรถอดรับแบบขนาน และกระแสต่ำๆจึงเหมาะที่ใช้ขดลวดเล็กๆ เนื่องจากสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอ สำหรับการออกแบบขนาดของขดลวดภาครับและภาคส่ง จะเลือกจากพิกัดของกระแสขาเข้าและขาออก ซึ่งจากการทดลอง พบว่า กระแสขาเข้ามีค่าค่อนข้างสูงกว่ากระแสขาออก ดังนั้นในการออกแบบจึงใช้ขนาดของขดลวดภาคส่งที่ใหญ่กว่าขดลวดภาครับเพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดร้อน และไหม้ ซึ่งอุณหภูมิโดยรวมมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเป็นสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการทดลองวัดสูญเสียความเสถียรภาพของการลอยมีค่าน้อย เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับวัตถุมีระยะที่น้อย รวมถึงผลของการสวิตซ์ซึ่งที่ตัวมอสเฟตโดยออกแบบวงจรขับเคลื่อนได้รฟจากบอร์ด Arduino ดังนั้นเมื่อทำการทดลองพบว่า ความเร็วในการประมวลเมื่อนำตำแหน่งของวัตถุมาประมวลแล้วสั่งให้วงจรขับเคลื่อนทำงานไปจ่ายให้กับมอสเฟต แล้วกระแสของขดลวดก็เปลี่ยนแปลงไปทำให้ค่าสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง

5.2.2 ในการทดลองเกิดความร้อน เนื่องจากผลของกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) ซึ่งมีผลต่อสัญญาณรบกวนในระบบได้ ดังนั้นจึงเพิ่มขนาดของขดลวดภาคส่งให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งขดลวดต้องทนกระแสได้ไม่ต่ำกว่ากระแสที่จากให้กับโหลด

5.2.3 ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายที่ออกแบบยังมีประสิทธิภาพน้อยเกินไป เนื่องจากสัญญาณขับเคลื่อนมีสัญญาณรบกวน จึงใช้ไอซีขับเคลื่อนเกตของมอสเฟตแทนหม้อแปลงขับเคลื่อนเพื่อลดสัญญาณรบกวน

5.2.4 ควรออกแบบวงจรขับเคลื่อน โดยใช้ไอซีในการขับเคลื่อนเกตของมอสเฟตแทนการใช้หม้อแปลงขับเคลื่อน (Gate Drive Transformer) เพื่อลดสัญญาณและลดการสูญเสียพลังงานของระบบ และเพื่อลดผลของ Skin Effect ควรใช้ขดลวดภาคส่งเป็นแบบ Litz Wire

5.2.5 ในการทดลองปัญหาที่พบในการส่งถ่ายพลังงานไร้สายแสงจากหลอดไฟกระพริบ เนื่องจากความเสถียรภาพของการลอยมีการสั่นเกิดขึ้น ทำให้ชุดการถ่ายโอนมีประสิทธิภาพไม่คงที่เป็นผลให้แสงไฟกระพริบ

เอกสารอ้างอิง

- วีระเชษฐ ชันเงิน; วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. (2547). อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics กรุงเทพฯ
กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
(Power Electronics)
- Duka AV, editor. Modelling of an electromagnetic levitation system using a neural network. 2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR); 2010 28-30 May 2010.
- Ishaque K, Saleem Y, Abdullah SS, Amjad M, Rashid M, Kazi S, editors. Modeling and control of magnetic levitation system via fuzzy logic controller. 2011 Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization; 2011 19-21 April 2011.
- Reusch MF. A problem related to Earnshaw's Theorem. IEEE Transactions on Magnetics. 1994;30(3):1324-6.
- เอกชัย ชัยดี ดุสิต มหิทธิ และ อนนท นาฏอนิ / วารสารวิชาการปทุมวัน ปีที่ 6 ฉบับที่ 6 16 พฤษภาคม สิงหาคม 2559
- M. F. Reusch, A problem related to Earnshaw's theorem, IEEE Transactions on Magnetics, 30, 3, pp. 1324–1326, May 1994.
- M. C. Marion-Pera, J. P. Yonnet, Axial bearings using superconductors and permanent magnets, IEEE Transaction on Magnetics, 31, 3, pp. 2112-2114, 1995.
- M.D. Simon, L.O. Heflinger and S.L. Ridgway, Spin stabilized magnetic levitation, American Journal of Physics, 65, p. 286-292, 1997.
- E. Cazacu, Stable magnetic levitation in stationary field using diamagnetic materials – Rev. Roum. Sci. Techn. – Electrotechn. et Energy., 47, 3, pp. 271-277, Bucharest, 2002.
- Lilienkamp KA, editor. Low-cost magnetic levitation project kits for teaching feedback system design. Proceedings of the 2004 American Control Conference; 2004 June 30 2004-July 2 2004.
- M.D. Simon , 15 Dangerously Mad Projects for the Evil Genius, p. 178-194,2011

- Youssef MZ, Jain PK. Series–Parallel Resonant Converter in Self-Sustained Oscillation Mode With the High-Frequency Transformer-Leakage-Inductance Effect: Analysis, Modeling, and Design. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007;54(3):1329-41.
- Zhang W, Wong SC, Tse CK, Chen Q, editors. Compensation technique for optimized efficiency and voltage controllability of IPT systems. 2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems; 2012 20-23 May 2012.
- Zhang W, Wong SC, Tse CK, Chen Q. Analysis and Comparison of Secondary Series- and Parallel-Compensated Inductive Power Transfer Systems Operating for Optimal Efficiency and Load-Independent Voltage-Transfer Ratio. IEEE Transactions on Power Electronics. 2014;29(6):2979-90.
- Reusch MF. A problem related to Earnshaw's Theorem. IEEE Transactions on Magnetics. 1994;30(3):1324-6.

ภาคผนวก



Product Folder



Sample & Buy



Technical Documents



Tools & Software



Support & Community



SG2524, SG3524

SLVS077E – APRIL 1977 – REVISED JANUARY 2015

SGx524 Regulating Pulse-Width Modulators

1 Features

- Complete Pulse-Width Modulation (PWM) Power-Control Circuitry
- Uncommitted Outputs for Single-Ended or Push-Pull Applications
- 8 mA (TYP) Standby Current

2 Applications

- Transformer-coupled DC/DC converters
- Switching-regulators of any polarity

3 Description

The SG2524 and SG3524 devices incorporate all the functions required in the construction of a regulating power supply, inverter, or switching regulator on a single chip. They also can be used as the control element for high-power-output applications. The SG2524 and SG3524 were designed for switching regulators of either polarity, transformer-coupled dc-to-dc converters, transformerless voltage doublers, and polarity-converter applications employing fixed-frequency, pulse-width modulation (PWM) techniques. The complementary output allows either single-ended or push-pull application. Each device includes an on-chip regulator, error amplifier, programmable oscillator, pulse-steering flip-flop, two uncommitted pass transistors, a high-gain comparator, and current-limiting and shutdown circuitry.

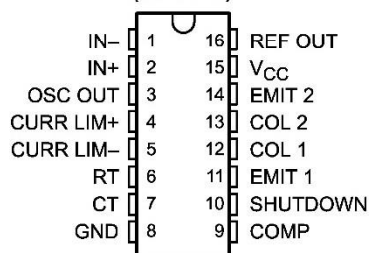
Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE (PIN)	BODY SIZE (NOM)
SGx524	SOIC (16)	9.90 mm × 3.91 mm
	PDIP (16)	9.90 mm × 6.35 mm
	NS (16)	10.30 mm × 5.30 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

4 Pinout Drawing

SG2524 . . . D OR N PACKAGE
SG3524 . . . D, N, OR NS PACKAGE
(TOP VIEW)





SG2524, SG3524

SLVS077E – APRIL 1977 – REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

Table of Contents

1 Features	1	9.2 Functional Block Diagram	9
2 Applications	1	9.3 Feature Description	10
3 Description	1	9.4 Device Functional Modes	11
4 Pinout Drawing	1	10 Application and Implementation	12
5 Revision History	2	10.1 Application Information	12
6 Pin Configurations and Functions	3	10.2 Typical Application	14
7 Specifications	4	10.3 Examples of Other Output Stages	16
7.1 Absolute Maximum Ratings	4	11 Power Supply Recommendations	18
7.2 ESD Ratings	4	12 Layout	18
7.3 Recommended Operating Conditions	4	12.1 Layout Guidelines	18
7.4 Thermal Information	4	12.2 Layout Example	19
7.5 Electrical Characteristics	5	13 Device and Documentation Support	20
7.6 Electrical Characteristics — Continued, Both Parts ..	6	13.1 Related Links	20
7.7 Typical Characteristics	7	13.2 Trademarks	20
8 Parameter Measurement Information	8	13.3 Electrostatic Discharge Caution	20
9 Detailed Description	9	13.4 Glossary	20
9.1 Overview	9	14 Mechanical, Packaging, and Orderable Information	20

5 Revision History

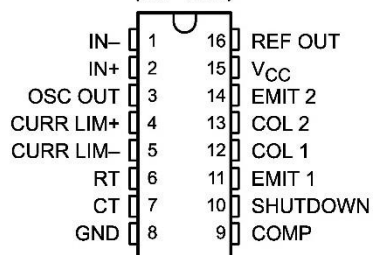
Changes from Revision I (February 2003) to Revision J

Page

- Added *Applications*, *Device Information* table, *Pin Functions* table, *ESD Ratings* table, *Thermal Information* table, *Typical Characteristics*, *Feature Description* section, *Device Functional Modes*, *Application and Implementation* section, *Power Supply Recommendations* section, *Layout* section, *Device and Documentation Support* section, and *Mechanical, Packaging, and Orderable Information* section. 1
- Deleted *Ordering Information* table. 1

6 Pin Configurations and Functions

SG2524 . . . D OR N PACKAGE
SG3524 . . . D, N, OR NS PACKAGE
(TOP VIEW)



Pin Functions

PIN		TYPE	DESCRIPTION
NAME	NO.		
COL 1	12	O	Collector terminal of BJT output 1
COL 2	13	O	Collector terminal of BJT output 2
COMP	9	I/O	Error amplifier compensation pin
CT	7	—	Capacitor terminal used to set oscillator frequency
CURR LIM+	4	I	Positive current limiting amplifier input
CURR LIM-	5	I	Negative current limiting amplifier input
EMIT 1	11	O	Emitter terminal of BJT output 1
EMIT 2	14	O	Emitter terminal of BJT output 2
GND	8	—	Ground
IN+	2	I	Positive error amplifier input
IN-	1	I	Positive error amplifier input
OSC OUT	3	O	Oscillator Output
REF OUT	16	O	Reference regulator output
RT	6	—	Resistor terminal used to set oscillator frequency
SHUTDOWN	10	I	Device shutdown
V _{CC}	15	—	Positive supply



SG2524, SG3524

SLVS077E – APRIL 1977 – REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

7 Specifications

7.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

		MIN	MAX	UNIT
V _{CC}	Supply voltage ⁽²⁾⁽³⁾		40	V
I _{CC}	Collector output current		100	mA
I _{O(ref)}	Reference output current		50	mA
	Current through CT terminal	–5		mA
T _J	Maximum junction temperature		150	°C
	Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds		260	°C
T _{stg}	Storage temperature range	–65	150	°C

(1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* table 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* table are not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

(2) All voltage values are with respect to network ground terminal.

(3) The reference regulator may be bypassed for operation from a fixed 5-V supply by connecting the VCC and reference output (REF OUT) pin both to the supply voltage. In this configuration, the maximum supply voltage is 6 V.

7.2 ESD Ratings

			VALUE	UNIT
V _(ESD)	Electrostatic discharge	Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001, all pins ⁽¹⁾	1000	V
		Charged device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101, all pins ⁽²⁾	1000	

(1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

(2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

7.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	MAX	UNIT	
V _{CC}	Supply Voltage	8	40	V	
	Reference output current	0	50	mA	
	Current through CT terminal	–0.03	–2	mA	
R _T	Timing resistor	1.8	100	kΩ	
C _T	Timing capacitor	0.001	0.1	μF	
T _A	Operating free-air temperature	SG2524	–25	85	°C
		SG3524	0	70	

7.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾	SGx524			UNIT	
	D	N	NS		
	16 PINS				
R _{θJA}	Junction-to-ambient thermal resistance ⁽²⁾⁽³⁾	73	67	64	°C/W

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *IC Package Thermal Metrics* application report, [SPRA953](#).

(2) Maximum power dissipation is a function of T_{J(max)}, θ_{JA}, and T_A. The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is PD = (T_{J(max)} – T_A)/θ_{JA}. Operation at the absolute maximum T_J of 150°C can impact reliability.

(3) The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.



7.5 Electrical Characteristics

over operating free-air temperature range, $V_{CC} = 20\text{ V}$, $f = 20\text{ kHz}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ⁽¹⁾	SG2524			SG3524			UNIT
		MIN	TYP ⁽¹⁾	MAX	MIN	TYP ⁽²⁾	MAX	
Reference section								
Output voltage		4.8	5	5.2	4.6	5	5.4	V
Input Regulation	$V_{CC} = 8\text{ V to }40\text{ V}$		10	20		10	30	mV
Ripple rejection	$f = 120\text{ Hz}$		66			66		dB
Output regulation	$I_O = 0\text{ mA to }20\text{ mA}$		20	50		20	50	mV
Output voltage change with temperature	$T_A = \text{MIN to MAX}$		0.3%	1%		0.3%	1%	
Short-circuit output current ⁽³⁾	$V_{ref} = 0$		100			100		mA
Error Amplifier section								
V_{IO} Input offset voltage	$V_{IC} = 2.5\text{ V}$		0.5	5		2	10	mV
I_{IB} Input bias current	$V_{IC} = 2.5\text{ V}$		2	10		2	10	μA
Open-loop voltage amplification			72	80		60	80	dB
V_{ICR} Common-mode input voltage range	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1.8 to 3.4			1.8 to 3.4		V
CMMR Common-mode rejection ratio			70			70		dB
B_1 Unity-gain bandwidth			3			3		MHz
Output swing	$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.5	3.8		0.5	3.8	V

(1) For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

(2) All typical values, except for temperature coefficients, are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

(3) Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean, as derived from the formula:

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


SG2524, SG3524

SLVS077E – APRIL 1977 – REVISED JANUARY 2015

www.ti.com
7.6 Electrical Characteristics — Continued, Both Parts

 over operating free-air temperature range, $V_{CC} = 20\text{ V}$, $f = 20\text{ kHz}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS ⁽¹⁾	MIN	TYP ⁽²⁾	MAX	UNIT
Oscillator section						
f_{OSC}	Oscillator frequency	$C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 2\ \text{k}\Omega$		450		kHz
	Standard deviation of frequency ⁽³⁾	All values of voltage, temperature, resistance, and capacitance constant		5		—
Δf_{OSC}	Frequency chance with voltage	$V_{CC} = 8\ \text{V}$ to $40\ \text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$			1%	—
	Frequency change with temperature	$T_A = \text{MIN}$ to MAX			2%	—
	Output amplitude at OSC OUT	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.5		V
t_W	Output pulse duration (width) at OSC OUT	$C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		0.5		μs
Output section						
$V_{(BR)CE}$	Collector-emitter breakdown voltage		40			V
	Collector off-state current	$V_{CE} = 40\ \text{V}$		0.01	50	μA
V_{sat}	Collector-emitter saturation voltage	$I_C = 50\ \text{mA}$		1	2	V
V_O	Emitter output voltage	$V_C = 20\ \text{V}$, $I_E = -250\ \mu\text{A}$	17	18		V
t_r	Turn-off voltage rise time	$R_C = 2\ \text{k}\Omega$		0.2		μs
t_f	Turn-on voltage fall time	$R_C = 2\ \text{k}\Omega$		0.1		μs
Comparator section						
	Maximum duty cycle, each output		45%			
V_{IT}	Input threshold voltage at COMP	Zero duty cycle		1		V
		Maximum duty cycle		3.5		
I_{IB}	Input bias current			-1		μA
Current limiting section						
V_I	Input voltage range		-1		1	V
$V_{(SENSE)}$	Sense voltage at $T_A = 25^\circ\text{C}$	$V_{(IN+)} - V_{(IN-)} \geq 50\ \text{mV}$, $V_{(COMP)} = 2\ \text{V}$	175	200	225	mV
	Temperature coefficient of sense voltage			0.2		mV/°C
Total Device						
I_{st}	Standby current	$V_{CC} = 40\ \text{V}$, I_{N-} , CURR LIM+, C_T , GND, COMP, EMIT 1, EMIT 2 grounded, I_{N+} at 2 V, All other inputs and outputs open		8	10	mA

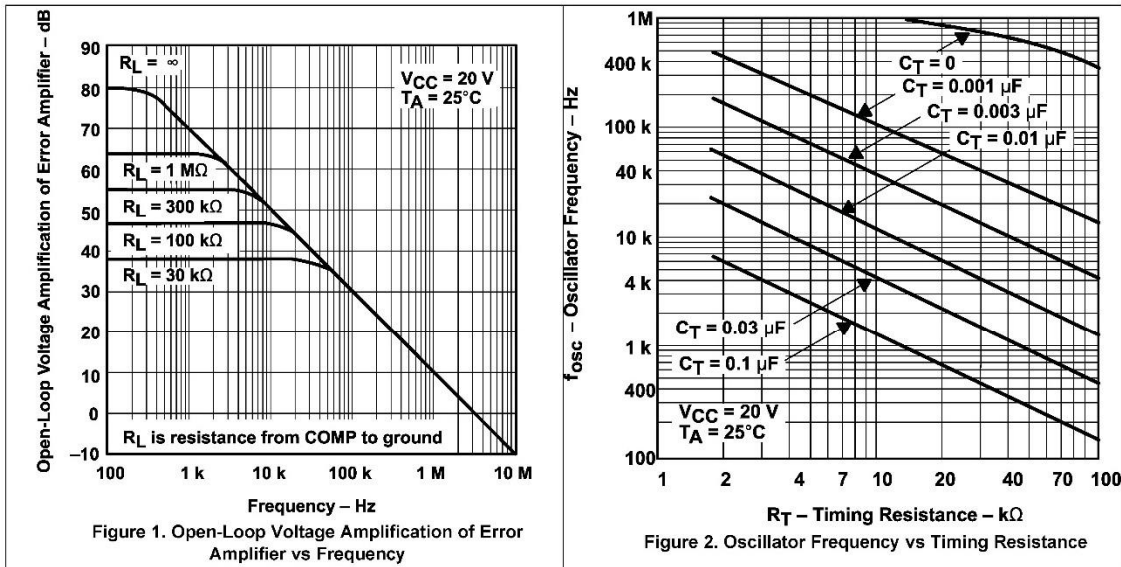
(1) For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

 (2) All typical values, except for temperature coefficients, are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

(3) Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean, as derived from the formula:

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

7.7 Typical Characteristics



SG2524, SG3524

SLVS077E – APRIL 1977 – REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

8 Parameter Measurement Information

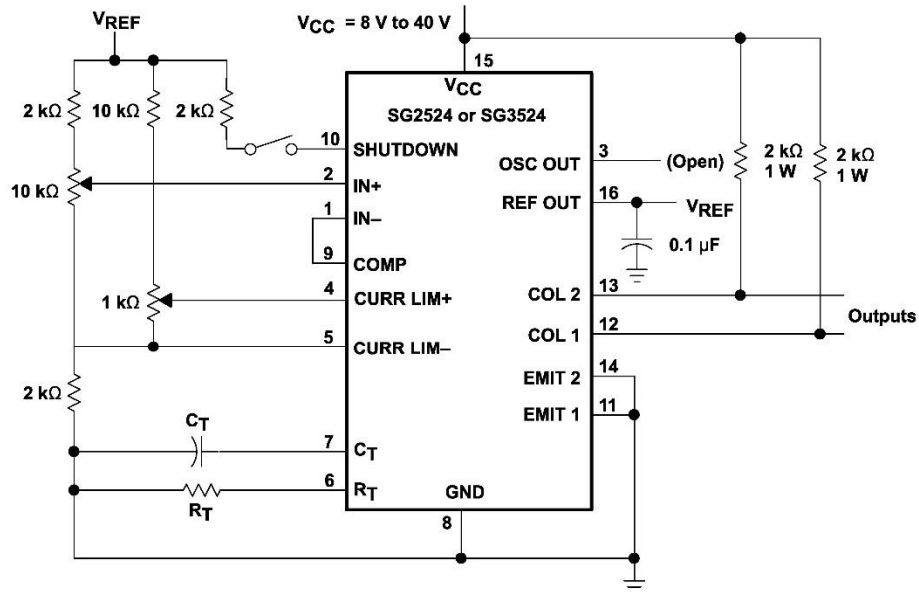


Figure 3. General Test Circuit

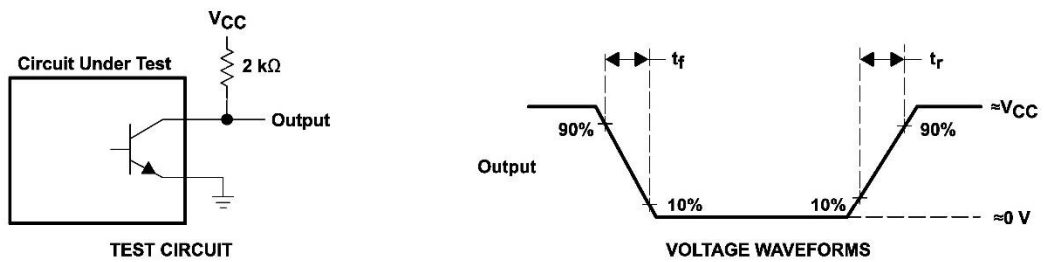


Figure 4. Switching Times

SG2524, SG3524

SLVS077E–APRIL 1977–REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

9.3 Feature Description

9.3.1 Blanking

The output pulse of the oscillator is used as a blanking pulse at the output. This pulse duration is controlled by the value of C_T as shown in Figure 2. If small values of C_T are required, the oscillator output pulse duration can be maintained by applying a shunt capacitance from OSC OUT to ground.

9.3.2 Error Amplifier

The error amplifier is a differential-input transconductance amplifier. The output is available for DC gain control or AC phase compensation. The compensation node (COMP) is a high-impedance node ($R_L = 5\text{ M}\Omega$). The gain of the amplifier is $AV = (0.002\ \Omega^{-1})R_L$ and easily can be reduced from a nominal 10,000 by an external shunt resistance from COMP to ground. Refer to Figure 1 for data.

9.3.3 Compensation

COMP, as previously discussed, is made available for compensation. Since most output filters introduce one or more additional poles at frequencies below 200 Hz, which is the pole of the uncompensated amplifier, introduction of a zero to cancel one of the output filter poles is desirable. This can be accomplished best with a series RC circuit from COMP to ground in the range of 50 k Ω and 0.001 μF . Other frequencies can be canceled by use of the formula $f \approx 1/RC$.

9.3.4 Output Circuitry

SGx524 contains two identical npn transistors, the collectors and emitters of which are uncommitted. Each transistor has antisaturation circuitry that limits the current through that transistor to a maximum of 100 mA for fast response.

9.3.5 Current Limiting

A current-limiting sense amplifier is provided in the SGx524 device. The current-limiting sense amplifier exhibits a threshold of 200 mV ± 25 mV and must be applied in the ground line since the voltage range of the inputs is limited to 1 V to -1 V. Caution should be taken to ensure the -1 -V limit is not exceeded by either input, otherwise, damage to the device may result.

Foldback current limiting can be provided with the network shown in Figure 5. The current-limit schematic is shown in Figure 6.

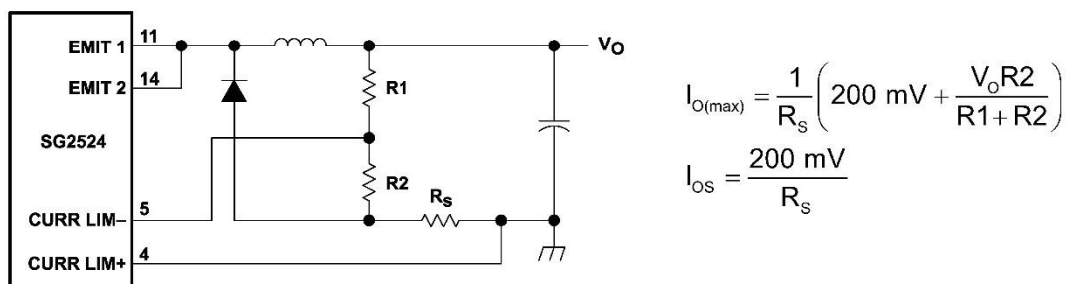
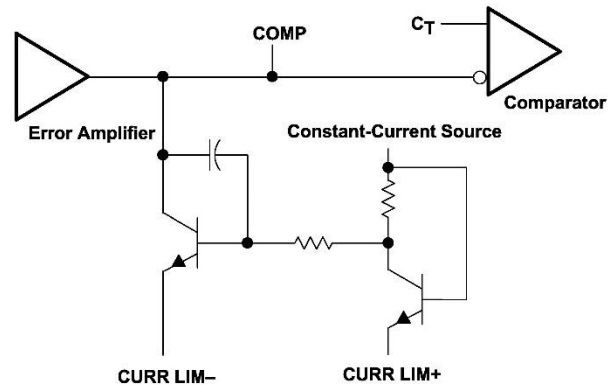


Figure 5. Foldback Current Limiting for Shorted Output Conditions

Feature Description (continued)**Figure 6. Current-Limit Schematic****9.4 Device Functional Modes****9.4.1 Synchronous Operation**

When an external clock is desired, a clock pulse of approximately 3 V can be applied directly to the oscillator output terminal. The impedance to ground at this point is approximately 2 k Ω . In this configuration, $R_T C_T$ must be selected for a clock period slightly greater than that of the external clock.

If two or more SGx524 regulators are operated synchronously, all oscillator output terminals must be tied together. The oscillator programmed for the minimum clock period is the master from which all the other SGx524s operate. In this application, the $C_T R_T$ values of the slaved regulators must be set for a period approximately 10% longer than that of the master regulator. In addition, C_T (master) = 2 C_T (slave) to ensure that the master output pulse, which occurs first, has a longer pulse duration and, subsequently, resets the slave regulators.

9.4.2 Shutdown Circuitry

COMP also can be employed to introduce external control of the SGx524. Any circuit that can sink 200 μ A can pull the compensation terminal to ground and, thus, disable the SGx524.

In addition to constant-current limiting, CURR LIM+ and CURR LIM– also can be used in transformer-coupled circuits to sense primary current and shorten an output pulse should transformer saturation occur. CURR LIM– also can be grounded to convert CURR LIM+ into an additional shutdown terminal.

10 Application and Implementation

NOTE

Information in the following applications sections is not part of the TI component specification, and TI does not warrant its accuracy or completeness. TI's customers are responsible for determining suitability of components for their purposes. Customers should validate and test their design implementation to confirm system functionality.

10.1 Application Information

There are a wide variety of output configurations possible when considering the application of the SG2524 as a voltage-regulator control circuit. They can be segregated into three basic categories:

- Capacitor-diode-coupled voltage multipliers
- Inductor-capacitor-implemented single-ended circuits
- Transformer-coupled circuits

Examples of these categories are shown in [Figure 7](#), [Figure 8](#), and [Figure 9](#), respectively. *Typical Application* demonstrates how to set up the SG2524 for a capacitor-diode output design. The same techniques for setting up the internal circuitry of the IC may also be used for the other two output stage examples shown [Examples of Other Output Stages](#).

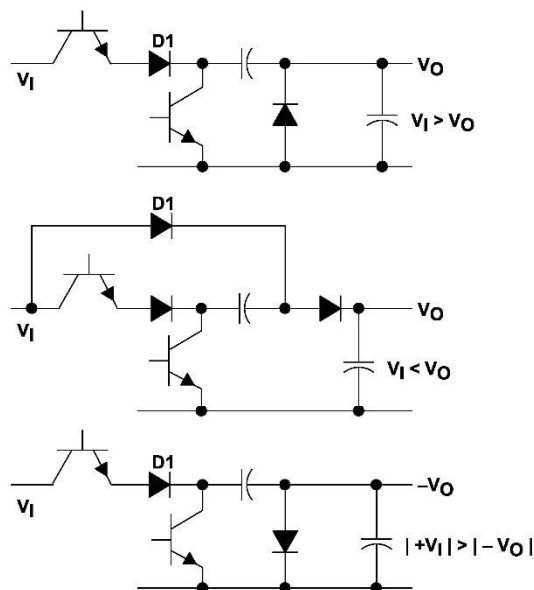


Figure 7. Capacitor-Diode-Coupled Voltage-Multiplier Output Stages

Application Information (continued)

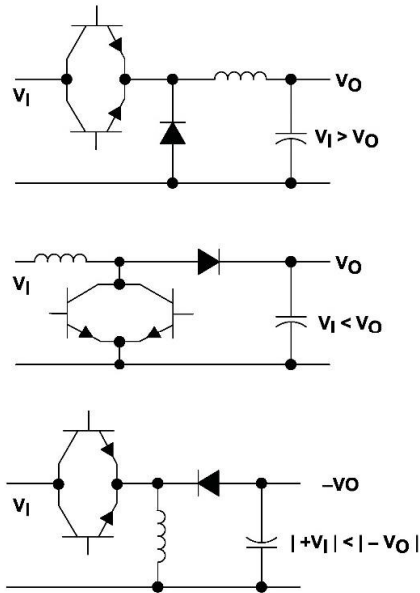


Figure 8. Single-Ended Inductor Circuit

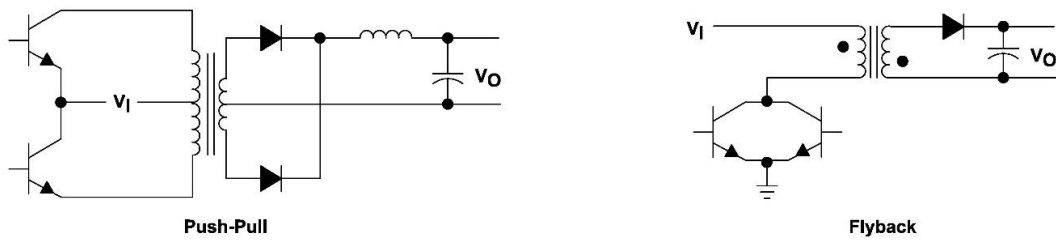
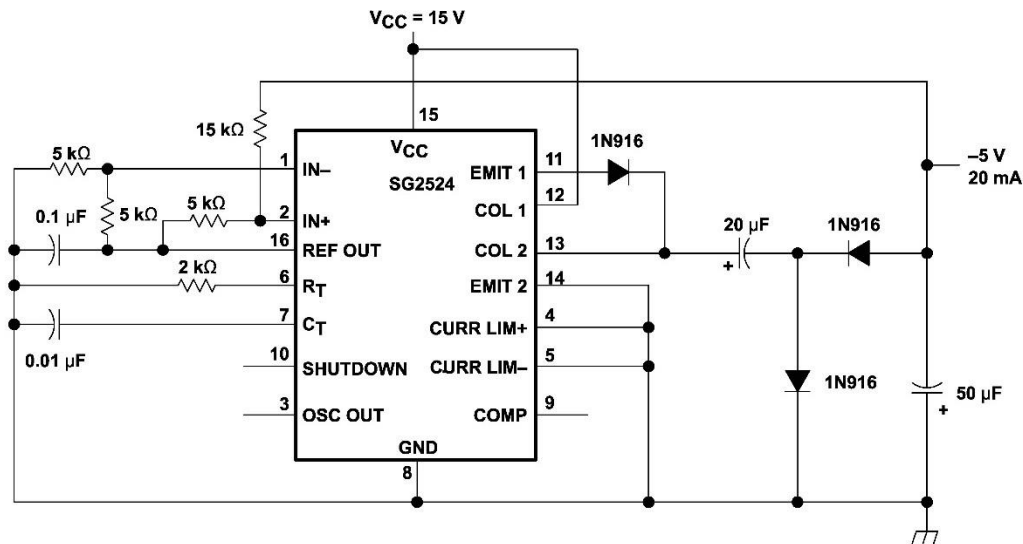


Figure 9. Transformer-Coupled Outputs

SG2524, SG3524

SLVS077E–APRIL 1977–REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

10.2 Typical Application
10.2.1 Capacitor-Diode Output

Figure 10. Capacitor-Diode Output Circuit Schematic
10.2.1.1 Design Requirements

- 15-V supply voltage
- -5-V output voltage

10.2.1.2 Detailed Design Procedure
10.2.1.2.1 Oscillator

The oscillator controls the frequency of the SG2524 and is programmed by R_T and C_T as shown in Figure 12.

$$f \approx \frac{1.30}{R_T R_C}$$

where

- R_T is in k Ω
- C_T is in μF
- f is in kHz

(1)

Practical values of C_T fall between 0.001 μF and 0.1 μF . Practical values of R_T fall between 1.8 k Ω and 100 k Ω . This results in a frequency range typically from 130 Hz to 722 kHz.

10.2.1.2.2 Voltage Reference

The 5-V internal reference can be employed by use of an external resistor divider network to establish a reference common-mode voltage range (1.8 V to 3.4 V) within the error amplifiers (see Figure 11), or an external reference can be applied directly to the error amplifier. For operation from a fixed 5-V supply, the internal reference can be bypassed by applying the input voltage to both the V_{CC} and V_{REF} terminals. In this configuration, however, the input voltage is limited to a maximum of 6 V.

Typical Application (continued)

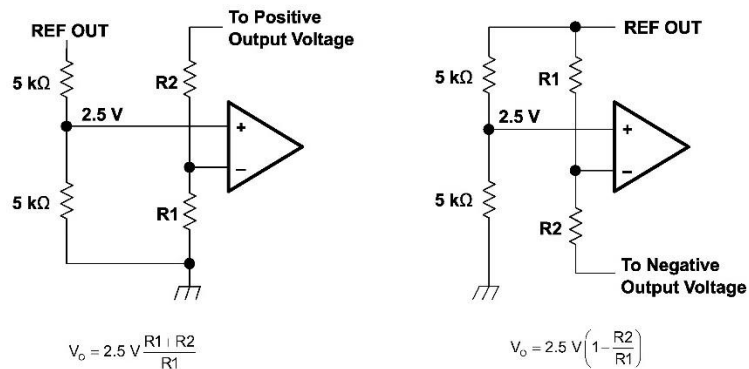


Figure 11. Error-Amplifier Bias Circuits

10.2.1.3 Application Curves

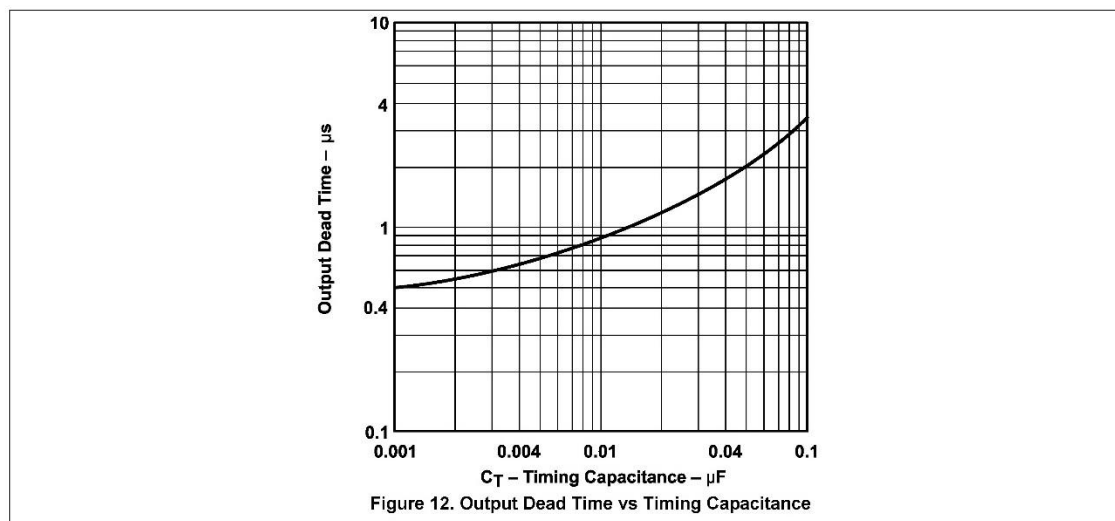


Figure 12. Output Dead Time vs Timing Capacitance

SG2524, SG3524

SLVS077E—APRIL 1977—REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

10.3 Examples of Other Output Stages

10.3.1 Flyback Converter

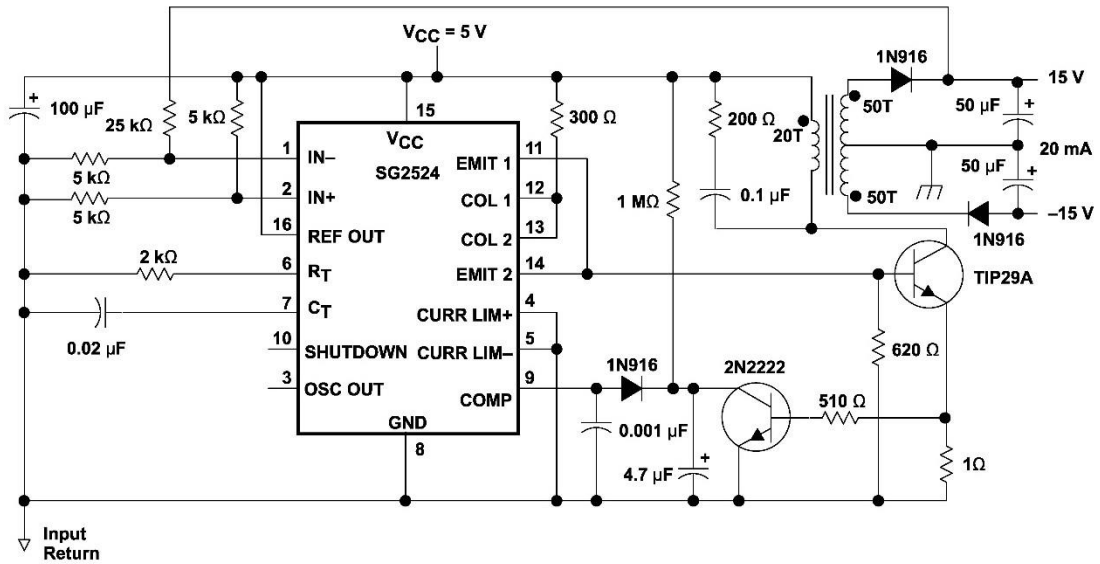


Figure 13. Flyback Converter Circuit Schematic

10.3.2 Single-Ended LC

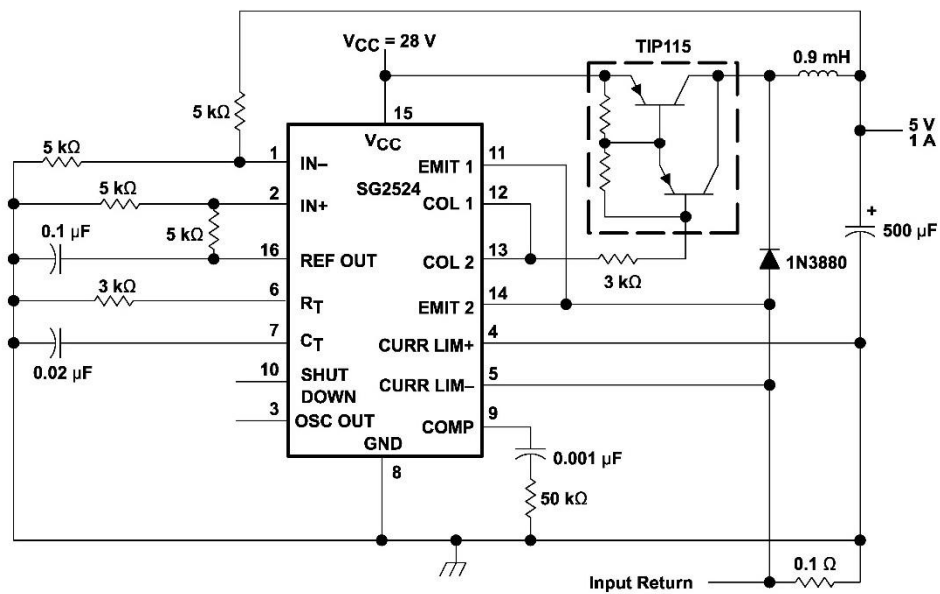


Figure 14. Single-Ended LC Circuit Schematic

Examples of Other Output Stages (continued)

10.3.3 Push-Pull Transformer-Coupled

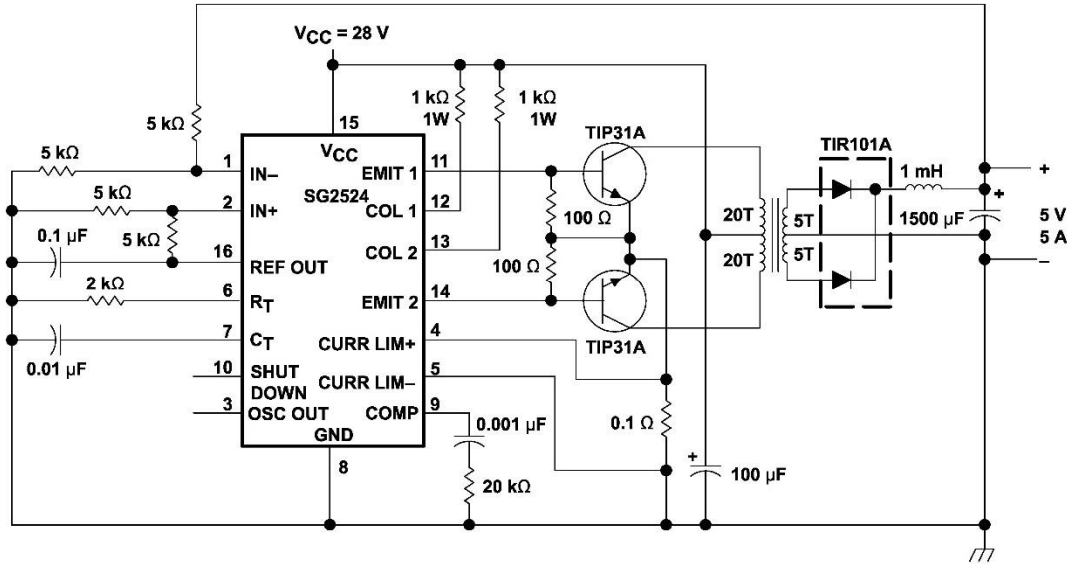



Figure 15. Push-Pull Transformer-Coupled Circuit Schematic

ประวัติย่อผู้ทำโครงการงาน

ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ชื่อ ชื่อสกุล	นายจිරพงษ์ ทวีชาญวัฒน์ชัย	
วันเดือนปีเกิด	14 มีนาคม 2538	
สถานที่เกิด	เขตบางแค แขวงหลักสอง จังหวัดกรุงเทพฯ	
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	1665 หมู่ 10 ต.หลักสอง อ.บางแค จ.กรุงเทพฯ 10160	
หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ	086-414-2836	
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษาปีที่ 6	
พ.ศ. 2556	จากโรงเรียนอัสสัมชัญธนบุรี	
พ.ศ. 2560	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	