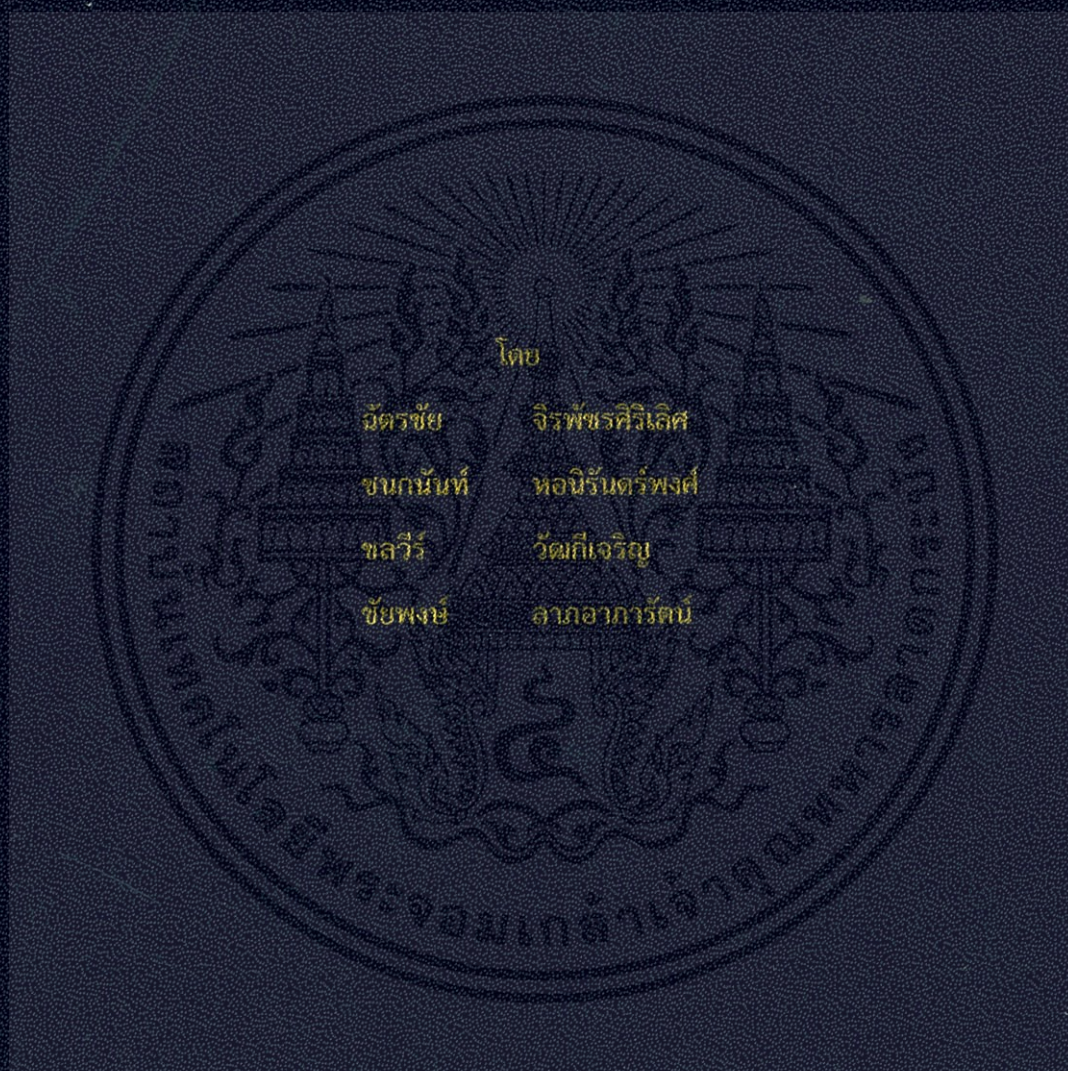


ต้นแบบเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์

A prototype of ground-impedance meter



โดย

อัครชัย	จิรพัชรศิริเลิศ
ชนกนันท์	หอนิรันดร์พงศ์
ชลวีร์	วัฒน์เกียรติ
ชัยพงษ์	ลาภอากาศรัตน์

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ต้นแบบเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์
(A prototype of ground-impedance meter)



โดย
ฉัตรชัย จิตรพัชรศิริเลิศ
ชนกนันท์ หอนิรันดร์พงศ์
ชลวีร์ วัฒนกิจเจริญ
ชัยพงษ์ ลากอภารรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาในสิ่งใดของห้องถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2556

A PROTOTYPE OF GROUND-IMPEDANCE METER



CHATCHAI JIRAPATSIRILERT
CHANOKNUN HAWNIRUNPONG
CHONLAVEE WATAKEECHAROEN
CHAIYAPHONG LAPAPARAT

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปจัดจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

ต้นแบบเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์

(A PROTOTYPE OF GROUND-IMPEDANCE METER)



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

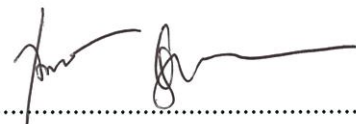
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ต้นแบบเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์

ผู้จัดทำ

- 
1. นายฉัตรชัย จิรพัชรศิริเลิศ
 2. นายชนกนันท์ หอนิรันดร์พงศ์
 3. นายชลวีร์ วัฒนกีเจริญ
 4. นายชัยพงษ์ ลากอาภารัตน์


..... อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขาว์ ชมภูอินไหว) ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นแบบเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์

นายฉัตรชัย	จิรพัชรศิริเลิศ
นายชนกนันท์	หอนิรันดร์พงศ์
นายชลวีร์	วัฒน์เกียรติ
นายชัยพงษ์	ลาภอาภารัตน์
ผศ.ดร. เชาว	ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบจนนำไปถึงการสร้างเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์สำหรับการใช้งานแบบพกพา โดยมีลักษณะเด่นคือสามารถทำการวัดได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องตัดต่อวงจรของสายกราวด์ สำหรับการออกแบบนั้นใช้กฎของโอห์มในการหาค่าอิมพีแดนซ์ โดยมีการเลือกใช้วงจรไฟฟ้าและไมโครคอนโทรลเลอร์ประกอบด้วย 1.) วงจรสร้างสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในสายกราวด์ผ่านแกนแม่เหล็กความถี่สูง 2.) วงจรวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งใช้หลักการของหม้อแปลงวัดกระแส (C.T) และ 3.) ประมวลผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะนำมาสู่การหาค่าอิมพีแดนซ์ และแสดงผลได้ทางจอ LCD พร้อมกันนี้ในอนาคตยังมีแนวคิดในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์ที่อยู่ไกลผ่านการส่งข้อมูลทางโครงข่ายไร้สาย ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A prototype of ground-impedance meter

Mr. Chatchai	Jirapatsirilert
Mr. Chanoknun	Hawnirunpong
Mr. Chonlavee	Watakeechoen
Mr. Chaipayong	Lapaparat
Asst. Prof Dr. Chow	Chompoo-inwai Advisor

Year 2013

ABSTRACT

This research represents a design conduct to create a portable Ground-Impedance meter. Its dominant feature is easy to measure without disconnecting ground. A design uses Ohm's law to calculate impedance value. Electrical circuits and microcontroller that use in this meter consist of 1.) sine wave signal generator circuit for induce voltage in ground loop through a high frequency magnetic core 2.) current measurement circuit which use principle of current transformer (CT) and 3.) process by using microcontroller which bring a result of impedance and show on LCD monitoring in the same time. In the future can be improved its ability by transfer a data of ground impedance using wireless network that will make a much benefit for electrical engineering work.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องต้นแบบเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์สามารถประสบความสำเร็จได้ เนื่องจากการตั้งใจทำงานด้วยความวิริยะ อุตสาหะ และได้รับการสนับสนุนจากบุคคลทั้งหลาย ซึ่งเป็นการสนับสนุนทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งทางคณะผู้จัดทำได้รู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างมาก จึงขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ดังกล่าว

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้คอยให้คำปรึกษา คอยชี้แนะ ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และติดตามดูแลเอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำโครงการนี้

ขอขอบพระคุณบริษัท Kumwell Grounding and Lightning Protection System ที่ได้ให้แนวคิด ให้คำแนะนำ และให้ยืมแกนแม่เหล็ก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการทำโครงการนี้จนสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณพี่นครศักดิ์ แสงศรี ที่ให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อนำมาทดลองในโครงการนี้อยู่ตลอดเวลา

ขอขอบพระคุณห้องศูนย์วิจัยและวิศวกรรมส่องสว่าง (Energy System and Illumination Research Center : ESIRC) ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ตลอดการทำปริญญานิพนธ์จนทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบคุณพี่ๆในห้องศูนย์วิจัยและวิศวกรรมส่องสว่าง (Energy System and Illumination Research Center : ESIRC) โดยเฉพาะพี่มิคซ์ และพี่เจตต์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในช่วยแก้ไขปัญหาและเสนอความคิดใหม่ๆในการทำชิ้นงาน นอกจากนี้ยังได้แนะแนวในการทำปริญญานิพนธ์ อีกทั้งให้คำแนะนำและคอยให้กำลังใจอยู่เสมอมา

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่อุปการะเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนในทางด้านการศึกษา จนสามารถทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสิ้น

นายฉัตรชัย จิรพัชรศิริเลิศ

นายชนกนันท์ หอนิรันดร์พงษ์

นายชลวีร์ วัฒนกิจเจริญ

นายชัยพงษ์ ลากอากาศรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้าน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของหม้อแปลงเครื่องวัด (Theory and operating of the instrument transformer).....	5
2.1.1 หลักการของหม้อแปลงเครื่องวัดกระแส (C.T.).....	5
2.1.2 การใช้งานหม้อแปลงกระแส (Current Transformer).....	7
2.1.3 ข้อควรระวังในการใช้งานหม้อแปลงเครื่องวัดกระแส	7
2.2 กฎของโอห์ม (Ohm's Law).....	7
2.2.1 การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรมและขนานสำหรับวงจรไฟฟ้ากระแสตรง	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2 การต่อตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ แบบอนุกรมและขนานสำหรับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ	9
2.3 ทฤษฎีแกนแม่เหล็กความถี่สูง.....	10
2.3.1 แกนแม่เหล็กชนิดพันเป็นแถบ (Tape Wound Core).....	11
2.4 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ (Induce Voltage).....	11
2.5 มาตรฐานของเครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน	13
2.5.1 การวัดค่าความต้านทานโดยวิธีการแคลมป์ออน (Clamp-on) หรือ สเตกเลส (Stakeless) ..	13
2.5.2 การวัดค่าความต้านทานโดยวิธีการตอกของสก็ง์/แคลมป์ออน (FOP/Clamp-on method)..	15
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องมือวัด	16
3.1 ภาพรวมของลำดับการทำงานในวงจรเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์	17
3.1.1 ภาพรวมของโครงการ	17
3.2 วงจรไฟเลี้ยง	18
3.3 วงจรสร้างแรงดัน	19
3.3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์.....	19
3.3.2 วงจรขยายกำลังของสัญญาณ (Power Amplifier).....	21
3.4 วงจรตรวจวัดความต้านทานของสายกราวด์.....	23
3.4.1 คุณสมบัติของแกนแม่เหล็กที่ใช้ในโครงการ.....	23
3.4.2 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกจากแกนแม่เหล็ก.....	25
3.5 วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส (Non Inverting amplifier).....	25
3.6 วงจรแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (RMS to DC Converter)	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6.1 บล็อกไดอะแกรมของการทำงาน.....	28
3.6.2 ขั้นตอนการทำงานของวงจร	28
3.7 วงจรการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จากไมโครคอนโทรลเลอร์	30
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	36
4.1 การทดลองวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (RC Oscillator)	36
4.2 การทดลองหาอัตราส่วนจำนวนรอบของวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้า	37
4.2.1 ผลการทดลองสำหรับการหาอัตราส่วนจำนวนรอบของวงจรสร้างแรงดัน.....	38
4.2.2 การทดลองหาอัตราส่วนของกระแสที่ออกมาจากแกนเหล็ก (I_{out}) และกระแสที่ไหลผ่าน ตัวต้านทาน (I_{sec}).....	38
4.3 การทดลองวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier).....	40
4.4 การทดลองวงจรแปลงค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าไฟฟ้ากระแสตรง (RMS to DC Converter).....	41
4.5 การทดลองหาค่าความต้านทานของระบบ	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	48
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา	49
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก	51
ภาคผนวก ก คู่มือไอซีของออปแอมป์ชนิดต่างๆ	52
ภาคผนวก ข คู่มือการใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC 30F4011.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค การเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ในไมโครคอนโทรลเลอร์และแสดงผล ออกทางจอ LCD.....	81
ภาคผนวก ง บทความเชิงวิชาการ.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	101



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงเครื่องวัดกระแส	6
รูปที่ 2.2 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่ประกอบด้วยตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว.....	8
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลที่ประกอบด้วยตัวต้านทานที่มีการต่อแบบอนุกรมและขนาน	8
รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบอนุกรมและ ขนาน ตามลำดับ.....	9
รูปที่ 2.5 ภาพตัดของแกนแม่เหล็กชนิดพื้นเป็นแถบ (TWC).....	11
รูปที่ 2.6 การกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับในวงจรแม่เหล็ก	12
รูปที่ 2.7 การวัดค่าความต้านทานโดยวิธีการแคลมป์ออน (Clamp-on) หรือ สเตกเลส (Stakeless).....	14
รูปที่ 2.8 ระบบการวัดค่าความต้านทานดินของเสาส่งโดยใช้วิธีการ FOP และการวัดค่ากระแสรั่วไหล.....	15
รูปที่ 3.1 หลักการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์โดยใช้วิธีการแคลมป์ (Clamp).....	16
รูปที่ 3.2 ภาพรวมของลำดับการทำงานในวงจรเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์	17
รูปที่ 3.3 วงจรไฟเลี้ยง	18
รูปที่ 3.4 ต้นแบบของวงจรไฟเลี้ยง	18
รูปที่ 3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (RC Oscillator)	20
รูปที่ 3.6 ต้นแบบของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์	20
รูปที่ 3.7 วงจรขยายกำลัง (Power Amplifier, UTC/TDA2003)	21
รูปที่ 3.8 ต้นแบบของวงจรขยายกำลัง.....	22
รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมการทำงานของแกนแม่เหล็ก.....	23
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของแกนแม่เหล็ก	24
รูปที่ 3.11 ต้นแบบของแกนแม่เหล็ก	24
รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non Inverting Amplifier).....	26
รูปที่ 3.13 ต้นแบบของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.14 แนวคิดของวงจร	27
รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน	28
รูปที่ 3.16 วงจรการแปลงสัญญาณจากค่าแรงดันรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (RMS to DC Converter).....	29
รูปที่ 3.17 ต้นแบบของวงจร RMS to DC Converter.....	29
รูปที่ 3.18 การจัดหาใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011	31
รูปที่ 3.19 ไดอะแกรมการทำงานของโมดูลการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล	32
รูปที่ 3.20 การเชื่อมต่อสัญญาณแรงดันและกระแสเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์	32
รูปที่ 3.21 การเชื่อมต่อหน้าจอ LCD เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์	33
รูปที่ 3.22 วงจรคำนวณค่า และแสดงผล	34
รูปที่ 3.23 ต้นแบบวงจรคำนวณค่า และแสดงผล	34
รูปที่ 3.24 แผนผังลำดับขั้นตอนการเขียนโปรแกรม	35
รูปที่ 4.1 การทดลองวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0.....	36
รูปที่ 4.2 ผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0	37
รูปที่ 4.3 ผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ได้จากการปฏิบัติจริง	37
รูปที่ 4.4 วงจรการทดลองหาอัตราส่วนรอบของวงจรสร้างแรงดัน.....	38
รูปที่ 4.5 การทดลองหาค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้า	39
รูปที่ 4.6 การทดลองวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0	40
รูปที่ 4.7 ผลการทดลองของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0.....	40
รูปที่ 4.8 ผลการทดลองของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสที่ได้จากการปฏิบัติจริง	41
รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองสำหรับวงจร RMS to DC Converter	41
รูปที่ 4.10 การทดลองวงจร RMS to DC Converter ด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.11 ผลการทดลองของวงจร RMS to DC Converter ด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0 ที่ค่าแรงดัน ขาเข้าขนาด 2.5 โวลต์.....	42
รูปที่ 4.12 ผลการทดลองของวงจร RMS to DC Converter ด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0 ที่ค่าแรงดัน ขาเข้าขนาด 5 โวลต์.....	43
รูปที่ 4.13 ผลการทดลองของวงจร RMS to DC Converter ที่ปฏิบัติจริง ที่ค่าแรงดันขาเข้าขนาด 2.5 โวลต์ ...	43
รูปที่ 4.14 ผลการทดลองของวงจร RMS to DC Converter ที่ปฏิบัติจริง ที่ค่าแรงดันขาเข้าขนาด 5 โวลต์	44
รูปที่ 4.15 กราฟการทดลองของวงจร RMS to DC โดยเปรียบเทียบแนวโน้มระหว่างโปรแกรม NI Multisim 13.0 กับการปฏิบัติจริง.....	45
รูปที่ 4.16 ไดอะแกรมของการทดลองสำหรับวงจรแสดงผล	46
รูปที่ 4.17 รูปวงจรที่ได้จากการปฏิบัติจริงของวงจรการทดลองหาค่าความต้านทานของระบบ	46
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าความความต้านทานของเครื่องต้นแบบเมื่อเทียบกับมัลติมิเตอร์ยี่ห้อต่างๆ.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 รายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแกนแม่เหล็กโดยออกแบบการใช้งานที่ความถี่ 2 กิโลเฮิรตซ์	24
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองสำหรับการหาอัตราส่วนจำนวนรอบของวงจรถวายแรงดัน	38
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของกระแสไฟฟ้า	39
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบของวงจรถวายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส	41
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างโปรแกรม NI Multisim 13.0 และจากการปฏิบัติจริง สำหรับวงจร RMS to DC Converter.....	44
ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานระหว่างต้นแบบเครื่องมือวัดกับมัลติมิเตอร์ยี่ห้อต่างๆ.....	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการใช้ไฟฟ้าในงานระบบต่างๆมากขึ้น ซึ่งระบบเหล่านั้นจะมีการติดตั้งระบบกราวด์ (Grounding system) เพื่อป้องกันอันตรายแก่บุคคล และทรัพย์สิน จากการเกิดฟ้าผ่า การลัดวงจร ความผิดปกติอื่นๆ โดยระบบกราวด์ดังกล่าวจะเป็นเส้นทางให้กระแสฟ้าผ่า กระแสกระแสช็อก กระแสลัดวงจร ไหลผ่านระบายลงสู่ดิน ซึ่งโดยปกติในการติดตั้งระบบกราวด์ล้วนต้องการให้อิมพีแดนซ์ หรือความต้านทานมีค่าต่ำที่สุด เพราะถ้าหากมีค่าสูงจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความผิดปกติเหล่านั้นไม่ไหลลงสู่ดิน แต่จะไหลเข้าสู่ตัวอุปกรณ์ส่งผลให้เกิดความเสียหายได้ และถึงแม้ว่าจะทำการติดตั้งระบบกราวด์เสร็จสิ้นแล้ว ก็ไม่ได้หมายความว่า จะจบกระบวนการเสียทีเดียว เนื่องจากฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงไปย่อมส่งผลให้ระบบกราวด์มีการเปลี่ยนแปลงด้วย อีกทั้งยังมีปัจจัยภายนอกอื่นๆที่ส่งผลต่อระบบกราวด์ด้วยเช่นกัน ทำให้ต้องทำการตรวจสอบค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์อยู่เป็นระยะเพื่อตรวจสอบค่าอิมพีแดนซ์ว่ายังอยู่ในมาตรฐานหรือไม่ โดยในการวัดค่าอิมพีแดนซ์นั้นถ้าใช้เครื่องวัดระบบเก่าจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการวัดเนื่องจากต้องมีการตัดต่อวงจร ทำให้ต้องมีการหยุดใช้งานระบบไฟฟ้านั้นชั่วคราว ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเอาแนวคิดจากหลักการทำงานของแคลมป์มิเตอร์เข้ามาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์ต่างๆ ซึ่งหลักการนี้จะช่วยลดความยุ่งยากที่ต้องการตัดต่อวงจรลงไป โดยสามารถนำไปคล้องสายกราวด์เพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้โดยง่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาและออกแบบชิ้นงานเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์
2. ศึกษาพื้นฐานและความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับข้อมูลต่างๆของระบบกราวด์
3. ศึกษาหลักการทำงานของแคลมป์มิเตอร์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง
4. ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของอุปกรณ์ต่างๆที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของการวิจัย

โครงการนี้ได้ศึกษาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวกับการออกแบบในการสร้างเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์ (Design Ground-Impedance Meter) โดยการสร้างเครื่องมือวัดแบบจำลองขึ้นมาก่อนเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาหลักการควบคุมและออกแบบเครื่องมือวัดที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาเบื้องต้น เช่น ภาษาซี ภาษาแอสเซมบลี (Assembly) เป็นตัวส่งผ่านไป ยังไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาตามคำสั่งที่ป้อนเข้าไปในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์ แล้วแสดงค่าออกมาทางจอแสดงผล (LCD Monitoring)

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาวิธีการในการวัดค่าความต้านทานของสายดิน ระบบต่อลงดิน ความต้านทานดินโดยใช้เครื่องวัดชนิดแคลมป์ออน และมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) พ.ศ. 2545 ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการต่อลงดิน และมาตรฐานของเครื่องวัดความต้านทาน
2. ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการของเครื่องวัดชนิดแคลมป์ออน ในการวัดความต้านทานสายดิน ได้แก่ กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law), หลักการของหม้อแปลงเครื่องวัดกระแส ทฤษฎีแกนแม่เหล็ก ฯลฯ
3. ทดลองสมมุติฐานที่ตั้งไว้ใน การวัดค่าความต้านทานสายดินในห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้า
4. ประดิษฐ์เครื่องวัดชนิดแคลมป์ออน โดยใช้ทฤษฎีและหลักการต่างๆที่ได้ค้นคว้ามา
5. ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการวัดของเครื่องวัดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมากับเครื่องวัดที่ได้มาตรฐานว่ามีความเที่ยงตรงในการวัดมากน้อยเพียงใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงานโครงการ

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินงาน

รายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงาน	พ.ศ. 2556							พ.ศ. 2557		
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาแนวคิด การทำงานของเครื่องมือวัด และมาตรฐานการวัดหลักดิน	←→									
2. ค้นคว้าทฤษฎี และหลักการการทำงานของเครื่องมือวัด		←→								
3. ศึกษาต้นแบบของเครื่องมือวัด			←→							
4. วิเคราะห์ทฤษฎี หลักการและต้นแบบเพื่อนำไปสร้างเครื่องมือวัด				←→						
5. ออกแบบ และประกอบสร้างเครื่องมือวัด						←→				
6. ทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดจริง							←→			
7. สรุปผลการทำงานและประเมินผล								←→		
8. วิเคราะห์ปัญหา และนำไปปรับปรุงแก้ไข									←→	
9. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์										←→
หมายเหตุ	←→		วางแผนการดำเนินงาน				←→			ทำงานจริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้เข้าใจการทำงานของ EM-Coupling มากขึ้น โดยผ่านการทำงานของเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์
2. มีความเข้าใจและทราบถึงมาตรฐานของระบบการต่อลงดิน โดยจะต้องมีค่าความต้านทานดินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าที่ถูกต้องตามมาตรฐานของวสท.
3. สามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้โดยง่าย เพราะเครื่องมือที่ทำการวิจัยนั้น มีลักษณะการใช้งานที่ง่าย และสามารถพกพาได้สะดวก
4. สามารถนำมาใช้ได้ทั่วไป ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความปลอดภัยมากขึ้น เช่น หากเกิดฟ้าผ่าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง แล้ววัดค่าอิมพีแดนซ์ได้ไม่เกิน 5 โอห์ม จะทำให้ไม่เกิดความเสียหายต่อระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

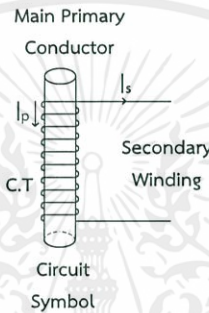
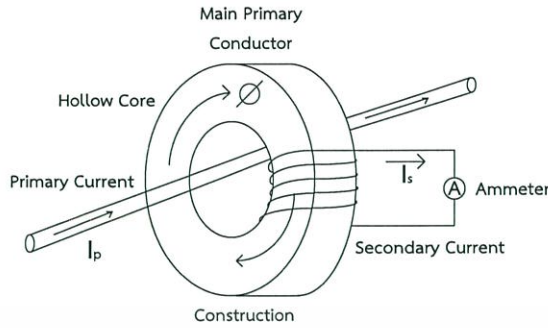
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่สำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองของเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกรวด ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีและหลักการการทำงานของหม้อแปลงเครื่องวัดชนิดหม้อแปลงกระแส กฎของโอห์ม ทฤษฎีแกนแม่เหล็ก หลักการของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และมาตรฐานของเครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน เป็นต้น

2.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของหม้อแปลงเครื่องวัด (Theory and operating of the instrument transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้านอกจากจะมีประโยชน์ทางการเพิ่มหรือลดแรงดันแรงดันไฟฟ้าแล้วยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานด้านการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ซึ่งจุดเด่นของหม้อแปลงไฟฟ้าคือ มีคุณสมบัติในด้านการแยกวงจรไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิออกจากกัน (Isolated electric circuit) อีกทั้งยังสามารถที่จะออกแบบให้ใกล้เคียงกับหม้อแปลงในอุดมคติโดยที่ราคาของหม้อแปลงไม่สูงมากจนเกินไป และค่าอัตราส่วนรอบของหม้อแปลง Transformer ratio หรือ turn ratio (a) ช่วยในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าหรืออาจเป็นการลดขนาดของกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับเครื่องมือวัด และเกิดความปลอดภัยกับอุปกรณ์ที่ใช้งาน โดยมีหม้อแปลงที่นำมาช่วยในการวัด 2 แบบหลัก คือ Potential Transformer (P.T.) และ Current Transformer (C.T.) ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะหลักการทำงานของ Current Transformer (C.T.) เท่านั้น เนื่องจากนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้

2.1.1 หลักการของหม้อแปลงเครื่องวัดกระแส (C.T.)

เป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการลดกระแสสูงในวงจรไฟฟ้าหลัก (Main circuit) ที่ต้องการวัด ให้มาอยู่ในย่านที่เหมาะสมกับพิกัดของเครื่องมือวัด เช่น 5 แอมแปร์ โดยการคล้องสายไฟฟ้าผ่านแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรแม่เหล็กซึ่งมีค่าจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (N_1) เท่ากับ 1 รอบ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ซึ่งเหมือนกับการต่อมิเตอร์วัดกระแสให้อนุกรมกับวงจรไฟฟ้าที่ต้องการวัดค่ากระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปกระแสสูงสุดที่ออกมาจากด้านทุติยภูมิจะมีค่าเท่ากับ 5 แอมแปร์ที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงเครื่องวัดกระแส

โดยจากผลต่างของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านปฐมภูมิกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านทุติยภูมิจะมีค่าเท่ากับแรงสร้างสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก

$$N_p I_p - N_s I_s = N_p I_\phi \tag{2.1}$$

เนื่องจากหม้อแปลงเครื่องวัดกระแส (Current Transformer) ถูกออกแบบให้มีความใกล้เคียงกับในทางอุดมคติ จึงให้ค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็กทางด้านทุติยภูมิมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้ความต้องการกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กของแกนเหล็กมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ด้วย นั่นคือ

$$N_p I_p - N_s I_s = 0 \tag{2.2}$$

ซึ่งจะทำให้ได้อัตราส่วนของกระแส คือ

$$I_s = \left(\frac{N_p}{N_s}\right) I_p \tag{2.3}$$

เมื่อกำหนดให้ $N_p = 1$ turn จะสามารถหาค่าจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิได้จากสมการ

$$N_s = \frac{I_p}{I_s} \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ N_p คือ จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (รอบ)

N_s คือ จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (รอบ)

I_p คือ ค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (แอมแปร์)

I_s คือ ค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ (แอมแปร์)

การที่ทำให้หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) มีความแม่นยำในการส่งผ่านค่าเพื่อการจัดเก็บข้อมูลนั้นสามารถทำได้โดยให้แกนเหล็กต้องมีค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (μ_r) สูง และมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่ำๆ ซึ่งในการออกแบบวงจรแม่เหล็กไม่ควรมียอดต่อ และความต้านทานขดลวดทุติยภูมิมีค่าเข้าใกล้ศูนย์โดยการเพิ่มขนาดของขดลวด

2.1.2 การใช้งานหม้อแปลงกระแส (Current Transformer)

ซึ่งการจำแนกหม้อแปลงกระแส สามารถแบ่งตามลักษณะของการใช้งานได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. หม้อแปลงกระแสสำหรับการวัด (Measurement's C.T.)
2. หม้อแปลงกระแสสำหรับการป้องกัน (Protection's C.T.)

2.1.3 ข้อควรระวังในการใช้งานหม้อแปลงเครื่องวัดกระแส

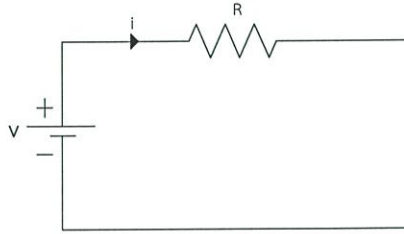
เมื่อต่อหม้อแปลงเครื่องวัดกระแสแต่ไม่มีโหลด จะต้องลัดวงจรขาออกในฝั่งทุติยภูมิไว้ตลอดเวลา เพื่อป้องกันไม่ให้หม้อแปลงเครื่องวัดกระแสเสียหาย เนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำ (induced voltage) จากสมการของ $V_L = L \frac{di}{dt}$ ตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) เมื่อเกิดทรานเซียนต์จะทำให้ $\frac{di}{dt}$ มีค่าสูงมาก

2.2 กฎของโอห์ม (Ohm's Law)

กฎของโอห์ม เป็นกฎที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และ ความต้านทานโดยกฎของโอห์มกล่าวว่า “กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรแปรผันโดยตรงกับแรงดันที่ป้อนและแปรผกผันกับความต้านทานในวงจร” โดยสามารถนำมาเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = IR \quad (2.5)$$

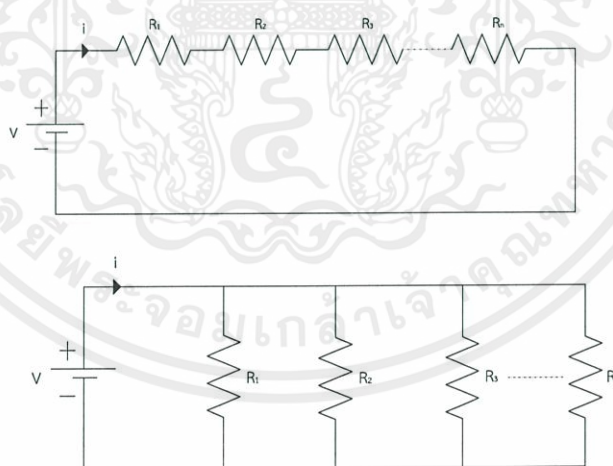


รูปที่ 2.2 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่ประกอบด้วยตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว

โดยที่ V คือ แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์ (Volt)
 I คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere)
 Z คือ ความต้านทาน มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm หรือ Ω)

2.2.1 การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรมและขนานสำหรับวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

การต่อตัวต้านทานสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบอนุกรมและแบบขนานในกรณีที่มีการต่อตัวต้านทานมากกว่าหนึ่งตัว จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลที่ประกอบด้วยตัวต้านทานที่มีการต่อแบบอนุกรมและขนาน

วงจรรอนุกรม

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (2.6)$$

วงจรรขนาน

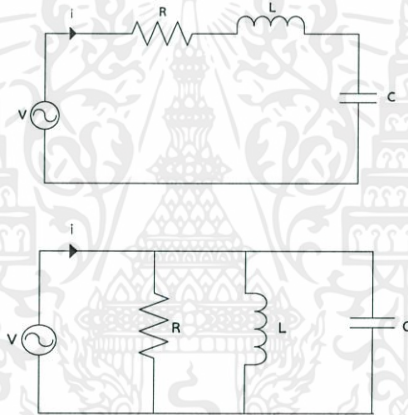
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือระบบไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับ จากรูปที่ 2.3 เป็นวงจรของระบบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งในการพิจารณาวงจรไฟฟ้าจะพิจารณาแต่ค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียว แต่ในความเป็นจริงแล้วในทุกวงจรไม่ได้มีแค่ตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว แต่อาจจะประกอบด้วย ตัวต้านทาน , ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ซึ่งค่าต่างๆขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ โดยเมื่อรวมความต้านทานของทั้งสามตัวเข้าด้วยกันจะมีชื่อที่เรียกว่า ความต้านทานเชิงซ้อนหรือค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) โดยในการพิจารณาระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) จะถูกนำมาพิจารณา

2.2.2 การต่อตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ แบบอนุกรมและขนานสำหรับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

การต่อตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ สามารถแบ่งได้ตามลักษณะการต่อวงจรของไฟฟ้ากระแสสลับได้เป็น 2 แบบ คือ แบบอนุกรมและแบบขนาน ดังรูป



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบอนุกรมและขนาน ตามลำดับ

จากในรูปเป็นการต่อวงจรแบบอนุกรม และขนาน ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลได้ดังนี้

$$\text{วงจรมอนุกรม} \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.8)$$

$$\text{วงจรมขนาน} \quad \frac{1}{Z} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ X_L	คือ	ความต้านทานความเหนี่ยวนำ	มีหน่วยเป็น โอห์ม
X_C	คือ	ความต้านทานความจุไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น โอห์ม
Z	คือ	อิมพีแดนซ์	มีหน่วยเป็น โอห์ม

2.3 ทฤษฎีแกนแม่เหล็กความถี่สูง

แกนแม่เหล็กมีหน้าที่หลักคือ เป็นเส้นทางเดินหลักสำหรับเส้นแรงแม่เหล็กในการเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์แม่เหล็ก หรือเป็นเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานแม่เหล็กกับโหลดทางแม่เหล็ก เช่น สำหรับในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้า จะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายพลังงานแม่เหล็กจะได้แก่ ขดลวดทองแดงทางด้านปฐมภูมิซึ่งจะรวมถึงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และโหลดทางแม่เหล็กจะได้แก่ ขดลวดทองแดงทางด้านทุติยภูมิ

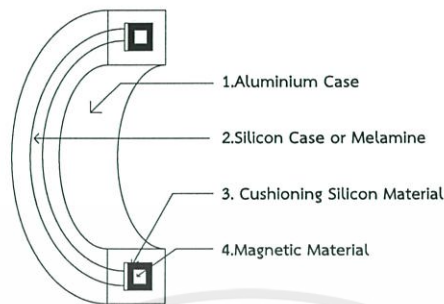
โดยทั่วไปหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำและหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง โดยที่ความแตกต่างระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำ (50 หรือ 60 Hz) และหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง (ในหลักกิโลเฮิร์ตซ์หรือมากกว่านั้น) จะขึ้นอยู่กับชนิดเนื้อสารของแกนแม่เหล็กที่ใช้ โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำจะใช้แกนเหล็ก (iron core) ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะใช้แกนเฟอร์ไรต์ (ferrite) เป็นต้น

สารแม่เหล็กที่ใช้ทำเป็นแกนแม่เหล็กในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะต้องมีคุณสมบัติที่มีความซึมซาบสัมพัทธ์สูงๆ

เฟอร์โรแมกเนติกหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโลหะแม่เหล็ก (magnetic core) จะแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบแข็ง (hard materials) ซึ่งนิยมใช้ทำแม่เหล็กถาวร และแบบอ่อน (soft materials) ซึ่งจะนิยมใช้ทำเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าและตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยเฟอร์โรแมกเนติกมีคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัวสูง (7,000 – 23,000 เกาส์ : โดยที่ 1 เกาส์ เท่ากับ 10^{-4} เทสลา) มีค่าความซึมซาบสัมพัทธ์สูง (1,000 – 200,000) และมีค่าความนำไฟฟ้ามี่ค่าสูง ด้วยจึงจำเป็นที่จะต้องทำให้เป็นแผ่นบางๆ ประกบกัน (laminated or tape form) เพื่อลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน และด้วยคุณสมบัติที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัวสูง จึงเป็นที่นิยมในการใช้กับอุปกรณ์แม่เหล็กที่ใช้กับความถี่ 50 – 400 Hz อย่างไรก็ตามเนื่องจากปัญหา กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน จึงทำให้ไม่สามารถใช้ในงานความถี่สูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 แกนแม่เหล็กชนิดพันเป็นแถบ (Tape Wound Core)



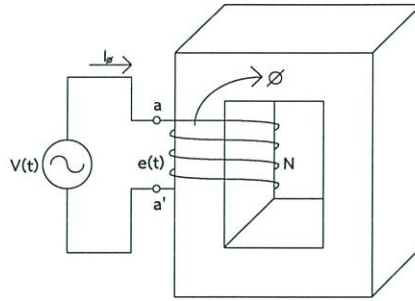
รูปที่ 2.5 ภาพตัดของแกนแม่เหล็กชนิดพันเป็นแถบ (TWC)

แกนแม่เหล็กชนิดพันเป็นแถบ (Tape Wound Core หรือ metal alloy tape wound cores) ซึ่งจะนิยมเรียกย่อๆว่า TWC จัดว่าเป็นแกนเฟอร์โรแมกเนติกแบบอ่อน (soft ferromagnetic) โดยเกิดจากการใช้อัลลอยด์ (alloy) เช่น เพอมาลลอยด์ (permalloy) ซึ่งแกนแม่เหล็กที่ทำจากสารดังกล่าว จะมีกราฟคุณลักษณะของความหนาแน่นต่อความเข้มสนามแม่เหล็กใกล้เคียงกับในทางอุดมคติ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ค่าความซึบซาบแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดมีค่าสูง อย่างไรก็ตามตามความต้านทานไฟฟ้าภายในแกนแม่เหล็กจะมีค่าต่ำ จึงเป็นที่มาของการแบ่ง TWC ออกเป็นแผ่นบางๆ เพื่อลดค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนภายในแกนแม่เหล็ก โดยส่วนใหญ่แล้ว TWC จะนิยมใช้กับความถี่กำลัง เช่น 50 , 60 และ 400 Hz เป็นต้น แต่ TWC จะไม่นิยมใช้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ซึ่ง เพราะแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ซึ่งจะทำงานที่ความถี่สูง (ประมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 70 kHz) ซึ่งถ้าหากใช้แกนแม่เหล็กที่ความถี่สูงดังกล่าวจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนมีค่าสูงขึ้น

2.4 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ (Induce Voltage)

เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในวงจรแม่เหล็กจะเกิดปรากฏการณ์ที่แตกต่างจากการป้อนเข้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งการป้อนเข้าหรือการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายในแกนที่ใช้เป็นวงจรแม่เหล็ก ซึ่งขนาดของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนจะสัมพันธ์กับขนาดของความถี่และรูปร่างของไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้าดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับในวงจรมแม่เหล็ก

ถ้ากำหนดให้การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กเป็นแบบฟังก์ชันไซน์ (Sine)

$$\phi(t) = \phi_{\max} \sin \omega t \quad (2.10)$$

$$\phi(t) = A_c B_{\max} \sin \omega t \quad (2.11)$$

โดยที่	ϕ_{\max}	คือ	ค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก	มีหน่วยเป็น Wb
	B_{\max}	คือ	ค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก	มีหน่วยเป็น Tesla
	A_c	คือ	พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก	มีหน่วยเป็น m^2
	$\omega = 2\pi f$	คือ	ค่าความเร็วเชิงมุม	มีหน่วยเป็น rad/s
	f	คือ	ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ	มีหน่วยเป็น Hz

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) จะสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Voltage)

ในขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กที่มีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ N รอบ

$$e(t) = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.12)$$

$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.13)$$

$$e(t) = \omega N A_c B_{\max} \cos \omega t \quad (2.14)$$

$$e(t) = E_{\max} \cos \omega t \quad (2.15)$$

จากการเปรียบเทียบระหว่างสมการที่ (2.13) กับ (2.14) จะได้ว่า $E_{\max} = 2\pi f N A_c B_{\max}$

และสามารถหาค่ารากที่สองของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (rms induced voltage : E_{rms})

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากสมการ
$$E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.16)$$

$$E_{rms} = \frac{2\pi f N A_c B_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.17)$$

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{max} \quad (2.18)$$

2.5 มาตรฐานของเครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน

2.5.1 การวัดค่าความต้านทานโดยวิธีการแคลมป์ออน (Clamp-on) หรือ สเตกเลส (Stakeless)

เครื่องวัดแบบแคลมป์ออนทำการวัดค่าความต้านทานของแท่งหลักดินโดยการแคลมป์เข้ากับสายตัวนำหลักดินดังภาพประกอบในรูปที่ 2.7 เมื่อเปิดเครื่อง เครื่องวัดแบบแคลมป์ออนจะเหนี่ยวนำแรงดันด้วยค่าความถี่ที่กำหนด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 กิโลเฮิรตซ์ และ 3.4 กิโลเฮิรตซ์ เข้าไปในระบบกราวด์รวมทั้งแท่งหลักดินที่อยู่ภายใต้การวัดค่าด้วย แรงดันเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแส (I_{test}) ที่ไหลภายในระบบมัลติ-กราวด์ (multi-grounded system) ซึ่งถูกทำการวัดค่าโดยเครื่องวัด อัตราส่วนแรงดันถึงกระแส (อิมพีแดนซ์) นั้นสามารถนำเสนอและแสดงผลในรูปแบบดิจิตอลโดยเครื่องวัด วิธีการนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าค่าอิมพีแดนซ์ในระบบนิวทรัล (หรือ ส่วนป้องกัน) ของมัลติ-กราวด์ ถูกแยกออกจากแท่งหลักดินที่อยู่ภายใต้การวัด ซึ่งก็คือมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแท่งหลักดินที่อยู่ภายใต้การวัด ดังนั้นจึงสามารถสมมุติได้ว่ามีค่าเท่ากับศูนย์ ($Z_{eq} = 0\Omega$) ด้วยสมมุติฐานดังกล่าวนี้จึงทำให้สามารถอ่านค่าโดยประมาณของค่าความต้านทานของแท่งหลักดินอย่างถูกต้องในขณะที่ใช้งาน

ความเที่ยงตรงแม่นยำของอุปกรณ์แบบแคลมป์ออนนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการเข้าคู่ที่เหมาะสมและการวางแนวของขากรรไกร (jaws) เครื่องวัดแบบแคลมป์ออนต้องการการเทียบค่ากับค่าความถี่ที่ได้มาตรฐาน เพื่อให้แน่ใจได้ว่ามันทำงานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

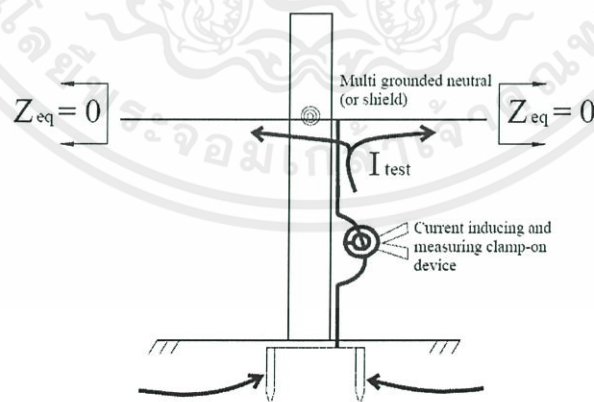
ถึงแม้ว่าวิธีการนี้จะถูกนำไปใช้งานจริงและใช้กันอย่างแพร่หลายในสายส่งและสายจำหน่าย ด้วยทฤษฎีการวัดของมันเป็นทำให้ตัวของเครื่องมือวัดเองมีข้อจำกัดบางอย่างในการนำไปประยุกต์ใช้งานตามหัวข้อด้านล่างนี้

- การประยุกต์ใช้งานยังมีข้อจำกัดในเรื่องของแท่งหลักดินที่มีการเชื่อมต่อกับระบบกราวด์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

เอกสารนี้เป็น b) ในการวัดค่าอาจจะมีคลาดเคลื่อนมาก หากว่าค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำของระบบการคำนวณต่ำกว่ากรณีใดๆทั้ง นิวทรัล (หรือ ส่วนป้องกัน) ของมัลติ-กราวด์ที่อยู่ภายใต้การวัดมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับค่า

ความต้านทานที่ทำการวัด นี่เป็นเรื่องที่สำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์แบบแคลมป์ออน ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการทดสอบค่าความถี่สูงตั้งแต่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ จนถึง 3.4 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อรักษาระดับการทำงานของมันให้มีเสถียรภาพ สมมุติว่าไม่มีการคำนวณค่ารีแอ็กแตนซ์ในวงจรที่ทำการวัด ค่าความถี่สูงที่ถูกฉีดเข้าสู่วงจรที่ทำการวัดจะทำให้เกิดการเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรและสามารถทำให้เกิดค่าความผิดพลาดอย่างมากในการอ่านค่าหากว่าค่าความเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่

- c) การกักร้อนที่เกิดในส่วนต่อเข้าหรือส่วนเชื่อมต่อบนนิวทรัล (หรือ สายป้องกัน) ของระบบสามารถส่งผลกระทบต่อในการอ่านค่า อย่างไรก็ตามการป้องกันแบบเปิดหรือสายนิวทรัลจะถูกวัดโดยตรงด้วยเครื่องวัด
- d) วิธีการนี้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับระบบแห่งหลักดินที่เชื่อมต่อกันแบบมัลติเปิล (multiple-connected ground electrode system) เช่น กริดกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย , แห่งหลักดินที่มีเชื่อมต่อกันแบบมัลติ (multi-connected pole) หรือ โครงสร้างของกราวด์ การตัดการเชื่อมต่อแห่งหลักดินที่มีเชื่อมต่อกันแบบมัลติ (multi-connected pole) หรือ โครงสร้างของกราวด์ ยกเว้นที่ขาที่ทำการวัด ตรวจสอบให้แน่ใจว่าตัวนำกราวด์ทุกตัวถูกตัดการเชื่อมต่อเพื่อความปลอดภัย
- e) สัญญาณรบกวนความถี่สูงในระบบสามารถส่งผลกระทบต่อในการอ่านค่าได้ ค่าอัตราส่วนการรบกวนถึงสัญญาณ (noise-to-signal) ที่สูงสามารถเกิดขึ้นในขณะที่ทำการวัดค่าความต้านทานดินที่มีค่าสูง



รูปที่ 2.7 การวัดค่าความต้านทานโดยวิธีการแคลมป์ออน (Clamp-on) หรือ สเตกเลส (Stakeless)

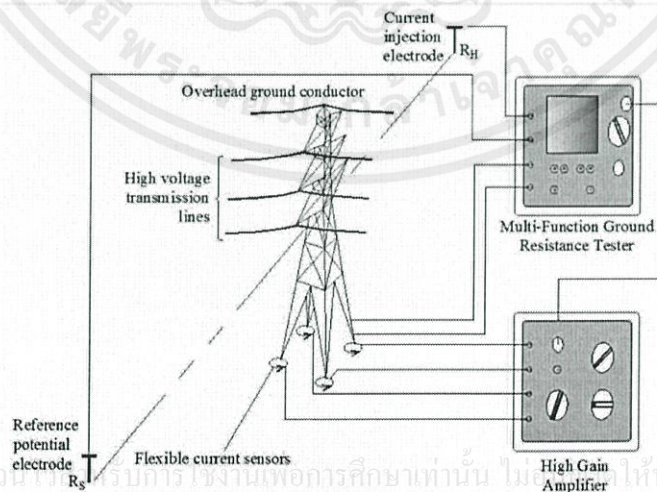
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การวัดค่าความต้านทานโดยวิธีการตกของศักย์/แคลมป์ออน (FOP/Clamp-on method)

ค่าความต้านทานของแท่งหลักดินที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับแท่งหลักดินอื่น (stand-alone) สามารถทำการวัดได้โดยการทำงานร่วมกันของวิธีการตกของศักย์ (fall-of-potential method, FOP) และวิธีการแคลมป์ออน (clamp-on method) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.8 โพลบกระแสและโพลบแรงดันนั้น ถูกติดตั้งให้อยู่ในแนวทางเดียวกับวิธีการตกของศักย์ (FOP method) ในการส่งผ่านกระแสเข้าสู่ระบบกราวด์ หม้อแปลงกระแสแบบแคลมป์ออน (clamp-on CT) จะทำการวัดสัดส่วนของกระแสที่ต้องการวัด ซึ่งไหลภายในระบบกราวด์ อัตราส่วนของค่าแรงดันที่ได้จากการวัดค่าเพื่อใช้ในการวัดค่ากระแสกราวด์ หลังจากนั้นทำการคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งหลักดินที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับแท่งหลักดินอื่น (stand-alone) ของระบบกราวด์

วิธีการตกของศักย์/แคลมป์ออน (FOP/Clamp-on method) โดยมากจะใช้เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานของแท่งหลักดินหลายแท่ง (multi-legged) หรือโครงสร้างสายส่ง ที่ไม่มีระบบแท่งหลักดิน โดยเฉพาะ สำหรับการวัดค่ากระแสที่ไหลในกราวด์จะนำเอาหม้อแปลงกระแสที่สามารถแยกแกนได้ขนาดใหญ่ (large split-core CT) มาใช้งาน ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.8 ในกรณีของเสาส่งที่มี 4 ขา ค่าความต้านทานของแต่ละขาจะถูกวัดแยกกันก่อนที่จะทำการรวมมันเข้าด้วยกันเพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานของโครงสร้างทั้งหมด เมื่อไม่นานมานี้ อุปกรณ์ได้ถูกพัฒนาให้สามารถทำการวัดค่าความต้านทานของทั้ง 4 ขาพร้อมกันได้

จากวิธีการแคลมป์ออน (clamp-on method) สัญญาณรบกวนความถี่สูงในระบบสามารถส่งผลกระทบต่อในการอ่านค่าได้ ค่าอัตราส่วนการรบกวนถึงสัญญาณ (noise-to-signal) ที่สูงสามารถเกิดขึ้นในขณะที่ทำการวัดค่าความต้านทานดินที่มีค่าสูง



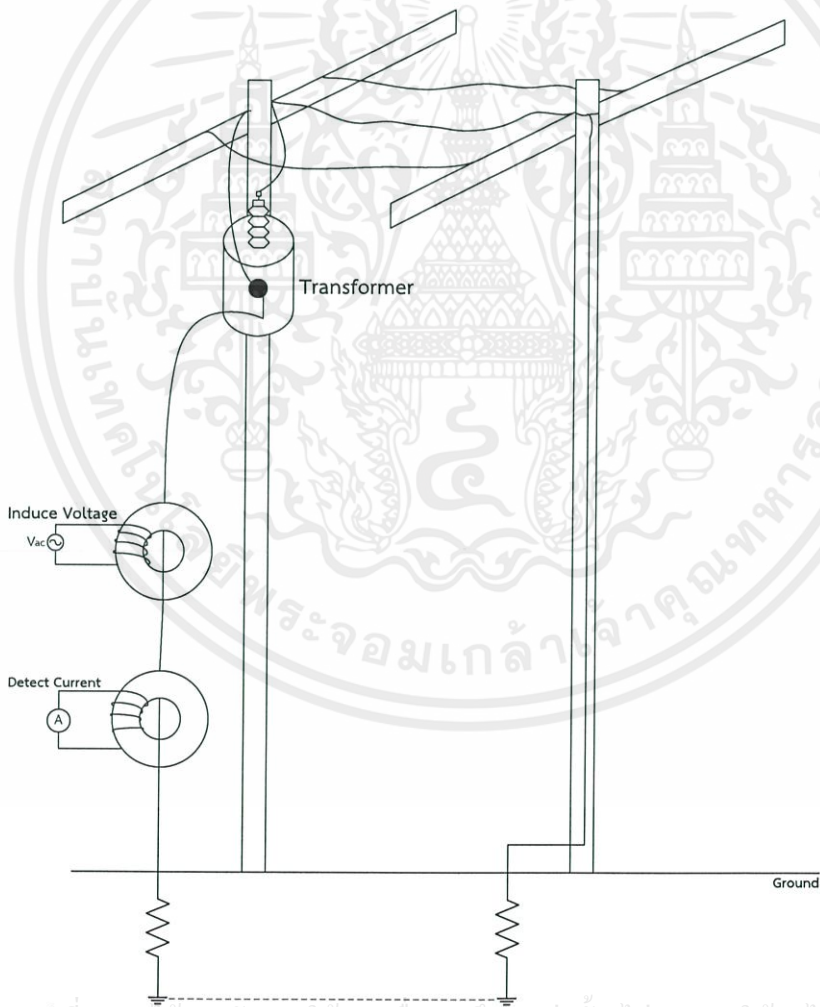
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ารูปที่ 2.8 ระบบการวัดค่าความต้านทานดินของเสาส่งโดยใช้วิธีการ FOP และการวัดค่ากระแสรั่วไหล

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องมือวัด

หลักการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์โดยวิธีการแคลมป์ดังรูปที่ 3.1 เป็นการวัดค่าที่สายกราวด์ของหม้อแปลงบนเสาไฟฟ้า โดยเริ่มจากการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าเข้าไปโดยแกนแม่เหล็กที่นำมาแคลมป์ จากนั้นจึงวัดกระแสจากทฤษฎีหม้อแปลงกระแสโดยการแคลมป์เช่นเดียวกัน ซึ่งจะสามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อมีการครบรูปของวงจรโดยการเชื่อมถึงกันทางดินของสายกราวด์ระหว่างของต้นเสาไฟ จึงสามารถทำการหาค่าอิมพีแดนซ์ของได้จากกฎของโอห์ม จากแนวคิดนี้จึงได้นำไปออกแบบต้นแบบต่อไป



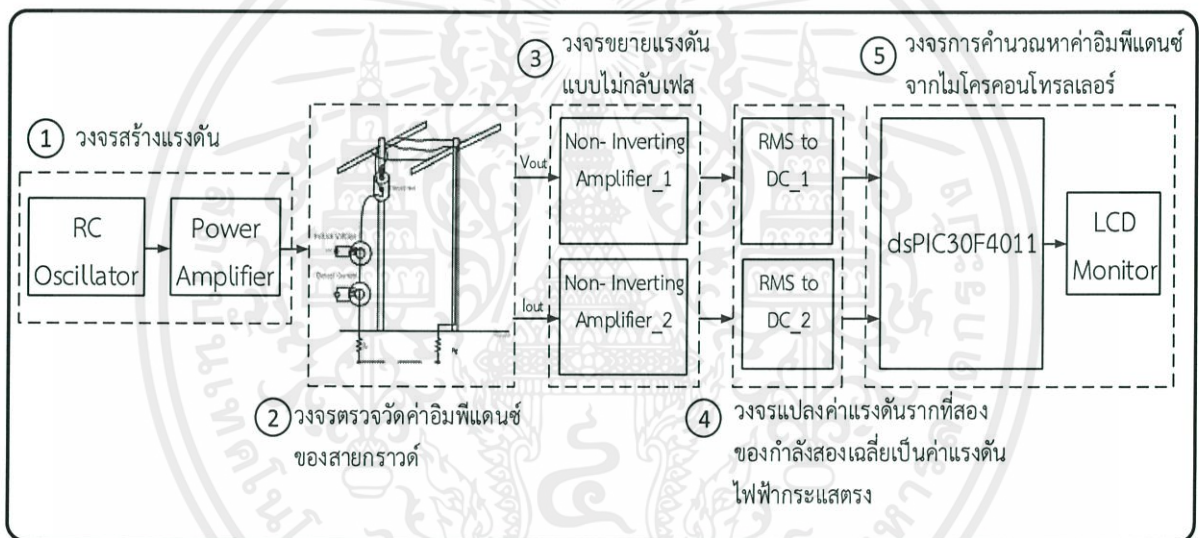
รูปที่ 3.1 หลักการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์โดยใช้วิธีการแคลมป์ (Clamp)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อใช้ในการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์ มีองค์ประกอบอยู่ 5 อย่างดังรูปที่ 3.2 ซึ่งได้แก่

1. วงจรสร้างแรงดัน (วงจร RC Oscillator และวงจร Power Amplifier)
2. วงจรตรวจวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์
3. วงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)
4. วงจรแปลงค่าแรงดันรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (RMS to DC Converter)
5. วงจรการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จากไมโครคอนโทรลเลอร์

3.1 ภาพรวมของลำดับการทำงานในวงจรเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์



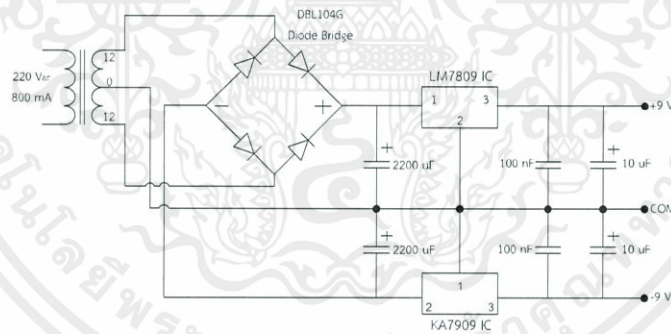
รูปที่ 3.2 ภาพรวมของลำดับการทำงานในวงจรเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์

3.1.1 ภาพรวมของโครงงาน

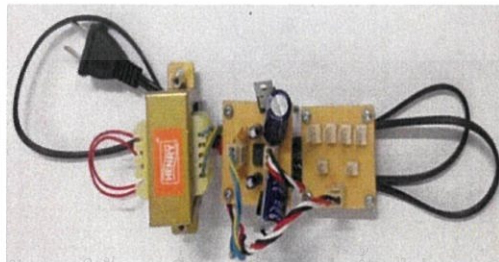
จากรูปที่ 3.2 สามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานได้ว่า กระบวนการทำงานของเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของดินแบบแคลมป์ออน (Clamp-on Ground Impedance meter) มีขั้นตอนเริ่มต้นจากวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (RC Oscillator) ในการสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (sine wave) ที่มีความถี่ขนาด 2 กิโลเฮิร์ตซ์ จากนั้นนำสัญญาณดังกล่าวไปเข้าวงจรขยายกำลัง (Power Amplifier) เพื่อขยายกำลังให้เพียงพอต่อการขับเคลื่อนแม่เหล็กซึ่งค่ากำลังในการขับเคลื่อนควรมีค่าอย่างน้อย 1 วัตต์ และมีขนาดแอมป์ลิจูดของแรงดันเท่ากับ 2 โวลต์ เมื่อสัญญาณผ่านการขยายกำลังจากวงจรขยายกำลัง (Power

Amplifier) แล้วจึงถูกส่งไปยังแกนแม่เหล็กเพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในฝั่งลูปดิน หลังจากเหนี่ยวนำแรงดันเข้าไปในลูปดินแล้ว ค่าแรงดันดังกล่าวทำให้เกิดกระแสไหลภายในลูปดิน จากนั้นทำการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสขาออกที่ออกจากแกนแม่เหล็ก แต่เนื่องจากค่าสัญญาณแรงดันและกระแสดังกล่าวมีค่าน้อยมากจึงต้องนำไปผ่านวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) เพื่อทำการขยายขนาดของสัญญาณให้ได้ค่าที่เพียงพอต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ในการนำไปประมวลผลและคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ หลังจากผ่านวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส โดยนำสัญญาณที่ได้ไปผ่านวงจรการแปลงค่าจากแรงดันไฟฟ้ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (RMS) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (RMS to DC Converter) เพื่อแปลงค่าให้เป็นระบบกระแสตรงเพื่อความง่ายต่อการนำไปประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อได้ค่าแรงดันและกระแสแล้ว นำค่าทั้งสองมาหารกันจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์ แล้วแสดงผลที่ได้บนหน้าจอแอลซีดี (LCD Monitor) แต่ในทางปฏิบัติค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้นั้นยังมีความผิดพลาดอยู่ เมื่อต้องการตรวจสอบความถูกต้องของต้นแบบเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นมา สามารถทำได้โดยการนำค่าที่ได้มาสอบเทียบกับเครื่องมือวัดยี่ห้อต่างๆ เช่น SANWA FLUKE YOGOKAWA เพื่อหาค่าความผิดพลาด (error) และนำไปปรับแก้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป

3.2 วงจรไฟเลี้ยง

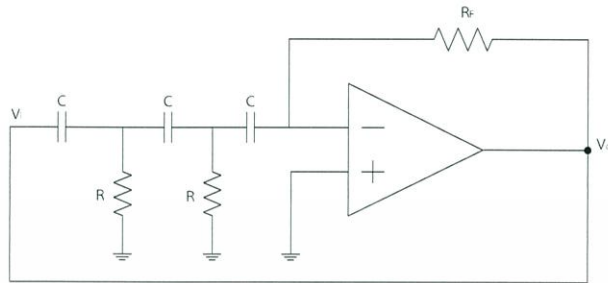


รูปที่ 3.3 วงจรไฟเลี้ยง

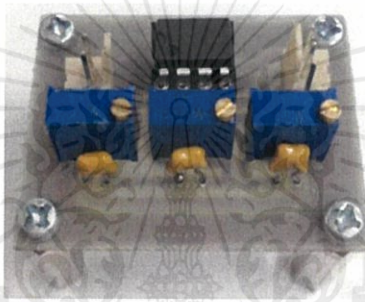


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.4 ต้นแบบของวงจรไฟเลี้ยง

วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้น (Linear Oscillator) ซึ่งขาออกที่ได้ในวงจรนี้จะได้กราฟที่มีลักษณะในรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ตามที่ตามต้องการ



รูปที่ 3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (RC Oscillator)



รูปที่ 3.6 ต้นแบบของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์

ซึ่งความถี่ที่นำไปใช้งานสามารถพิจารณาได้จากสมการ [1]

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{3}RC} \tag{3.1}$$

โดยที่ออกแบบให้ $R_F > 12R$

ตัวอย่าง ต้องการความถี่ที่ใช้งานในวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้ใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่า 0.1 ไมโครฟารัด จงคำนวณหาค่าความต้านทานทั้งหมด

จากสมการ
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{3}RC}$$

แทนค่า $C = 0.1\mu F$

จะได้ว่า
$$2 \times 10^3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{3}R(0.1 \times 10^{-6})}$$

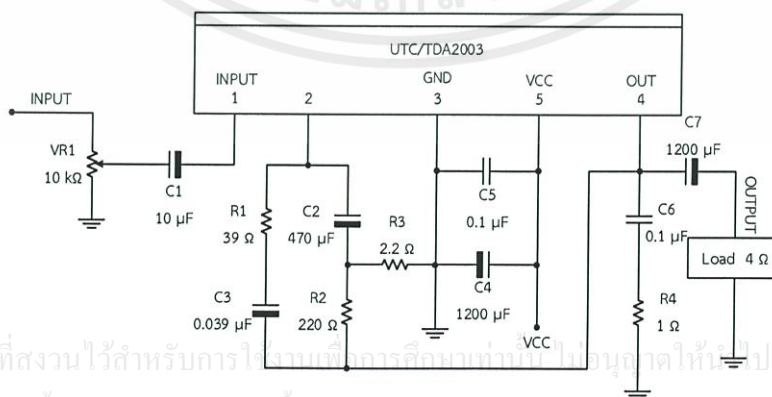
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เลือกใช้ $R = 459.6873\Omega$
 $R \approx 460\Omega$

จากเงื่อนไขที่นำออกแบบ	$R_F > 12R$
จะได้ว่า	$R_F = 12(460) = 5.52k\Omega$
เลือกใช้	$R_F \approx 6k\Omega$

วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์นี้ถูกนำไปใช้ในส่วนของวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนแม่เหล็กสำหรับโครงการงานนี้ โดยนำสัญญาณแรงดันขาออกที่ได้ความถี่ตามที่ต้องการของวงจรนี้ไปป้อนเข้าให้กับขาเข้าของวงจรขยายกำลังไฟฟ้า (Power Amplifier) ต่อไป

3.3.2 วงจรขยายกำลังของสัญญาณ (Power Amplifier)

หลังจากที่ได้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sine wave), แรงดัน 2 โวลต์, ความถี่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ จากวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (RC Oscillator) แล้วเมื่อทดลองจ่ายสัญญาณดังกล่าวเข้าแกนแม่เหล็กพบว่าสัญญาณขาออกจากแกนแม่เหล็กของทั้งแรงดันและกระแสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์และมีค่าที่ผิดเพี้ยนมาก ทั้งนี้เนื่องจากกำลังที่จ่ายโดยวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (RC Oscillator) นั้นไม่เพียงพอในการขับแกนแม่เหล็ก และถ้าเปรียบเทียบกับกรทดลองเมื่อจ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sine wave), แรงดันขนาด 2 โวลต์, ความถี่ขนาด 2 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยเครื่องให้กำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน (Function Generator) พบว่าสามารถขับแกนแม่เหล็กได้ แล้วทดลองใช้โพรบกระแส (Current Probe) วัดกระแสขาออกจากเครื่องให้กำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน (Function Generator) พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 200 มิลลิแอมแปร์ จึงได้ข้อสรุปว่าในการขับแกนแม่เหล็กนั้นต้องใช้กำลังไฟฟ้า (Power) จากสมการ $P = IV$ ที่มีขนาดอย่างน้อยเท่ากับ $2 \times 0.2 = 0.4$ วัตต์ แต่เพื่อต้องการนำสัญญาณไปขับแกนได้อย่างแน่นอน จึงต้องใช้วงจรขยายกำลังไฟฟ้า (Power Amplifier) ที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าสูงกว่า 0.4 วัตต์ ซึ่งมีลักษณะของการต่อวงจรขยายกำลังไฟฟ้า (Power Amplifier) แสดงดังรูปที่ 3.7 และวงจรใช้งานจริงมีลักษณะดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 วงจรขยายกำลัง (Power Amplifier, UTC/TDA2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ต้นแบบของวงจรขยายกำลัง

วงจรที่นำมาใช้นี้เป็นวงจรขยายกำลังอย่างง่ายที่ใช้กันทั่วไปในงานขยายเสียงในรถยนต์และมอเตอร์ไซค์ ที่ใช้ไอซี UTC/TDA2003 โดยมีพิภักการขยายกำลังไฟฟ้าสูงถึง 10 วัตต์ และใช้ไฟเลี้ยง 9-12 โวลต์ ที่โหลดขนาด 4 โอห์ม ซึ่งเป็นแบบ class D

ไอซี UTC/TDA2003 ได้รับการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่ดีกว่า UTC/TDA2002 อีกทั้งยังสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดถึง 3.5 แอมแปร์ มีค่าฮาร์โมนิก (Harmonics) และครอสโอเวอร์ดิสทอร์ชัน (Crossover Distortion) ต่ำ ซึ่งไอซี UTC/TDA2003 มีการป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการลัดวงจร เมื่อโหลดเกิน ทนแรงดันสูงสุดได้ 28 โวลต์ มีการตอบสนองความถี่ที่ 40 เฮิรตซ์-15 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งในรายละเอียดเพิ่มเติมของตัวไอซีสามารถศึกษาได้จากคู่มือไอซี (Datasheet) โดยตรง

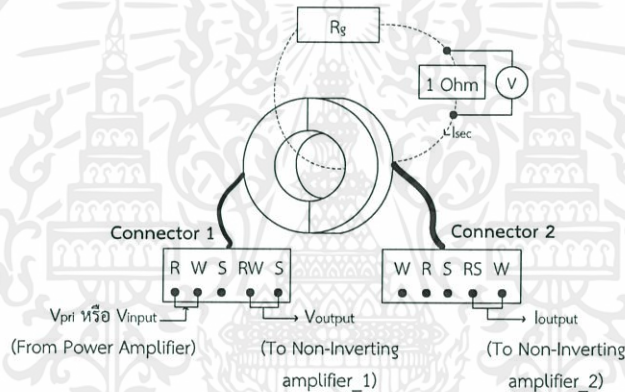
จากรูปที่ 3.7 สามารถอธิบายการทำงานของวงจรมัน โดยเมื่อจ่ายไฟเลี้ยง 9-12 โวลต์ และคัปปลิ่ง (Coupling) สัญญาณเข้ามา ผ่าน VR1 ซึ่งเป็นตัวต้านแบบปรับค่าได้ เพื่อปรับระดับการขยายกำลังไฟฟ้าตามต้องการ แล้วส่งไปยัง C1 ป้องกันไฟฟ้ากระแสตรงไปรบกวนสัญญาณขาเข้าที่ขา 1 ของไอซี จัดเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) ซึ่งมีสัญญาณขาออกทางขา 4 โดยมี C7 เพิ่มเสถียรภาพการตอบสนองความถี่ต่ำให้ดีขึ้น และสัญญาณรบกวนจะถูกตัดทิ้งให้ลงกราวด์ด้วย R4 และ C6 ก่อนออกไปยังลำโพง สัญญาณขาออกอีกส่วนหนึ่งจะถูกป้อนกลับผ่าน C3 และ R1 ไปเข้ายังขา 2 อินเวอร์ตติ้ง เพื่อรักษาการตอบสนองความถี่ให้คงที่ ส่วน C4 เป็นตัวฟิลเตอร์กรองไฟให้เรียบและ C5 ทำหน้าที่ตัดสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วงจรตรวจวัดความต้านทานของสายกราวด์

3.4.1 คุณสมบัติของแกนแม่เหล็กที่ใช้ในโรงงาน

แกนแม่เหล็กที่ใช้ในการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า จะเป็นแกนแม่เหล็กชนิดพันเป็นแถบ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทคัมเวลล์ (Kumwell) โดยมีแกนแม่เหล็กอยู่ 2 แกน เพื่อไว้สำหรับการสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายกราวด์ได้จากตัวเชื่อมต่อ (Connector) ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะนำเอาสัญญาณของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าขาออก เข้าไปในวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสในส่วนต่อไป โดยตัวเชื่อมต่อ (Connector) ที่ใช้งานนั้นจะมีรายละเอียดของขาต่างๆดังรูปที่ 3.9 โดยในการใช้งานจะนำแกนแม่เหล็กมาคล้องกับสายกราวด์ในฝั่งทุติยภูมิ (secondary) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.10 นอกจากนี้แกนแม่เหล็กที่ออกแบบนั้นจะมีการป้องกัน (shield) การรบกวนของสนามแม่เหล็กระหว่างแกนแม่เหล็ก 2 แกน ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมการทำงานของแกนแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.9 สามารถอธิบายการใช้งานของตัวเชื่อมต่อ (connector) จากแกนแม่เหล็กทั้ง 2 ตัว ซึ่งในแต่ละขาของตัวเชื่อมต่อจะมีหน้าที่แตกต่างกันดังนี้

- ขา R,W และ W,R ใช้สำหรับป้อนแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้าไปในแกนแม่เหล็ก
- ขา RW,S ใช้สำหรับวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกจากแกนแม่เหล็ก (จาก connector 1)
- ขา RS,W ใช้สำหรับวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกจากแกนแม่เหล็ก (จาก connector 2)

แกนแม่เหล็กที่ใช้งานจะมีโครงสร้างต่างๆ ดังรูปที่ 3.10 และมีรูปชิ้นงานจริงดังรูปที่ 3.11 โดยแกนแม่เหล็กมีขนาด และคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1

$$r_c = 3cm$$

$$D = 8.5cm$$

$$a = 2.5cm$$

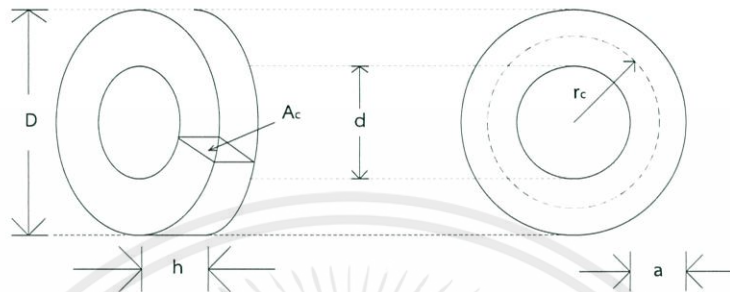
$$h = 3cm$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

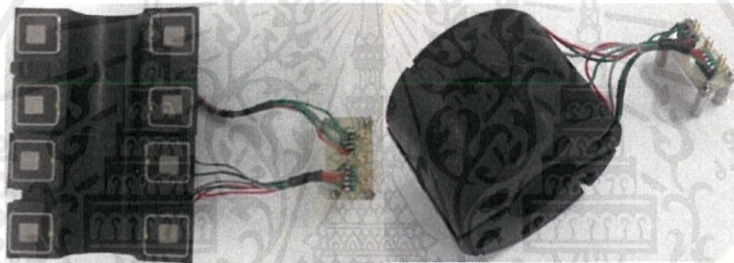
$$d = 3.5\text{cm}$$

$$A_c = a \times h = 2.5\text{cm} \times 3\text{cm} = 7.5\text{cm}^2$$

$$l_c = 2\pi r_c = 2\pi(3) = 18.84\text{cm}$$



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของแกนแม่เหล็ก



รูปที่ 3.11 ต้นแบบของแกนแม่เหล็ก

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแกนแม่เหล็กโดยออกแบบการใช้งานที่ความถี่ 2 กิโลเฮิรตซ์

ขาของแกน แม่เหล็ก	ค่าพารามิเตอร์				
	$R(\Omega)$	$L(mH)$	$C(\mu F)$	$Z(\Omega)$	$Phase(deg)$
R,W	11.0905	1.0112	-6.2622	17.0803	48.8486
W,R	12.2011	1.0123	-6.2654	17.5394	45.9211
RW,S	5.1510	0.0047	-4.1490	5.1356	0.7080
RS,W	1.9951	265.3770	-0.0239	3,886.0	59.0925
S,S	4.5200	0.0013	-5420	4.5400	0.2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกจากแกนแม่เหล็ก

ในส่วนของวงจรการวัดความต้านทานนั้น ในขั้นตอนแรกจะทำการป้อนแรงดันเข้าไปในแกนแม่เหล็กทางฝั่งปฐมภูมิเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในสายกราวด์ แล้วสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิ ซึ่งจะช่วยให้ทราบค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดที่สร้างแรงดันไฟฟ้าจากความสัมพันธ์

$$a = \frac{N_{pri}}{N_{out}} = \frac{V_{pri}}{V_{out}} \quad (3.2)$$

โดยที่ a คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดที่สร้างแรงดันไฟฟ้า (turn ratio)

ซึ่งสายกราวด์ที่ถูกคล้องไว้ด้วยแกนแม่เหล็กดังรูปที่ 3.9 มีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่จากการสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางฝั่งปฐมภูมิแล้ว ทำให้ทราบค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้า โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{N_{sec}}{N_{out}} = \frac{I_{out}}{I_{sec}} \quad (3.3)$$

โดยที่ I_{sec} สามารถหาค่าได้จากกรวัดแรงดันไฟฟ้าตกร่อมตัวต้านทานขนาด 1 โอห์มในฝั่งทุติยภูมิดังรูปที่ 3.9

3.5 วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส (Non Inverting amplifier)

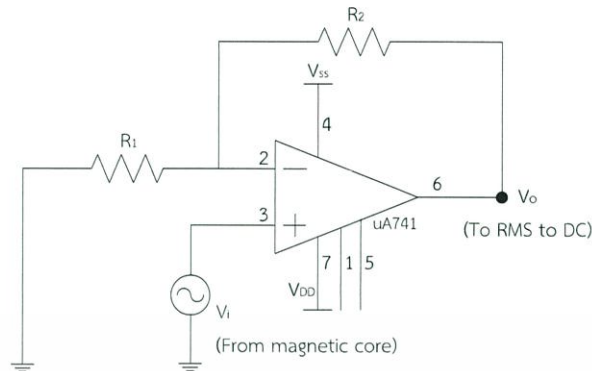
สำหรับวงจรนี้ถูกออกแบบมาเพื่อขยายสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าขาออกจากแกนแม่เหล็ก ก่อนนำเข้าไปประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ (dsPIC30F4011) โดยใช้ไอซีออปแอมป์ชนิด uA741 สำหรับวงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับเฟส โดยมีหลักการขยายสัญญาณของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.4)$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3.5)$$

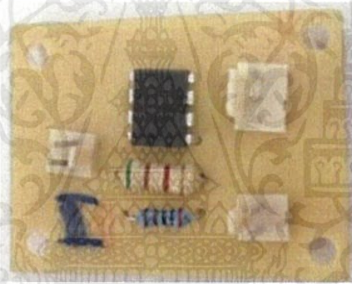
โดยที่ A_v คือ อัตราการขยายแรงดัน (Voltage gain)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non Inverting Amplifier)

จากรูปที่ 3.12 พบว่า V_{DD} เป็นขาไฟเลี้ยงบวก และ V_{SS} เป็นไฟเลี้ยงลบ และวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) จากขาที่ 6 เทียบกับกราวด์ตามคู่มือของไอซีออปแอมป์ชนิด uA741 ซึ่งในวงจรนี้จะมีค่าอัตราขยายแรงดันที่มีค่ามากกว่า 1 โดยได้มีการออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ต้นแบบของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส

ตัวอย่าง ในการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกจากแกนแม่เหล็กเพื่อป้อนเข้าวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส ซึ่งมีค่า 700 มิลลิโวลต์ ต้องการหาค่าอัตราขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Voltage gain) และคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกจากวงจรนี้ โดยกำหนดให้ใช้ค่าความต้านทานดังนี้ $R_1 = 1k\Omega$ และ $R_2 = 5k\Omega$

จากสมการ
$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

แทนค่า $R_1 = 1k\Omega$ และ $R_2 = 5k\Omega$

จะได้ว่า
$$A_v = 1 + \left(\frac{5 \times 10^3}{1 \times 10^3} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_v = 6$$

จากสมการ
$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

แทนค่า $V_{in} = 700mV$ และ $A_v = 6$

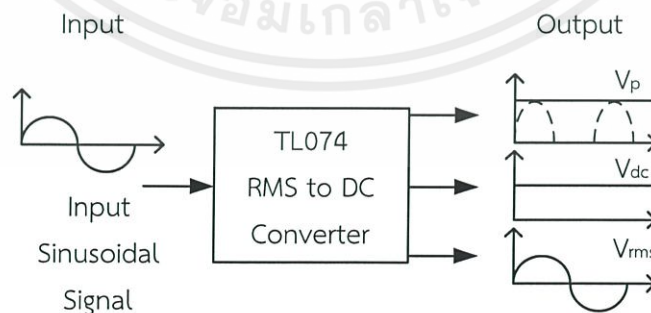
จะได้ว่า
$$6 = \frac{V_{out}}{700 \times 10^{-3}}$$

$$V_{out} = 4.2V$$

เลือกใช้อัตราการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเป็น 6 เท่า (จากค่าแรงดันไฟฟ้า 700 มิลลิโวลต์ เป็น 4.2 โวลต์) ก่อนที่จะนำไปเข้าวงจรแปลงค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (RMS to DC Converter) ในส่วนต่อไป

3.6 วงจรแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (RMS to DC Converter)

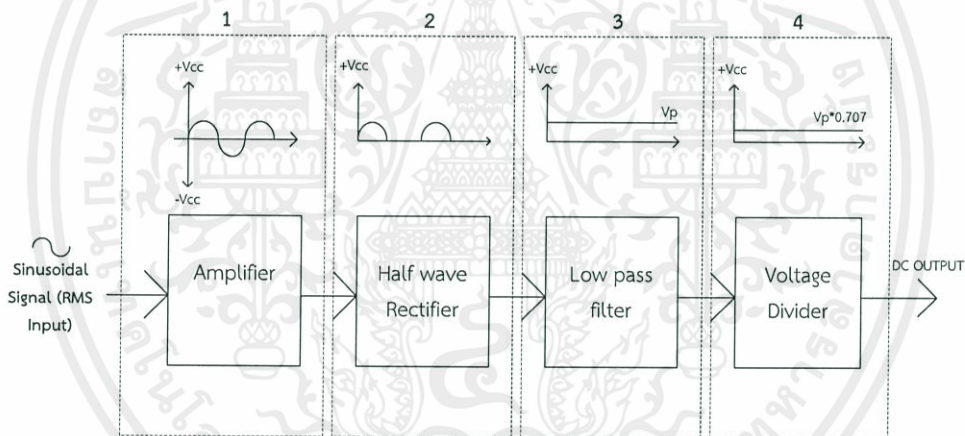
ในการออกแบบวงจรนี้ต้องการรับสัญญาณขาเข้า (RMS Signal) ได้หลายขนาดเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ตั้งแต่ในระดับมิลลิโวลต์ กรณีที่สัญญาณขาเข้ามีขนาดแอมพลิจูดต่ำหรือสูง สามารถปรับลดให้เหมาะสมด้วยวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) โดยการใช้ตัวต้านทานค่าคงที่หรือตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ส่วนสัญญาณขาออกจากวงจรนี้สามารถเลือกสัญญาณเพื่อนำไปใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น สัญญาณขาเข้าที่ถูกขยาย (RMS signal amplifier) , ตำแหน่งสัญญาณสูงสุดของรูปคลื่นที่เข้ามา (V_p) หรือสัญญาณแรงดันดีซี (DC output) ในสัดส่วนกับขาเข้าที่ต้องการ เพื่อให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานต่างๆ โดยวงจรนี้ต้องการแหล่งจ่ายไฟแบบเดี่ยว (ช่วง 9–15 V_{DC}) เพื่อง่ายต่อการสร้างแหล่งจ่าย ซึ่งมีลักษณะแนวคิดของวงจรนี้ดังรูปที่ 3.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษา รูปที่ 3.14 แนวคิดของวงจร ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 บล็อกไดอะแกรมของการทำงาน

ลักษณะของการทำงานของบล็อกไดอะแกรมของวงจรนี้ดังรูปที่ 3.15 เริ่มจากด้านซ้ายมือ สัญญาณที่สามารถป้อนให้กับวงจรนี้ได้ เช่น ฮอลล์เอฟเฟค , อุปกรณ์ตรวจจับกระแส และหม้อแปลงทั่วไป 6V , 9V หรือ 12 V เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ให้สัญญาณออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในรูปคลื่นไซน์ (Sine wave signal) เมื่อได้สัญญาณตามที่ต้องการแล้ว ก็จะถูกส่งผ่านไปยังวงจรคัปปลิง (Coupling) เพื่อให้ได้เฉพาะสัญญาณของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (RMS signal) อย่างเดียว แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปขยาย (Amplify) เพิ่มขึ้นได้ เพื่อให้ได้ขนาดสัญญาณขาออกที่เหมาะสม และสัญญาณที่ได้นี้จะนำไปเข้าวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (half wave rectifier) เมื่อได้สัญญาณที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ก็จะนำไปผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) โดยในขั้นตอนนี้จะได้สัญญาณ V_p นั้นเอง จากนั้นนำสัญญาณ V_p ที่ได้นี้ส่งผ่านไปยังวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) เพื่อทำหน้าที่ปรับสัดส่วนสัญญาณขาเข้า ให้สัมพันธ์กับแรงดันขาออกหรือเปรียบเสมือนวงจรคูณที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 สำหรับวงจรนี้

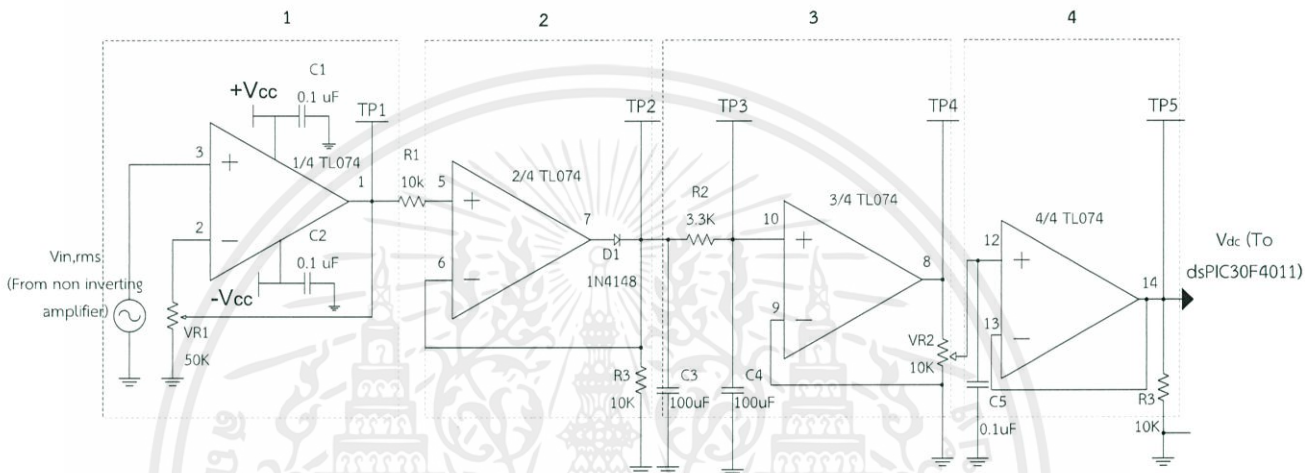


รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน

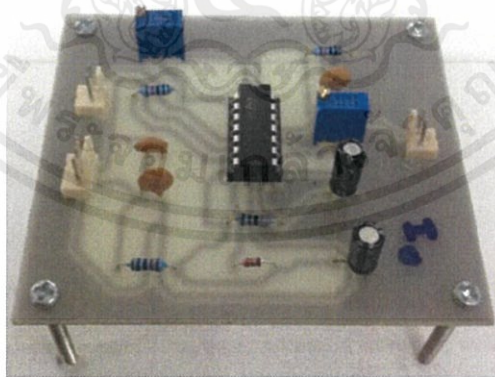
3.6.2 ขั้นตอนการทำงานของวงจร

จากวงจรในรูปที่ 3.16 เป็นการนำสัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงเครื่องวัดกระแส (Current Transformer : C.T) เข้ามาที่ไอซีออปแอมป์ชนิด TL074 ในขาที่ 3 โดยออปแอมป์ส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายสัญญาณด้วยการปรับอัตราขยายที่ VR1 เมื่อได้สัญญาณจากออปแอมป์ในส่วนที่ 1 แล้ว (1/4 TL074) จะส่งสัญญาณที่ได้นี้ผ่าน R1 เข้าไปยังออปแอมป์ส่วนที่ 2 (2/4 TL074) ที่ขา 5 ซึ่งออปแอมป์ส่วนนี้จะทำหน้าที่เรียงกระแสสัญญาณที่ป้อนเข้ามาในลักษณะครึ่งคลื่น (Half wave rectifier) และออกมาที่ตำแหน่ง TP2 จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ส่งไปยังวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ที่ตำแหน่ง C3 , R2 , C4 ในลักษณะวงจรกรองแบบพาย (Pi filter) และสัญญาณที่ได้จะถูก

ส่งไปยังออปแอมป์ส่วนที่ 3 (3/4 TL074) ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (Buffer Amplifier) สัญญาณที่ได้จากบัฟเฟอร์แอมป์นี้จะเป็นค่า V_p จากนั้นสัญญาณ V_p จะถูกนำมาป้อนกับ VR2 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) หรือแบ่งแรงดันให้เท่ากับ 0.707 เท่าของแรงดันที่ป้อนเข้ามา นั้นหมายความว่า จะได้ค่าแรงดันไฟตรง หรือจะได้ค่า $V_{DC} = 0.707 * V_p$ แล้วนำแรงดันที่ได้จากวงจรนี้ส่งไปยังบัฟเฟอร์อีกครั้งที่ (4/4 TL074) เพื่อให้มีปริมาณกระแสมากพอสำหรับนำไปเชื่อมต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลในส่วนต่อไป ซึ่งได้ออกแบบวงจรนี้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 วงจรการแปลงสัญญาณจากค่าแรงดันรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (RMS to DC Converter)



รูปที่ 3.17 ต้นแบบของวงจร RMS to DC Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

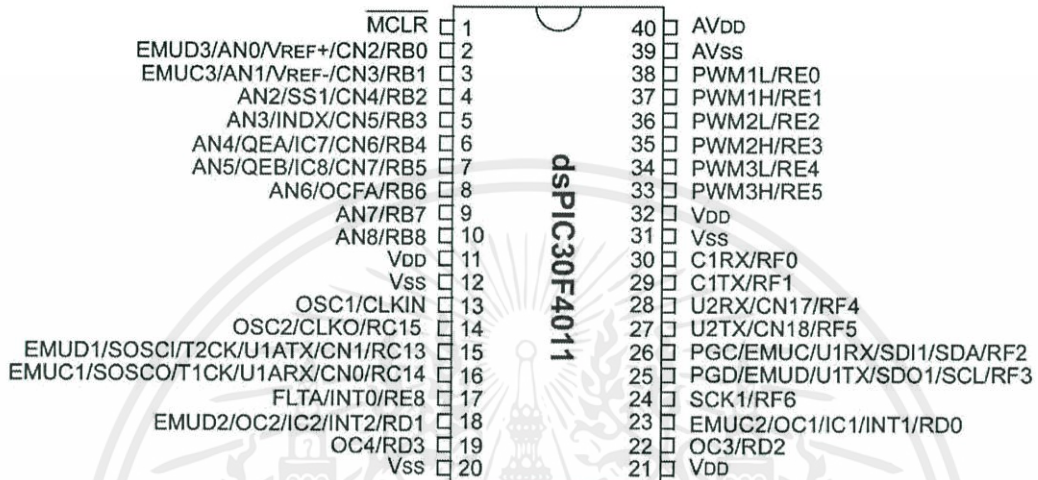
3.7 วงจรการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์จากไมโครคอนโทรลเลอร์

ส่วนของวงจรคำนวณค่าจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาทำหน้าที่ในการรับค่าสัญญาณอะนาล็อกที่ได้จากการวัด แล้วนำมาแปลงเป็นสัญญาณเป็นดิจิทัลเพื่อใช้ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์ โดยสัญญาณอะนาล็อกที่ทำการรับค่ามีด้วยกันสองสัญญาณคือ สัญญาณแรงดัน และกระแส ด้วยเหตุนี้จึงต้องพิจารณาเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถรับค่าสัญญาณอะนาล็อกทั้งสองสัญญาณได้พร้อมกันมาใช้งาน เพื่อให้การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ จึงได้เลือกไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น dsPIC30F4011 มาใช้งานเนื่องจากมีคุณสมบัติเพียงพอต่อการใช้งาน โดยมีข้อกำหนดการใช้งานทั้งหมด 40 ขาดังรูปที่ 3.19 และมีคุณสมบัติภายในดังนี้

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ตัวประมวลผลแบบ RISC
- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- มีแอดคิวิตีวูลเลเตอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว
- มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและหารเลข 17 บิต
- มีวงจรเพชซ์ข้อมูลคู่
- มีไทม์เมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 16 บิต 5 ตัวสามารถต่อใช้งานร่วมกันเป็นไทม์เมอร์ 32 บิต
- มี 84 คำสั่งภาษาแอสเซมบลีมาตรฐาน
- ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ขนาด 48 กิโลไบต์ x16 บิต
- มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ ROM ขนาด 2 กิโลไบต์ x16 บิต
- มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 1 กิโลไบต์ x16 บิต
- มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ 30 แหล่งอินเตอร์รัปต์
- มีวงจรถ่วงไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีเพาเวอร์-อนรีเซต เพาเวอร์อัป-ไทม์เมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ทอัป-ไทม์เมอร์
- มีวอตช์ด็อกไทม์เมอร์โปรแกรมได้
- มีวงจรถ่วงสอบการทำงานของวงจรถ้าเกิดสัญญาณนาฬิกา
- รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม
- สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้
- มีโมดูลตรวจจับและเปรียบเทียบสัญญาณดิจิทัล
- มีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีโมดูลแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลความละเอียด 10 บิต
- มีโมดูลสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม UART พร้อมบัฟเฟอร์แบบ FIFO
- มีโมดูลเชื่อมต่อเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมทั้งแบบ SPI และ I²C

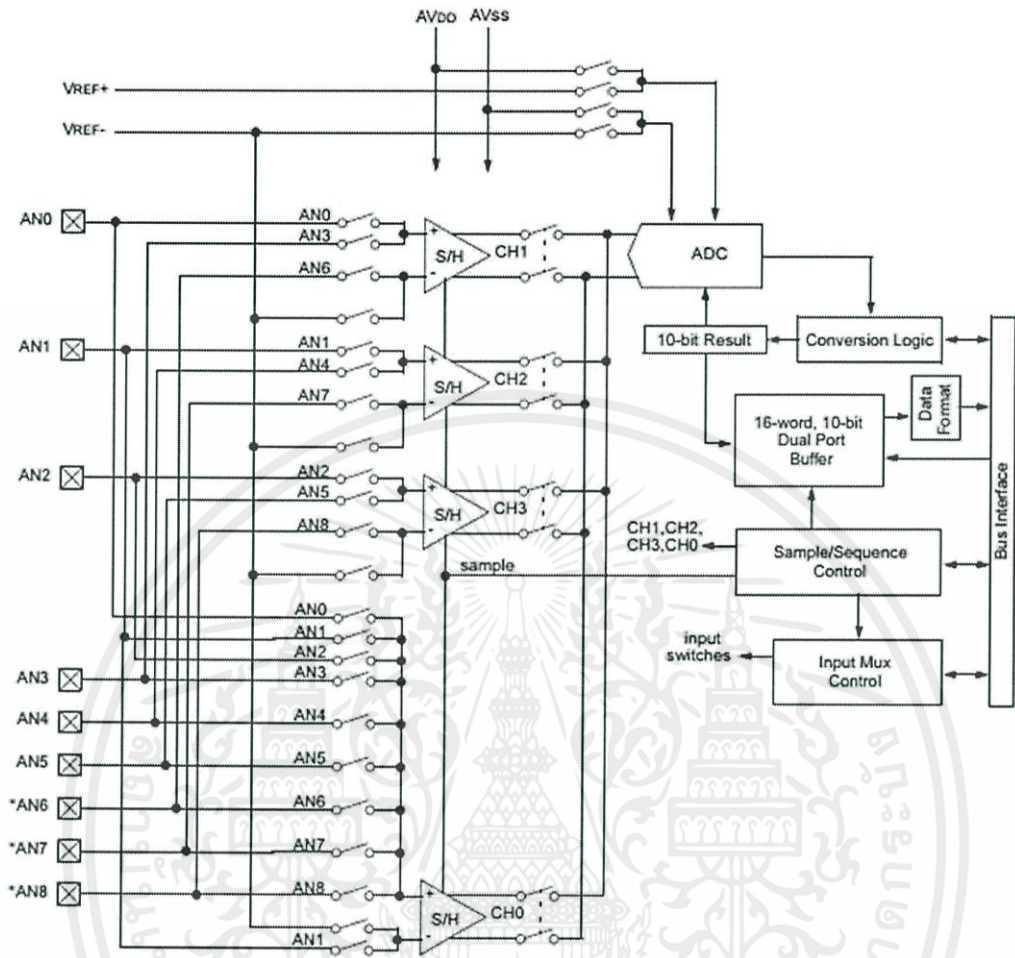


รูปที่ 3.18 การจัดขาใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

โดยโมดูลสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในโครงงานนี้คือ โมดูลการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล โดยมีรูปโตอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 3.19 และมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

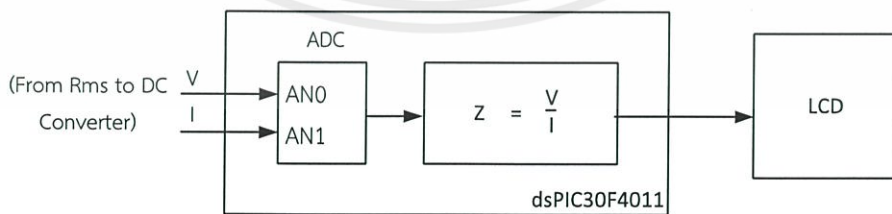
- มีวงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลที่มีความละเอียด 10 บิต 9 ช่อง
- ใช้วิธีการแปลงสัญญาณแบบประมาณค่า
- มีอัตราเร็วในการแปลงสัญญาณ 1 ล้านต่อวินาทีขึ้นไป
- มีอัตราเร็วในการสุ่มสัญญาณสูงสุด 5 แสนจุดต่อวินาที
- มีวงจรสุ่มสัญญาณและเก็บค่าสัญญาณ 4 ชุด และสามารถสุ่มสัญญาณได้พร้อมกันทั้ง 4 ชุด
- มีบัฟเฟอร์ขนาด 16 เวิร์ด นั่นคือสามารถรองรับข้อมูลที่ได้จากการแปลงสูงสุด 16 ชุดข้อมูล
- กำหนดแรงดันอ้างอิงได้ทั้งจากภายในและภายนอก
- กำหนดให้ทำงานได้ขณะเข้าสู่โหมดสลีป (sleep)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ไตอะแกรมการทำงานของโมดูลการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล

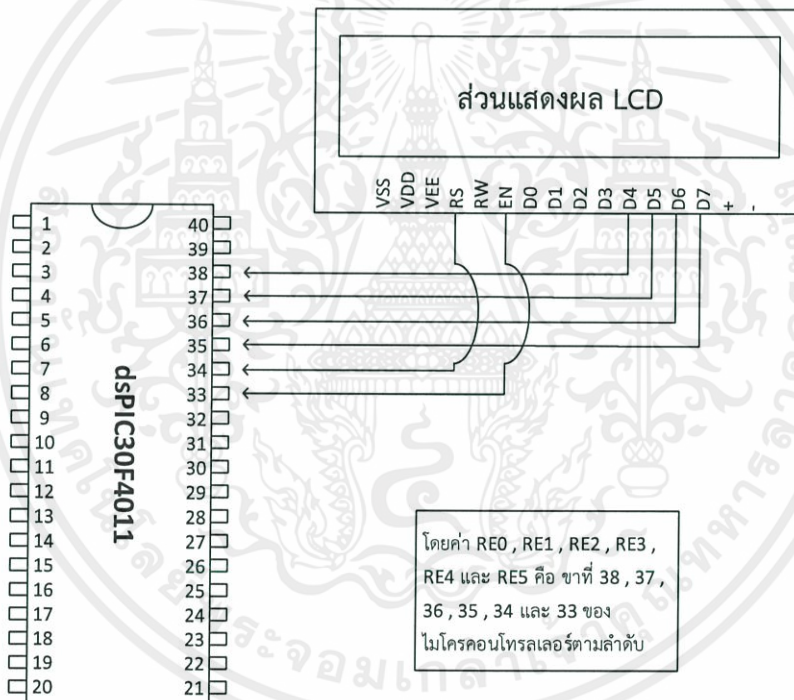
ลำดับต่อมาในการนำมาใช้งานจะทำการรับสัญญาณแรงดัน และกระแส เข้าที่พอร์ต B ซึ่งเป็นพอร์ตรับสัญญาณอะนาล็อก โดยต่อเข้าที่ขา RB0 และ RB1 ตามลำดับดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การเชื่อมต่อสัญญาณแรงดันและกระแสเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในขั้นตอนการใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอลมีส่วนสำคัญที่ต้องกำหนดการทำงาน คือ การกำหนดเวลาในการสุ่มสัญญาณ เวลาในการแปลงสัญญาณ และโหมดการทำงานของการแปลงสัญญาณ โดยต้องเลือกเวลาในการสุ่มสัญญาณ และแปลงสัญญาณให้เพียงพอต่อการวัดเพื่อให้ค่าที่ได้จากการวัดมีความถูกต้อง และการเลือกโหมดสัญญาณต้องสามารถสุ่มสัญญาณทั้งสองได้พร้อมกัน เพื่อให้ค่าที่วัดได้ตลอดเวลา (Real time)

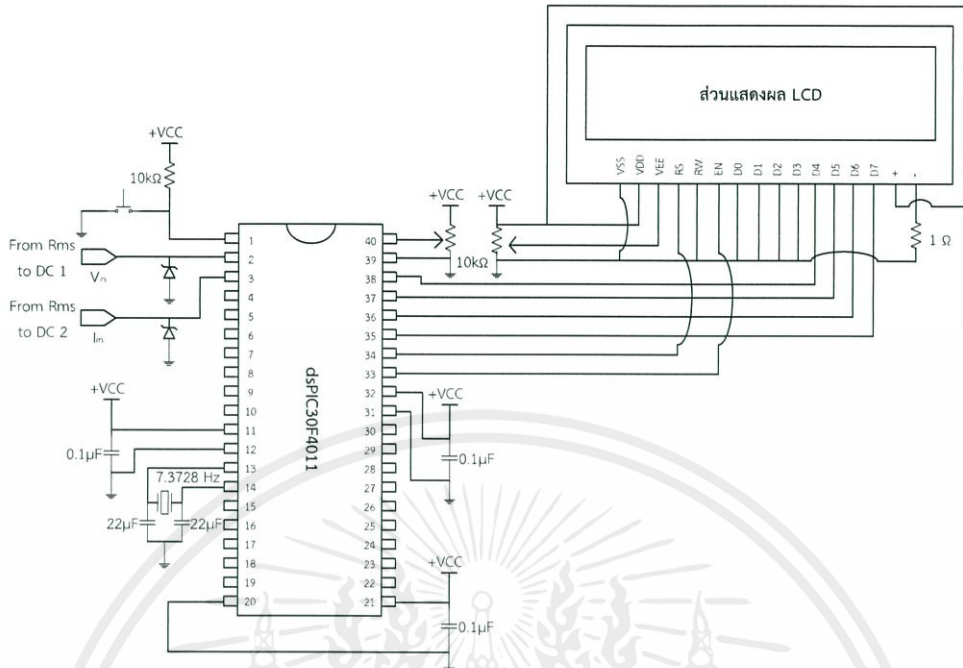
ส่วนของวงจรแสดงผลใช้หน้าจอ LCD 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด มาใช้ในการแสดงผลค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยในการติดต่อข้อมูลระหว่าง LCD และไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ใช้โหมด 4 บิตข้อมูลสำหรับการติดต่อ ซึ่งในการใช้งานนั้นต้องทำการเชื่อมต่อขาข้อมูล 4 บิตของ LCD ได้แก่ขา D4 D5 D6 D7 เข้ากับขา RE0 , RE1 , RE2 , RE3 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ และขา RS , EN ของ LCD เข้ากับ ขา RE4, RE5 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ตามลำดับ



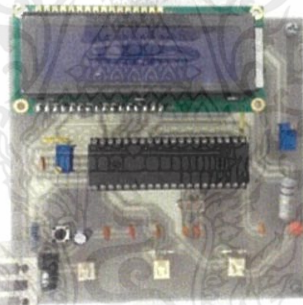
รูปที่ 3.21 การเชื่อมต่อหน้าจอ LCD เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์

โดยเมื่อนำทั้งสองส่วนมาประกอบเข้าด้วยกัน รวมถึงการเชื่อมต่อวงจรไฟเลี้ยงและสัญญาณนาฬิกาเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ และเชื่อมต่อไฟเลี้ยงของหน้าจอ LCD แล้วจะได้วงจรสมมูลของวงจรคำนวณค่าและแสดงผลดังรูปที่ 3.21 ซึ่งมีลักษณะของวงจรคำนวณค่าและแสดงผลดังรูปที่ 3.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 วงจรคำนวณค่า และแสดงผล



รูปที่ 3.23 ต้นแบบวงจรคำนวณค่า และแสดงผล

ส่วนของการเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ และแสดงผลนั้นมีหลักการคือ รับค่าสัญญาณแรงดัน และกระแสเข้าไปเก็บไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยโมดูลแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล โดยการเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดการทำงานของโมดูล จากนั้นเป็นการเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ได้จากสมการ

$$Z = \frac{V}{I} \tag{3.5}$$

ขั้นตอนนี้เป็นการเขียนโปรแกรมเพื่อแสดงผลค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณผ่านหน้าจอลiquid crystal display (LCD) โดยสามารถแสดงลำดับขั้นตอนการเขียนโปรแกรมด้วยแผนผัง (Flowchart) ดังนี้



รูปที่ 3.24 แผนผังลำดับขั้นตอนการเขียนโปรแกรม

โดยในการเขียนโปรแกรมได้กำหนดช่วงในการวัดเอาไว้โดยตั้งเงื่อนไขให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำกว่า 1 โอห์ม ให้แสดงค่าเป็น “Low Impedance” ที่กำหนดเช่นนี้เพราะไม่มีความจำเป็นที่ต้องวัดค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกว่า 1 โอห์ม เนื่องจากมีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ให้มีค่าความต้านทานไม่เกิน 5 โอห์ม ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงกว่า 5 โอห์ม ให้แสดงค่าเป็น “High Impedance” กำหนดเช่นนี้เพราะไม่มีความจำเป็นที่ต้องวัดค่าอิมพีแดนซ์สูงเนื่องจากเป็นค่าที่เกินมาตรฐานจึงต้องทำการปรับแก้ ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ที่อยู่ในช่วง 1 ถึง 5 โอห์ม ให้แสดงค่าอิมพีแดนซ์ออกมาเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยของระบบกราวด์

บทที่ 4

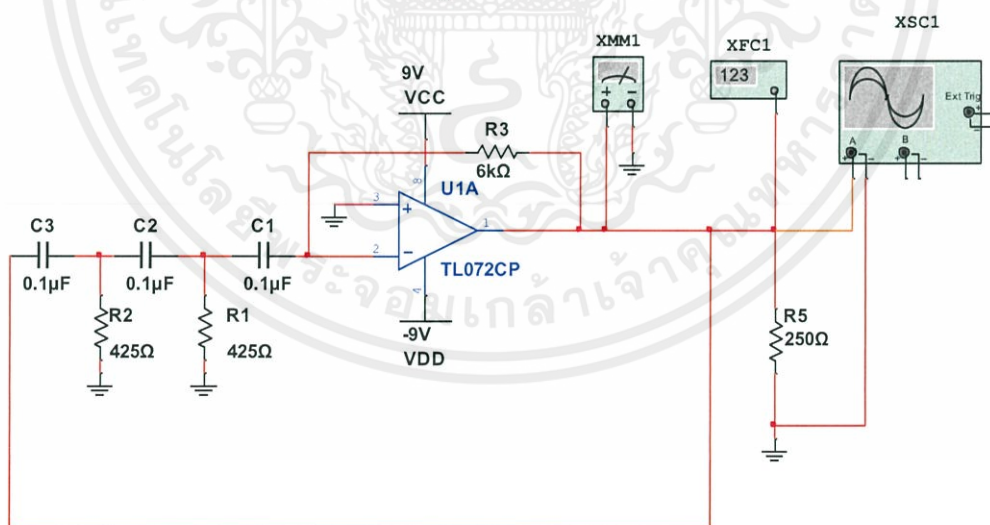
การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (RC Oscillator)

เป็นการทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งต้องการสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยมีวงจรดังรูปที่ 4.1 และมีอุปกรณ์การทดลองต่าง ๆ ดังนี้

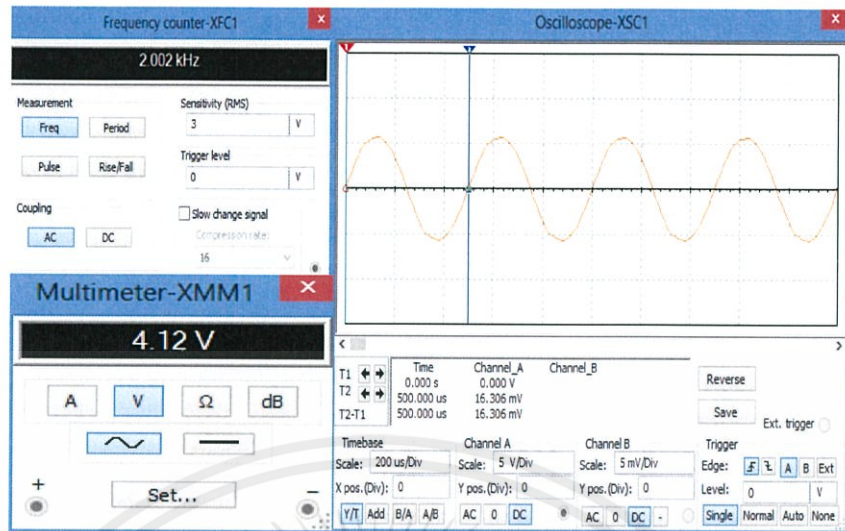
ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 1 Ω	2 ตัว
ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 10 k Ω	1 ตัว
ตัวเก็บประจุขนาด 0.1 μ F	3 ตัว
ออปแอมป์ชนิด TL072	1 ตัว
แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรง (DC Dual Supply)	1 เครื่อง
ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)	1 เครื่อง

สำหรับวงจรนี้ออกแบบใช้งานที่ความถี่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ (ค่า R และ C) ในวงจรดังรูปที่ 4.1

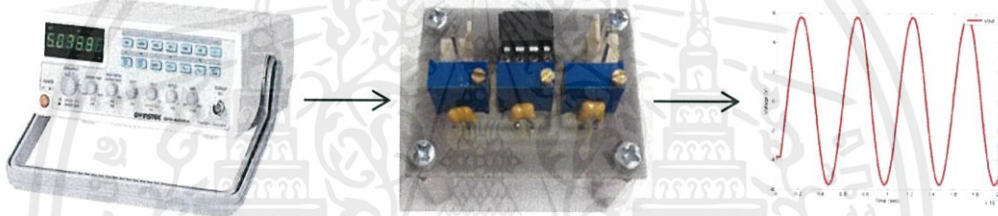


รูปที่ 4.1 การทดลองวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0



รูปที่ 4.3 ผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ได้จากการปฏิบัติจริง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างโปรแกรม NI Multisim 13.0 และจากการปฏิบัติจริงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าวงจรนี้สามารถสร้างแรงดันในลักษณะรูปคลื่นไซน์ได้ตามความถี่ที่ได้ออกแบบไว้ที่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งทำได้จากการปรับค่าตัวต้านทานและใช้ตัวเก็บประจุตามค่าที่กำหนดให้

4.2 การทดลองหาอัตราส่วนจำนวนรอบของวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้า

สำหรับการทดลองนี้ใช้แรงดันรูปคลื่นไซน์ความถี่ขนาด 2 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อหาอัตราส่วนของจำนวนรอบจากวงจรสร้างแรงดันระหว่างฝั่งปฐมภูมิและฝั่งขาออกจากแกนแม่เหล็กดังรูปที่ 4.4 ซึ่งมีอุปกรณ์การทดลองดังนี้

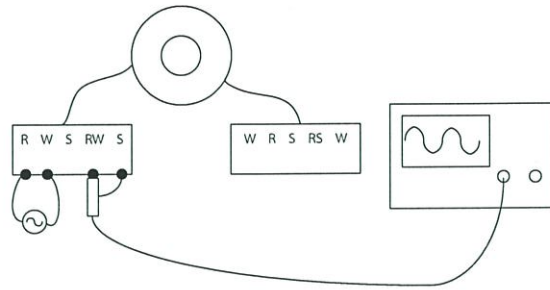
เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator)

แกนแม่เหล็กจากบริษัทคัมเวลล์ (Kumwell)

สายปากคิ๊ป 1 เส้น

ออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรการทดลองหาอัตราส่วนรอบของวงจรสร้างแรงดัน

4.2.1 ผลการทดลองสำหรับการหาอัตราส่วนจำนวนรอบของวงจรสร้างแรงดัน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองสำหรับการหาอัตราส่วนจำนวนรอบของวงจรสร้างแรงดัน

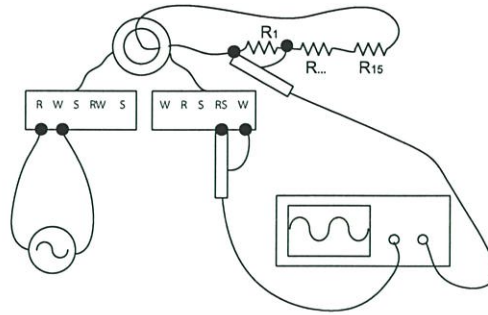
$V_1 (V)$	$V_2 (V)$	$a = \frac{N_1}{N_2}$
2.01	79	25.4431
2.02	80.1	25.2185
2.03	80.7	25.1549
2.04	80.9	25.2163
2.05	81.7	25.0918
2.06	81.8	25.1834

จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าอัตราส่วนจำนวนรอบเฉลี่ยของวงจรสร้างแรงดัน (a) มีค่าเท่ากับ 25.218 และเมื่อปรับค่า V_1 ให้สูงขึ้น ทำให้ค่า V_2 สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น

4.2.2 การทดลองหาอัตราส่วนของกระแสที่ออกมาจากแกนเหล็ก (I_{out}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน (I_{sec})

เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนของกระแส โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้าไปในแกนแม่เหล็กให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในสายทางฝั่งทุติยภูมิ ซึ่งมีลักษณะของการทดลองดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การทดลองหาค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของกระแสไฟฟ้า

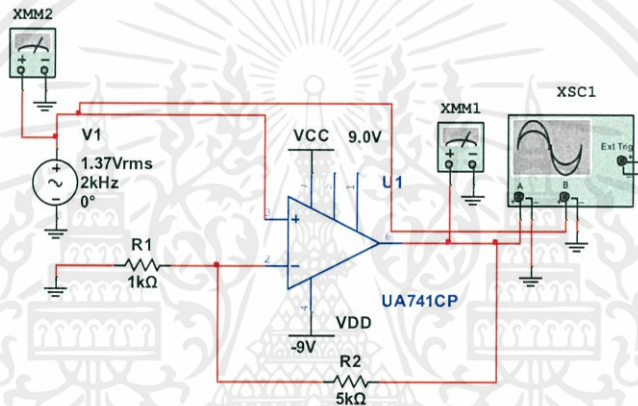
ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	I_{out} (mA)	I_{sec} (mA)	$\frac{I_{out}}{I_{sec}}$
1	691.0	75.7	9.1281
2	380.0	38.2	9.9476
3	264.0	25.2	10.4762
4	202.0	19.0	10.6316
5	165.0	15.5	10.6452
6	137.0	13.0	10.5385
7	120.0	11.1	10.8108
8	103.0	9.58	10.7516
9	90.4	8.32	10.8654
10	81.4	7.49	10.8678
11	75.5	6.78	11.1357
12	70.0	6.26	11.1821
13	65.4	5.85	11.1795
14	61.1	5.36	11.3993
15	58.2	5.02	11.5936

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

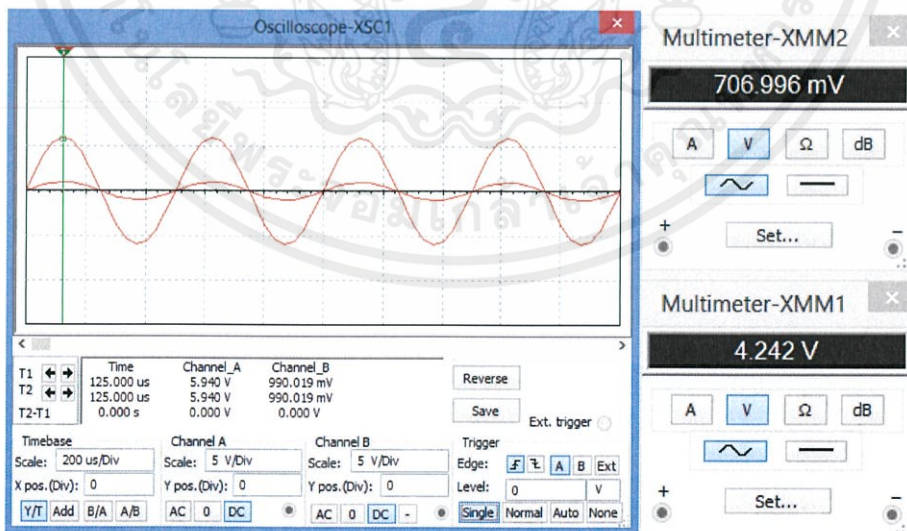
จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าอัตราส่วนเฉลี่ยของกระแสมีค่าเท่ากับ 10.7435 หมายความว่าค่ากระแสไฟฟ้าขาออกจากแกนแม่เหล็ก (I_{out}) มีค่าเป็น 10.7435 เท่าของค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิ (I_{sc}) โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าทั้งสองที่ได้มีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น และมีค่ากระแสไฟฟ้าลดลง เมื่อปรับค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม

4.3 การทดลองวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

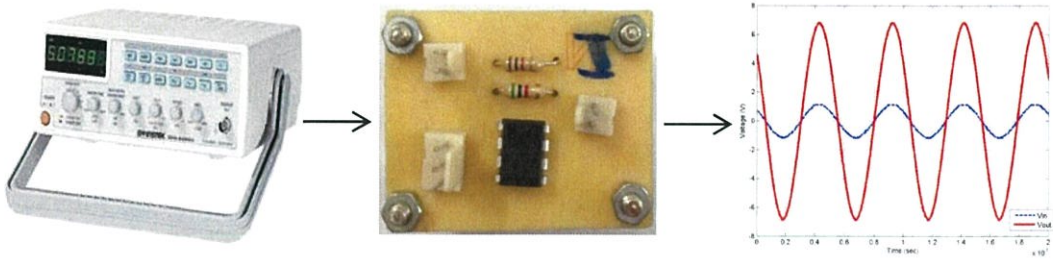
จุดประสงค์ของการทดลอง คือ เพื่อขยายขนาดของสัญญาณแรงดันในลักษณะที่ไม่กลับเฟสตามค่าอัตราการขยายแรงดันซึ่งสามารถกำหนดได้จากการเลือกตัวต้านทานที่ใช้ในการต่อวงจร ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การทดลองวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0



เอกสารรูปที่ 4.7 ผลการทดลองของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0 การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลการทดลองของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสที่ได้จากการปฏิบัติจริง

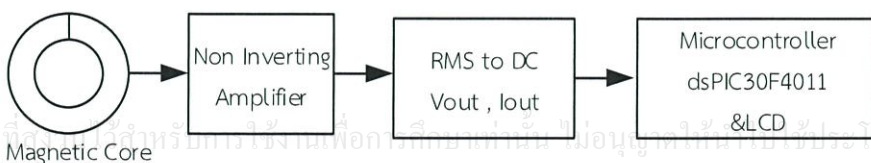
จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าเมื่อป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 707 มิลลิโวลต์ จะได้ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกจากวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสมีค่าเท่ากับ 4.3847 โวลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าผลการทดลองจากโปรแกรม NI Multisim 13.0 ได้ค่าแรงดันขาออกที่มีความแม่นยำมากกว่าที่ได้ปฏิบัติจริง ตามค่าอัตราการขยายของแรงดันไฟฟ้า (Voltage gain) ที่มีค่าเท่ากับ 6 เนื่องจากว่าวงจรที่ใช้ในการทดลองจริงดังรูปที่ 4.8 ได้ใช้ตัวต้านทานชนิดแถบสี ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (error) อยู่ ทำให้ค่าแรงดันขาออกที่ได้มามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่มากกว่าการใช้โปรแกรมสำหรับการทดลองของวงจรนี้ตามไปด้วยดังที่แสดงไว้ในตารางการเปรียบเทียบที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบของวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส

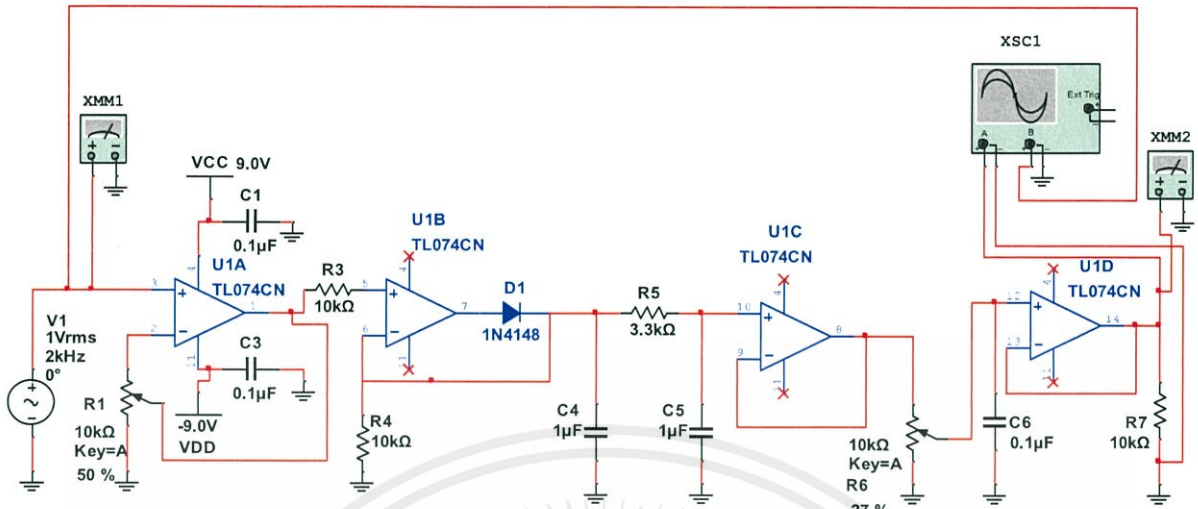
ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (mV)	ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (V)		ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)	
	NI Multisim 13.0	ที่ปฏิบัติจริง	NI Multisim 13.0	ที่ปฏิบัติจริง
707	4.2420	4.3847	0	3.3640

4.4 การทดลองวงจรแปลงค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าไฟฟ้ากระแสตรง (RMS to DC Converter)

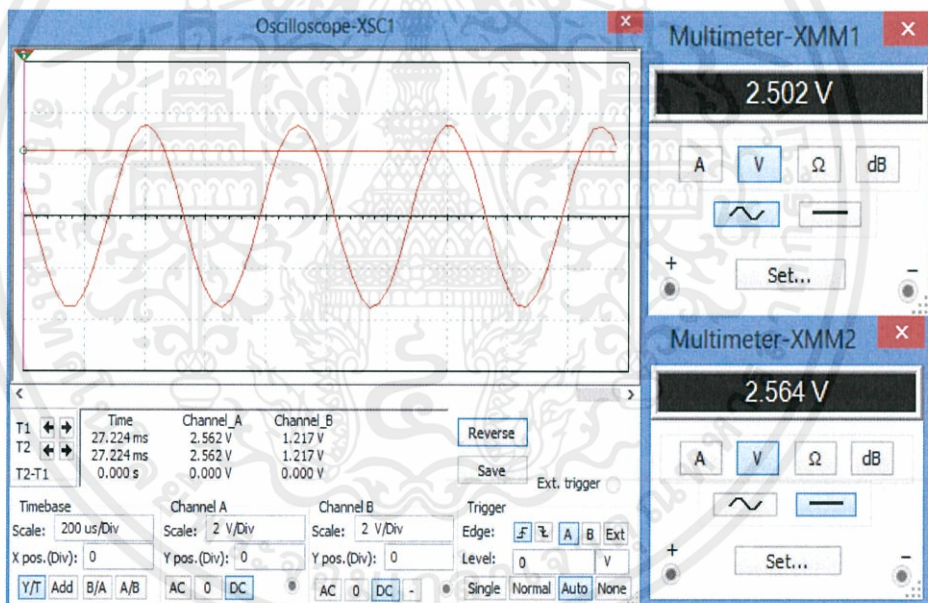
สำหรับวงจรนี้มี 2 วงจร เพื่อไว้สำหรับการรับค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) 1 วงจร และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) 1 วงจร โดยการปรับให้ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (RMS) มีค่าเท่ากับค่าไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากนั้นนำทั้งสองค่านี้ป้อนเข้าไปในไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เพื่อนำมาประมวลผลในส่วนต่อไปดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองสำหรับวงจร RMS to DC Converter

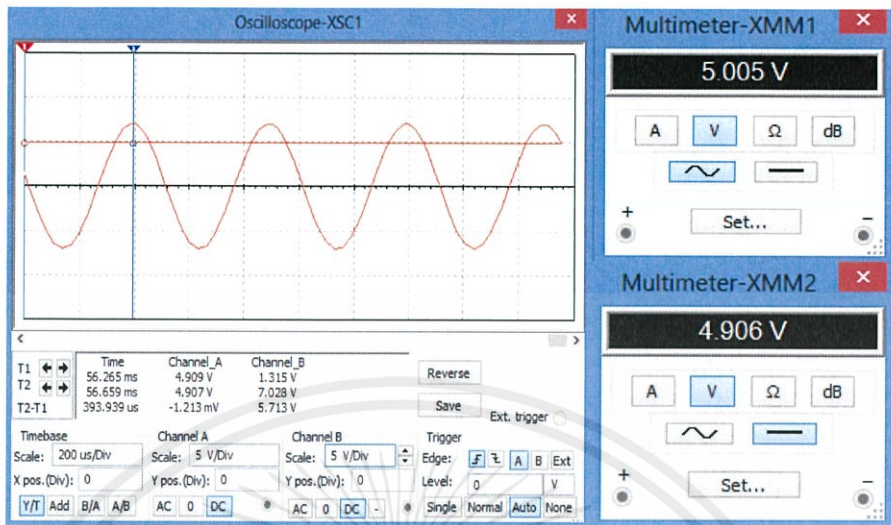


รูปที่ 4.10 การทดลองวงจร RMS to DC Converter ด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0



รูปที่ 4.11 ผลการทดลองของวงจร RMS to DC Converter ด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0
ที่ค่าแรงดันขาเข้าขนาด 2.5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

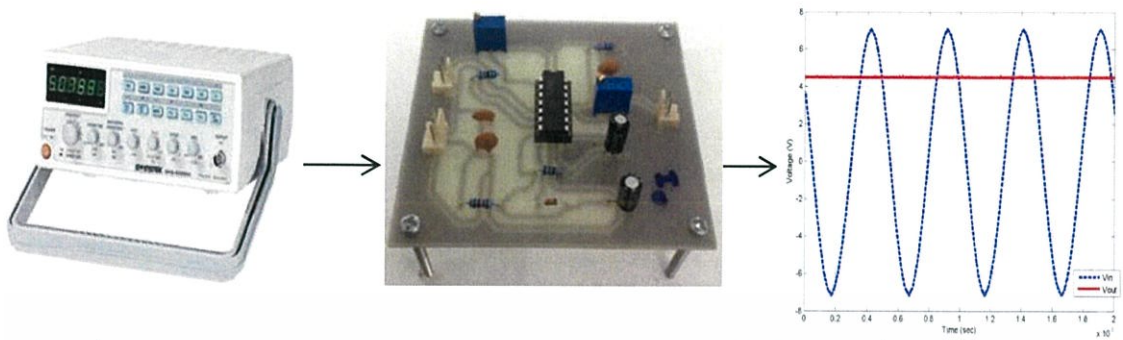


รูปที่ 4.12 ผลการทดลองของวงจร RMS to DC Converter ด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0 ที่ค่าแรงดันขาเข้าขนาด 5 โวลต์



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองของวงจร RMS to DC Converter ที่ปฏิบัติจริง ที่ค่าแรงดันขาเข้าขนาด 2.5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

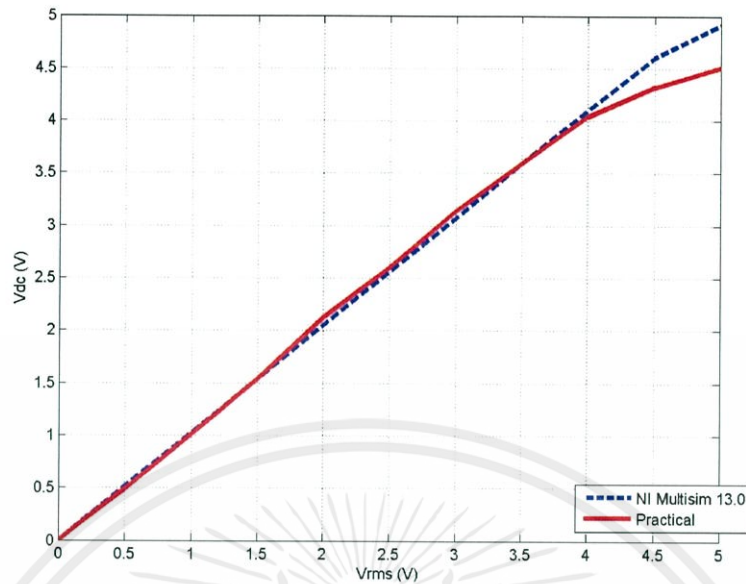


รูปที่ 4.14 ผลการทดลองของวงจร RMS to DC Converter ที่ปฏิบัติจริง ที่ค่าแรงดันขาเข้า
ขนาด 5 โวลต์

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างโปรแกรม NI Multisim 13.0 และจากการปฏิบัติ
จริงสำหรับวงจร RMS to DC Converter

V_{rms} (V)	V_{dc} (V)	
	ทดลองด้วยโปรแกรม NI Multisim 13.0	ที่ปฏิบัติจริง
0	0	0
0.5	0.514	0.49
1	1.025	1.01
1.5	1.535	1.54
2	2.052	2.12
2.5	2.564	2.60
3	3.075	3.14
3.5	3.593	3.59
4	4.094	4.04
4.5	4.604	4.32
5	4.908	4.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



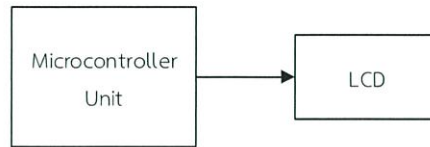
รูปที่ 4.15 กราฟการทดลองของวงจร RMS to DC โดยเปรียบเทียบแนวโน้มระหว่างโปรแกรม NI Multisim 13.0 กับการปฏิบัติจริง

จากตารางผลการทดลองที่ 4.4 พบว่า เมื่อตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าให้เป็นค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (V_{rms}) ตามที่กำหนดให้ แล้วค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) ที่ได้จากการทดลองในโปรแกรม NI Multisim 13.0 มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามากกว่าเมื่อเทียบกับการทดลองที่ได้ปฏิบัติจริง โดยสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามากขึ้น แล้วจะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าที่ห่างจากแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดค่าความผิดพลาดมากขึ้นดังรูปที่ 4.15 ที่ได้แสดงการเปรียบเทียบของแนวโน้มจากกราฟทั้งสอง และคุณลักษณะของรูปคลื่นทั้งแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและขาออกได้จากรูปที่ 4.11 ถึง 4.14

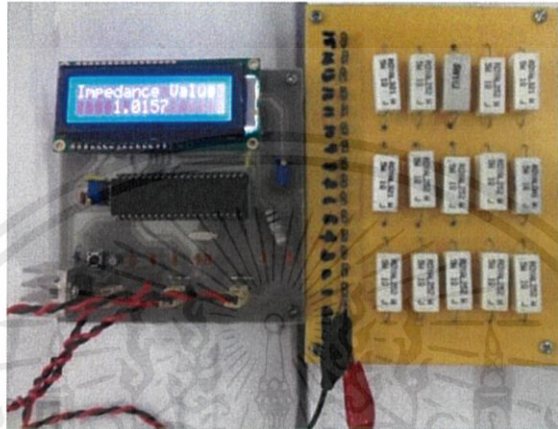
4.5 การทดลองหาค่าความต้านทานของระบบ

สำหรับค่าความต้านทานที่ได้มานั้นมาจากการคำนวณในวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ที่มีชื่อว่า dsPIC30F4011 จากนั้นจะแสดงผลออกทางจอแอลซีดี (LCD Monitor) ดังรูปที่ 4.16 และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (Multi-meter) ยี่ห้อ SANWA FLUKE และ YOKOGAWA เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้น ซึ่งได้แสดงตัวอย่างการทดลองการวัดความต้านทานขนาด 1 โอห์ม พบว่าเครื่องมือวัดแบบจำลองสามารถอ่านค่าได้เท่ากับ 1.0157 โอห์ม ดังรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ไดอะแกรมของการทดลองสำหรับวงจรแสดงผล

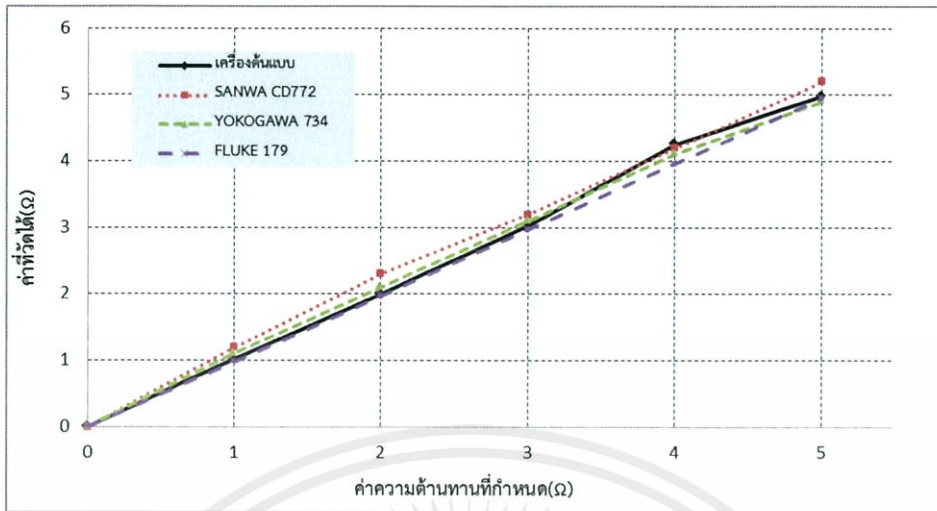


รูปที่ 4.17 รูปวงจรที่ได้จากการปฏิบัติจริงของวงจรการทดลองหาค่าความต้านทานของระบบ

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานระหว่างต้นแบบเครื่องมือวัดกับมัลติมิเตอร์ยี่ห้อต่างๆ

R ที่กำหนดให้ (Ω)	R วัดโดยใช้ Multi-meter			R ที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องมือวัด (Ω)	Error (%) เมื่อเทียบกับ		
	SANWA	FLUKE	YOKOGAWA		SANWA	FLUKE	YOKOGAWA
น้อยกว่า 1	0.2	0.1	0.12	Low Impedance	-	-	-
1	1.1	1.2	0.98	1.0157	-7.6636	-15.3583	3.6429
2	2.1	2.3	1.97	2.0015	-4.6905	-12.9783	1.5990
3	3.1	3.2	2.97	3.0357	-2.0742	-5.1344	2.2121
4	4.1	4.2	3.96	4.2536	3.7463	1.2762	7.4141
5	4.9	5.2	4.95	4.9798	1.6286	-4.2346	0.6020
มากกว่า 5	6	6.2	5.95	High Impedance	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หมายเหตุ - หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าความความต้านทานของเครื่องต้นแบบเมื่อเทียบกับ
มัลติมิเตอร์ยี่ห้อต่างๆ

จากตารางที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบค่าความต้านทาน ซึ่งสามารถแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างความต้านทานของต้นแบบเครื่องมื่อวัดกับมัลติมิเตอร์ทั้ง 3 ยี่ห้อ พบว่ามีค่าความผิดพลาดแต่ละเครื่องมือวัดที่แตกต่างกัน โดยต้นแบบเครื่องมือวัดจะมีค่าความผิดพลาดน้อยเมื่อเทียบกับมัลติมิเตอร์ยี่ห้อ YOKOGAWA แสดงว่าต้นแบบเครื่องมือวัดนี้มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับมัลติมิเตอร์ดังกล่าวมากที่สุดที่ความต้านทานในช่วง 1 ถึง 5 โอห์ม และจากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำใช้งานได้จริง เนื่องจากในช่วง 1 ถึง 5 โอห์มนั้นมีค่าความต้านทานที่ใกล้เคียงกับมัลติมิเตอร์ชนิดอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ในการทดลองโครงงานต้นแบบเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์นี้ ประกอบด้วย วงจรต่างๆหลายส่วนด้วยกัน โดยในแต่ละวงจรจะมีหน้าที่การทำงานที่แตกต่างกัน ซึ่งจะอธิบายถึง ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆได้ดังนี้

เริ่มต้นที่วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (RC Oscillator) จะทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณ แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ที่เหมาะสมกับการใช้งาน และเนื่องจากวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่น ไซน์นั้นมีกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะขับแกนแม่เหล็กให้เหนี่ยวนำแรงดัน จึงต้องใช้วงจรขยาย กำลังไฟฟ้า (Power Amplifier) เพื่อนำมาขับแกนแม่เหล็กให้สามารถเหนี่ยวนำได้ตามกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) โดยในการเหนี่ยวนำนั้นจะเหนี่ยวนำเข้าไปที่ระบบกราวด์เพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้า แล้วเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าในระบบกราวด์จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในระบบกราวด์เช่นกัน นั่นคือ สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์ได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's Law) ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถวัด ได้จากวงจรการวัดจากแกนแม่เหล็ก และเนื่องจากสัญญาณของแรงดันและกระแสที่ออกมานั้นมีค่า น้อยมากในระดับมิลลิโวลต์ จึงมีการใช้วงจรขยายสัญญาณเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถ ประมวลผลสัญญาณแรงดันและกระแสได้ แต่เนื่องจากต้องป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงให้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นต้องมีการนำสัญญาณที่ได้จากวงจรขยายเข้าสู่วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (RMS to DC) ก่อน และสุดท้ายจึงนำค่าที่ได้จากการวัดเข้าสู่วงจร คำนวณโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น dsPIC30F4011 เพื่อคำนวณค่าอิมพีแดนซ์และแสดงผลสู่ หน้าจอ LCD

ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการสร้างเครื่องมือวัดอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ โดยได้ทำการทดลองในส่วนต่างๆเพื่อประกอบสร้างวงจรในแต่ละส่วนขึ้นมา ก็ได้พบกับปัญหา มากมายเกี่ยวกับการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ และข้อจำกัดของวงจรในการทำงาน แต่ก็สามารถสร้าง ต้นแบบเครื่องมือวัดอิมพีแดนซ์กราวด์ขึ้นมาได้อย่างประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ซึ่ง แม้เครื่องมือวัดนี้จะไม่มีประสิทธิภาพดีเท่ากับเครื่องมือวัดในอุตสาหกรรม แต่ผู้จัดทำก็ภูมิใจที่ สามารถทำออกมาได้สำเร็จจุลวง และหวังว่าจะมีรุ่นน้องในรุ่นต่อไปมาพัฒนาต้นแบบนี้ให้มี ประสิทธิภาพทัดเทียมกับในอุตสาหกรรมและสามารถทำผลิตขายเองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

เนื่องจากในโครงการนี้เป็นโครงการต้นแบบเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์ จึงทำให้พบกับปัญหาในการทำงานต่างๆมากมาย ซึ่งสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

- อุปกรณ์บางวงจรของเครื่องมือวัดมีการกินกำลังไฟฟ้าสูงทำให้มีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า
- วงจรแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟตรงมีขีดจำกัดในการทำงานไม่สามารถแปลงแรงดันที่มีค่าสูงได้
- การรับค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อนำไปคำนวณจากวงจรแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟตรงเมื่อค่าแรงดันที่ได้มีค่าต่ำ ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด
- ปัญหาความถี่รบกวนจากความถี่สูง (noise) ทำให้ค่าที่วัดได้มีความผิดพลาด
- ปัญหาเกี่ยวกับความยาวของสายไฟ จะทำให้เกิดแรงดันไฟตก (Voltage drop) ส่งผลให้ค่าที่ได้มีความผิดพลาด

จากปัญหาที่เกิดขึ้นทางผู้จัดทำได้คิดถึงวิธีการแก้ไขเพื่อพัฒนาให้เครื่องมือวัดมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นดังนี้

- ใช้อุปกรณ์ที่มีการกินกำลังไฟฟ้าต่ำ เช่น วงจรขยายกำลัง ควรเปลี่ยนใช้ให้เหมาะสม
- ในการรับค่าสามารถใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำวิธีอื่นได้ ซึ่งให้ผลที่ดีกว่า เช่น การออฟเซต (offset) แรงดันไฟฟ้าขึ้นมา
- ในปัญหาเรื่องความถี่สามารถแก้ไขได้โดยใช้วงจรกรองความถี่แบบแบนด์พาส (Band pass filter) เพื่อเลือกความถี่ที่ต้องการผ่านมาได้ เพื่อให้ค่าที่คำนวณได้มีความถูกต้อง
- ปัญหาสายไฟยาวสามารถแก้ไขได้โดยทำลงในแผ่นปริ้นท์เดียวเพื่อลดแรงดันไฟฟ้าตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chulalongkorn Electronic Laboratory, 2551, การทดลองเรื่องวงจรกำเนิดสัญญาณ (ออนไลน์), แหล่งที่มา: pioneer.netserv.chula.ac.th/~tarporn/384/LabSheet/OSC.pdf, 10 มกราคม 2557
- [2] ญัฐพนธ์ จงฤกษ์มงคล และบัณฑิต ชินผา, RMS-to-DC Converter, THE BEST OF PROJECTS, 353-366 (2554): 83-96
- [3] Electronics-Tutorials.ws [homepage on the internet], The RC Oscillator Circuit, Basic Electronics Tutorials Site by Wayne Storr; c1999 – 2014 [cited 2014 March 14], Available from: http://www.electronicstutorials.ws/oscillator/rc_oscillator.html
- [4] นคร ภัคดีชาติ และคณะ, คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้น ด้วยโปรแกรมภาษา C กับ MPLAB C30, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ: บริษัทอินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด, 2556.
- [5] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิ์เรศรุทธ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ หจก. วี.เจ.พรีนติ้ง, 2547
- [6] พิชิต ล้ายอง, เครื่องจักรกลไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554
- [7] IEEE STANDARDS ASSOCIATION, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System”, IEEE Std 81™-2012, P 19-30, 2012
- [8] CircuitDiagram.Org [homepage on the internet], “Regulated 9V Dual Power Supply”, c2012, Available from: <http://www.circuitdiagram.org/regulated-9v-dual-power-supply.html>
- [9] บริษัทอีทีที จำกัด, คู่มือการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-BASE dsPIC30F2010/4011 (ออนไลน์), แหล่งที่มา: <http://ett.co.th/product2009/ET-PIC/man%20ET-BASE%20dsPIC30.pdf>
- [10] Non-inverting amplifier with uA741. (2010). Available from : <http://www.instructables.com/id/Non-inverting-amplifier-with-uA741/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



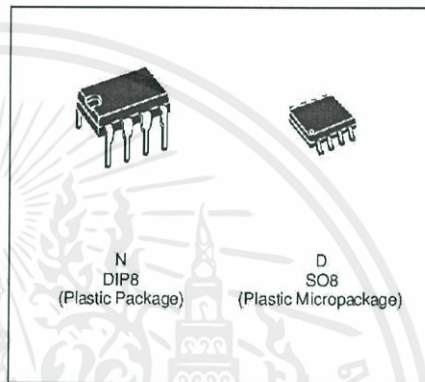
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TL072
TL072A - TL072B

LOW NOISE J-FET DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE COMMON-MODE (UP TO V_{CC}^+) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- LOW NOISE $e_n = 15\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (typ)
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- LOW HARMONIC DISTORTION : 0.01% (typ)
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE : $16\text{V}/\mu\text{s}$ (typ)



DESCRIPTION

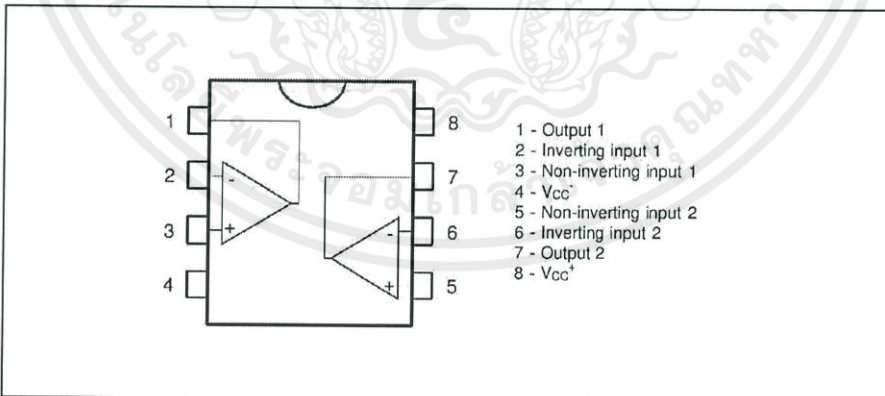
The TL072, TL072A and TL072B are high speed J-FET input dual operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit. The devices feature high slew rates, low input bias and offset current, and low offset voltage temperature coefficient.

ORDER CODES

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
TL072M/AM/BM	-55°C, +125°C	•	•
TL072I/AI/BI	-40°C, +105°C	•	•
TL072C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•

Example : TL072CN

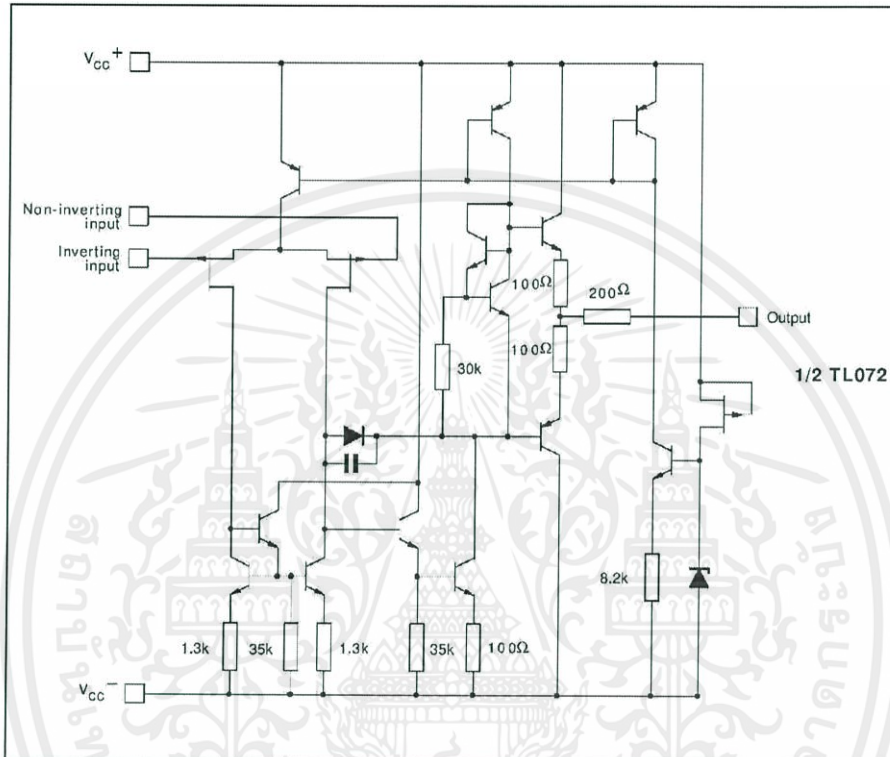
PIN CONNECTIONS (top view)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL072 - TL072A - TL072B

SCHEMATIC DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit	
V _{CC}	Supply Voltage - (note 1)	±18	V	
V _I	Input Voltage - (note 3)	±15	V	
V _{id}	Differential Input Voltage - (note 2)	±30	V	
P _{tot}	Power Dissipation	680	mW	
	Output Short-circuit Duration - (note 4)	Infinite		
T _{oper}	Operating Free Air Temperature Range	TL072C, AC, BC TL072I, AI, BI TL072M, AM, BM	0 to 70 -40 to 105 -55 to 125	°C
T _{stg}	Storage Temperature Range		-65 to 150	°C

Notes : 1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between V_{CC}' and V_{CC}-.
 2. Differential voltages are at the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
 3. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
 4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and /or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL072 - TL072A - TL072B

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

V_{CC} = ±15V, T_{amb} = 25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	TL072I,M,AC,AI, AM,BC,BI,BM			TL072C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V _{io}	Input Offset Voltage (R _S = 50Ω) T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		3 3 1	10 6 3 13 7 5		3	10	mV
DV _{io}	Input Offset Voltage Drift		10			10		μV/°C
I _o	Input Offset Current * T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		5	100 4		5	100 10	pA nA
I _b	Input Bias Current * T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		20	200 20		20	200 20	pA nA
A _{vd}	Large Signal Voltage Gain (R _L = 2kΩ, V _O = ±10V) T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	50 25	200		25 15	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio (R _S = 50Ω) T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	80 80	86		70 70	86		dB
I _{cc}	Supply Current, per Amp, no Load T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		1.4	2.5 2.5		1.4	2.5 2.5	mA
V _{icm}	Input Common Mode Voltage Range	±11	+15 -12		±11	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio (R _S = 50Ω) T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	80 80	86		70 70	86		dB
I _{os}	Output Short-circuit Current T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	10 10	40	60 60	10 10	40	60 60	mA
±V _{OPP}	Output Voltage Swing T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		10 12 10 12	2kΩ 10kΩ 2kΩ 10kΩ		10 12 10 12	13.5 13.5	V
SR	Slew Rate (V _{in} = 10V, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)	8	16		8	16		V/μs
t _r	Rise Time (V _{in} = 20mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)		0.1			0.1		μs
K _{OV}	Overshoot (V _{in} = 20mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)		10			10		%
GBP	Gain Bandwidth Product (f = 100kHz, T _{amb} = 25°C, V _{in} = 10mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF)	2.5	4		2.5	4		MHz
R _i	Input Resistance		10 ¹²			10 ¹²		Ω
THD	Total Harmonic Distortion (f = 1kHz, A _V = 20dB, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, V _O = 2V _{pp})		0.01			0.01		%
e _n	Equivalent Input Noise Voltage (f = 1kHz, R _S = 100Ω)		15			15		nV √Hz
∅ _m	Phase Margin		45			45		Degrees
V _{O1} /V _{O2}	Channel Separation (A _V = 100)		120			120		dB

* The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature.



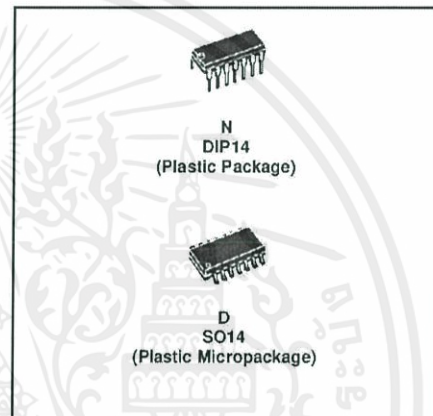
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TL074 TL074A - TL074B

LOW NOISE J-FET QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE COMMON-MODE (UP TO V_{CC^+}) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- LOW NOISE $e_n = 15\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (typ)
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- LOW HARMONIC DISTORTION : 0.01% (typ)
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE : $13\text{V}/\mu\text{s}$ (typ)



DESCRIPTION

The TL074, TL074A and TL074B are high speed J-FET input quad operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

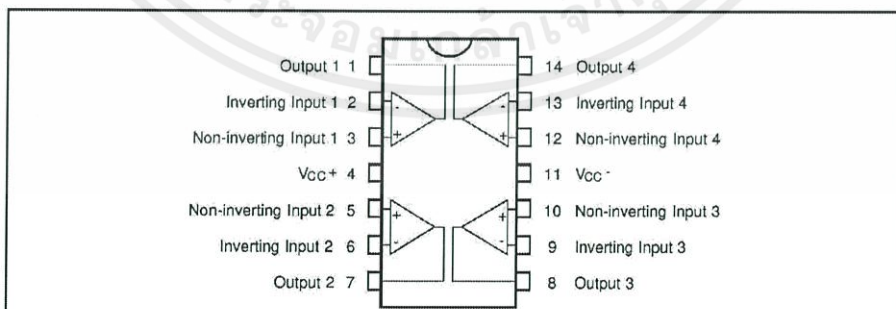
ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
TL074M/AM/BM	-55°C, +125°C	•	•
TL074I/AI/BI	-40°C, +105°C	•	•
TL074C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•

Example : TL074IN

N = Dual in Line Package (DIP)
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)

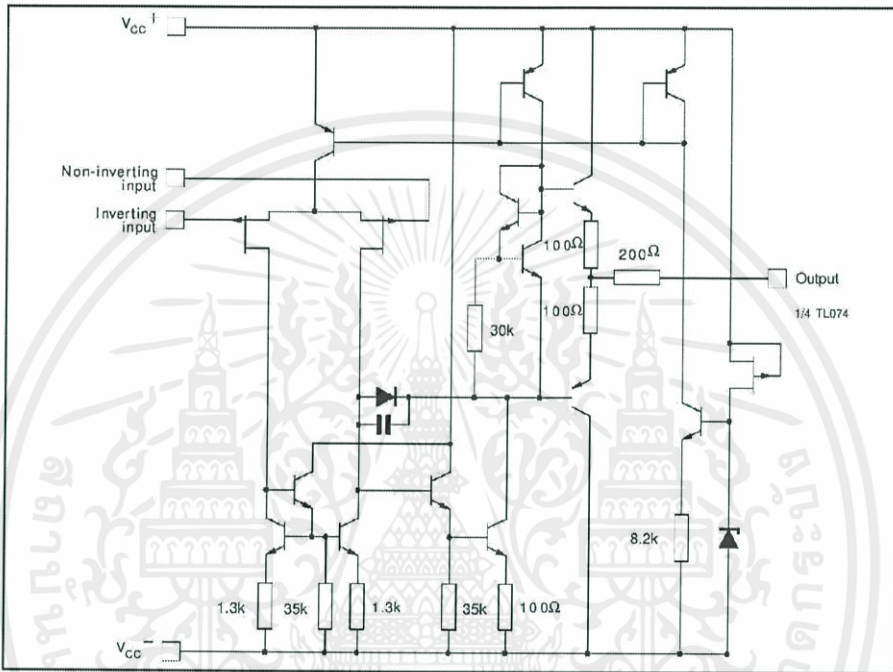
PIN CONNECTIONS (top view)



March 2001

1/11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL074- TL074A - TL074B
SCHEMATIC DIAGRAM

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	TL074M, AM, BM	TL074I, AI, BI	TL074C, AC, BC	Unit
V_{CC}	Supply voltage - note ¹⁾		± 18		V
V_i	Input Voltage - note ²⁾		± 15		V
V_{id}	Differential Input Voltage - note ³⁾		± 30		V
P_{tot}	Power Dissipation		680		mW
	Output Short-circuit Duration - note ⁴⁾		Infinite		
T_{oper}	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
T_{stg}	Storage Temperature Range		-65 to +150		°C

1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-} .
2. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
3. Differential voltages are the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL074 - TL074A - TL074B

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

 $V_{CC} = \pm 15V$, $T_{amb} = +25^\circ C$ (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	TL074I,M,AC,AI,AM, BC,BI,BM			TL074C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V_{io}	Input Offset Voltage ($R_S = 50\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ TL074 TL074A TL074B $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ TL074 TL074A TL074B		3 3 1	10 6 3 13 7 5		3	10 13	mV
DV_{io}	Input Offset Voltage Drift		10			10		$\mu V/^\circ C$
I_{io}	Input Offset Current - note 1) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		5	100 4		5 100 10		pA nA
I_{ib}	Input Bias Current -note 1 $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		20	200 20		30 200 20		pA nA
A_{vd}	Large Signal Voltage Gain ($R_L = 2k\Omega$, $V_o = \pm 10V$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		50 25	200		25 15	200	V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ($R_S = 50\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		80 80	86		70 70	86	dB
I_{CC}	Supply Current, no load, per amplifier $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			1.4 2.5 2.5		1.4 2.5 2.5		mA
V_{icm}	Input Common Mode Voltage Range	± 11	+15 -12		± 11	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ($R_S = 50\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		80 80	86		70 70	86	dB
I_{OS}	Output Short-circuit Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10 10	40 60 60		10 10 40 60		mA
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ RL = 2k Ω RL = 10k Ω RL = 2k Ω RL = 10k Ω		10 12 12 10 12	12 13.5		10 12 12 10 12	12 13.5	V
SR	Slew Rate ($T_{amb} = +25^\circ C$) $V_{in} = 10V$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, unity gain		8	13		8	13	V/ μs
t_r	Rise Time ($T_{amb} = +25^\circ C$) $V_{in} = 20mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, unity gain			0.1		0.1		μs
K_{ov}	Overshoot ($T_{amb} = +25^\circ C$) $V_{in} = 20mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, unity gain			10		10		%
GBP	Gain Bandwidth Product ($T_{amb} = +25^\circ C$) $V_{in} = 10mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, $f = 100kHz$		2	3		2	3	MHz
R_i	Input Resistance			10^{12}			10^{12}	Ω



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL074- TL074A - TL074B

Symbol	Parameter	TL074I,M,AC,AI,AM, BC,BI,BM			TL074C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
THD	Total Harmonic Distortion ($T_{amb} = +25^{\circ}\text{C}$) $f = 1\text{kHz}$, $R_L = 2\text{k}\Omega$, $C_L = 100\text{pF}$, $A_v = 20\text{dB}$, $V_o = 2V_{pp}$		0.01			0.01		%
e_n	Equivalent Input Noise Voltage $R_S = 100\Omega$, $f = 1\text{kHz}$		15			15		$\frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
ϕ_m	Phase Margin		45			45		degrees
V_{o1}/V_{o2}	Channel separation $A_v = 100$		120			120		dB

1. The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GENERAL PURPOSE SINGLE OPERATIONAL AMPLIFIER

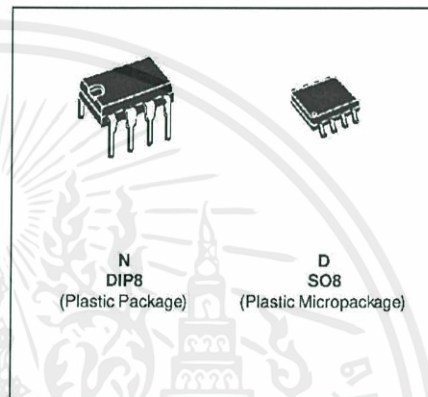
- LARGE INPUT VOLTAGE RANGE
- NO LATCH-UP
- HIGH GAIN
- SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- NO FREQUENCY COMPENSATION REQUIRED
- SAME PIN CONFIGURATION AS THE UA709

DESCRIPTION

The UA741 is a high performance monolithic operational amplifier constructed on a single silicon chip. It is intended for a wide range of analog applications.

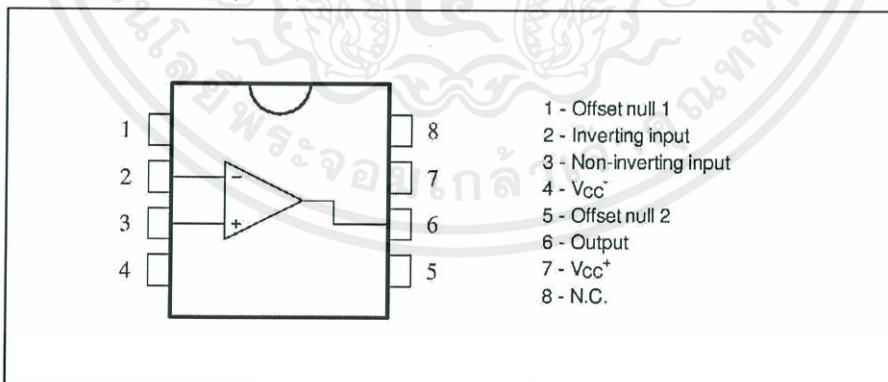
- Summing amplifier
- Voltage follower
- Integrator
- Active filter
- Function generator

The high gain and wide range of operating voltages provide superior performances in integrator, summing amplifier and general feedback applications. The internal compensation network (6dB/octave) insures stability in closed loop circuits.

**ORDER CODES**

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
UA741C	0°C, +70°C	•	•
UA741I	-40°C, +105°C	•	•
UA741M	-55°C, +125°C	•	•

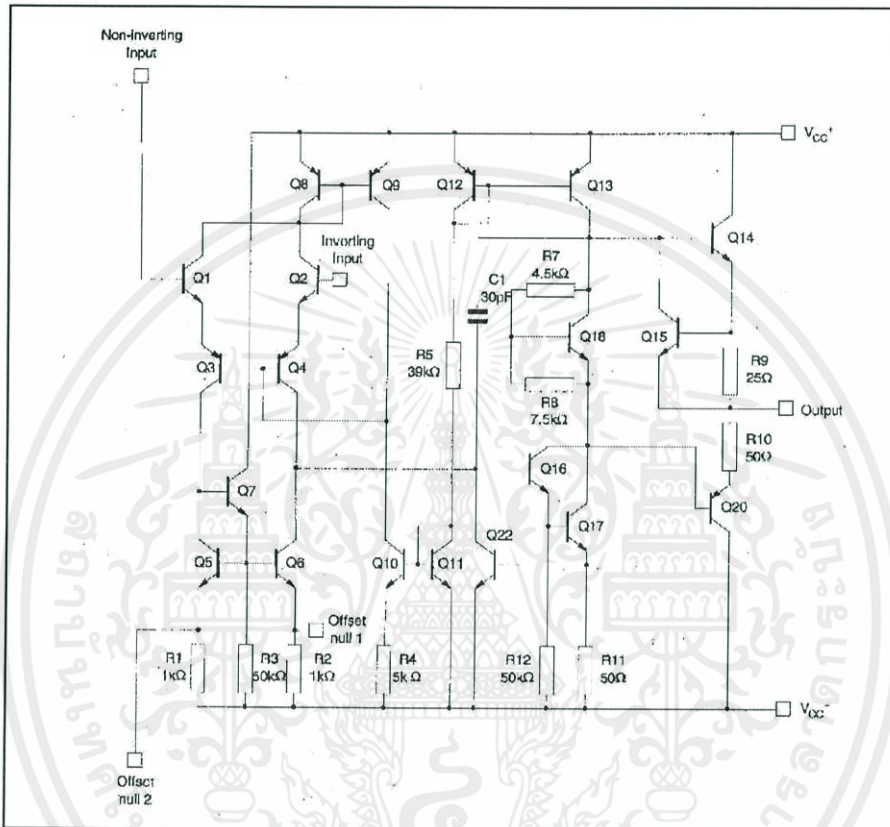
Example : UA741CN

PIN CONNECTIONS (top view)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UA741

SCHEMATIC DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	UA741M	UA741I	UA741C	Unit
V_{cc}	Supply Voltage		± 22		V
V_{id}	Differential Input Voltage		± 30		V
V_i	Input Voltage		± 15		V
P_{tot}	Power Dissipation		500		mW
	Output Short-circuit Duration		Infinite		
T_{oper}	Operating Free Air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	$^{\circ}\text{C}$
T_{stg}	Storage Temperature Range	-65 to +150	-65 to +150	-65 to +150	$^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICSV_{CC} = ±15V, T_{amb} = +25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
V _{io}	Input Offset Voltage (R _S ≤ 10kΩ) T _{amb} = +25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		1	5 6	mV
I _{io}	Input Offset Current T _{amb} = +25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		2	30 70	nA
I _{ib}	Input Bias Current T _{amb} = +25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		10	100 200	nA
A _{vd}	Large Signal Voltage Gain * (V _O ±10V, R _L = 2kΩ) T _{amb} = +25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	50 25	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio (R _S ≤ 10kΩ) T _{amb} = +25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	77 77	90		dB
I _{cc}	Supply Current, no load T _{amb} = +25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		1.7	2.8 3.3	mA
V _{icm}	Input Common Mode Voltage Range T _{amb} = +25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	±12 ±12			V
CMR	Common-mode Rejection Ratio (R _S ≤ 10kΩ) T _{amb} = +25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	70 70	90		dB
I _{os}	Output Short-circuit Current	10	25	40	mA
±V _{OPP}	Output Voltage Swing T _{amb} = +25°C R _L = 10kΩ R _L = 2kΩ T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.} R _L = 10kΩ R _L = 2kΩ	12 10 12 10	14 13		V
SR	Slew Rate (V _I = ±10V, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)	0.25	0.5		V/μs
t _r	Rise Time (V _I = ±20mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)		0.3		μs
K _{OV}	Overshoot (V _I = 20mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)		5		%
R _I	Input Resistance	0.3	2		MΩ
GBP	Gain Bandwidth Product (V _I = 10mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, f = 100kHz)	0.7	1		MHz
THD	Total Harmonic Distortion (f = 1kHz, A _V = 20dB, R _L = 2kΩ, V _O = 2V _{PP} , C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C)		0.06		%
e _n	Equivalent Input Noise Voltage (f = 1kHz, R _a = 100Ω)		23		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
∠m	Phase Margin		50		Degrees

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

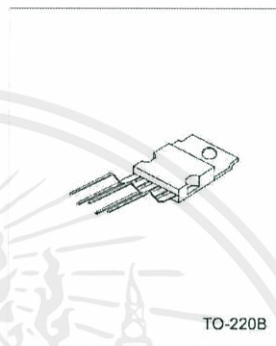
UTC2003

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

**10W CAR RADIO AUDIO
AMPLIFIER****DESCRIPTION**

The UTC2003 has improved performance with the same pin configuration as the UTC2002. The additional features of UTC2002, very low number of external components, ease of assembly, space and cost saving, are maintained.

The device provides a high output current capacity (up to 3.5A) very low harmonic and crossover distortion. Completely safe operation is guaranteed due to protection against DC and AC short circuit between all pins and ground, thermal over-range, load dump voltage surge up to 40V and fortuitous open ground.



TO-220B

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Ta=25°C)

CHARACTERISTICS	SYMBOL	VALUE	UNITS
Peak Supply Voltage	Vs	40	V
DC supply Voltage	Vs	28	V
Operating supply voltage	Vs	18	V
Output peak current (repetitive)	Io	3.5	A
Output peak current (non repetitive)	Io	4.5	A
Power dissipation at Tcase=90°C	Plot	20	W
Storage temperature	Tstg	-40~+150	°C
Junction temperature	Tj	-40~+150	°C

PIN CONNECTION

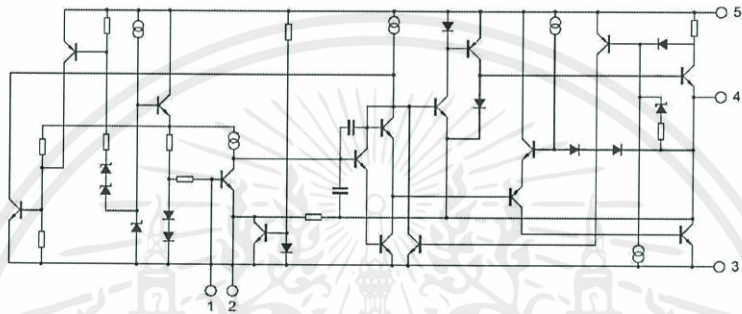
- 1 Non Inverting input
- 2 Inverting input
- 3 Ground
- 4 Output
- 5 Supply Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

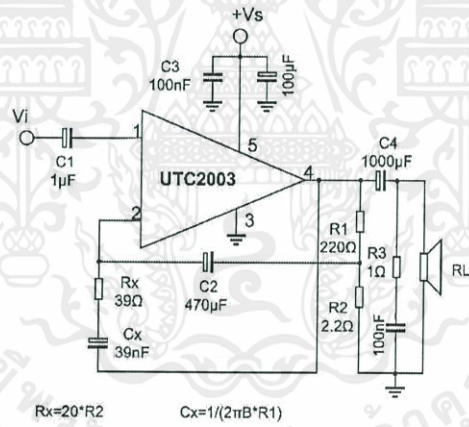
UTC2003

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

SCHEMATIC DIAGRAM



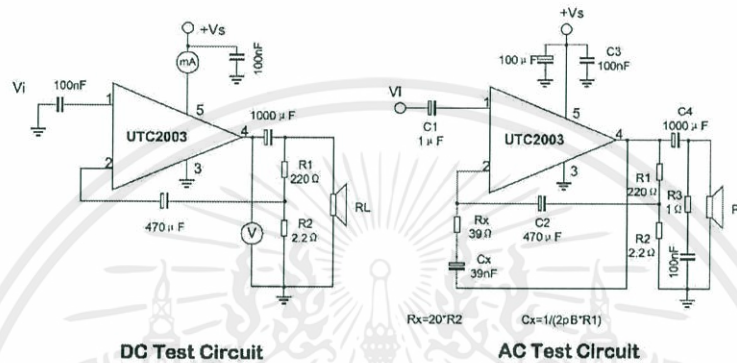
TEST CIRCUIT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UTC2003

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Refer to the test circuit, Vs=1-1.4V, Ta=25°C)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
DC CHARACTERISTICS						
Supply Voltage	Vs		8		18	V
Quiescent Output Voltage	Vo		6.1	6.9	7.7	V
Quiescent drain current	Id			44	50	mA
AC CHARACTERISTICS						
Output power	Po	d=10%, f=1kHz				W
		RL=4Ω	5.5	6		
		RL=2Ω	9	10		
		RL=3.2Ω		7.5		
		RL=1.6Ω		12		
Input sensitivity	Vi	f=1kHz				mV
		Po=0.5W, RL=4Ω		14		
		Po=6W, RL=4Ω		55		
		Po=0.5W, RL=2Ω		10		
Input saturation voltage	Vi(rms)		300			mV
Frequency response(-3dB)	B	Po=1W, RL=4Ω	40		15000	Hz
Distortion	D	f=1kHz				%
		Po=0.05 to 4.5W, RL=4Ω		0.15		
		Po=0.05 to 7.5W, RL=2Ω		0.15		

(continued)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UTC2003

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Input Resistance (pin 1)	R _i	open loop, f=1kHz	70	150		kΩ
Input noise current	e _N			60	200	pA
Input noise voltage	V _N			1	5	μV
open loop voltage gain	G _{vo}	f=1kHz		80		dB
		f=10kHz		60		dB
closed loop voltage gain	G _{vc}	f=1kHz, R _L =4Ω	39.3	40	40.3	dB
Efficiency	η	f=1kHz P _O =6W, R _L =4Ω		69		%
		P _O =10W, R _L =2Ω		65		%
Supply voltage rejection	SVR	f=100Hz, V _{ripple} =0.5V R _G =10kΩ, R _L =4Ω	30	36		dB

Fig.1 Quiescent output voltage vs. Supply voltage

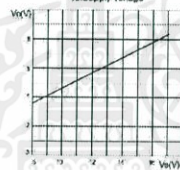


Fig.2 Quiescent drain current vs. Supply voltage

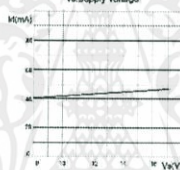


Fig.3 Output power vs. Supply voltage

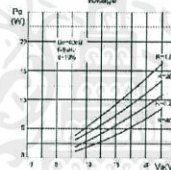


Fig.4 output power vs. load resistance

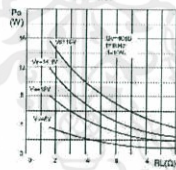


Fig.5 Gain vs. Input sensitivity

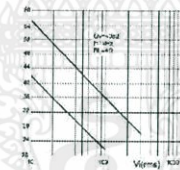


Fig.6 Gain vs. Input sensitivity

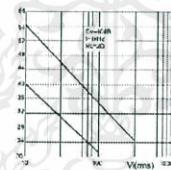


Fig.7 Distortion vs. output power

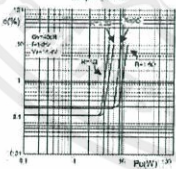


Fig.8 Distortion vs. frequency

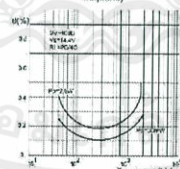
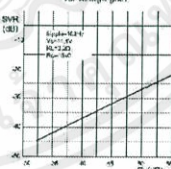


Fig.9 Supply voltage rejection vs. voltage gain



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UTC2003

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

APPLICATION SUGGESTION

The recommended values of the components are those shown on application circuit of Fig.16. Different values can be used. The following table can help the designer.

Component	Recommended value	Purpose	Large than recommended value	Large than recommended value
R1	$(Gv-1) \cdot R2$	gain setting.		Increase of Gain
R2	2.2Ω	gain and SVR setting.	Decrease of SVR	
R3	1Ω	Frequency stability	Danger of oscillation at high frequencies with inductive loads.	
Rx	$\approx 20 \cdot R2$	Upper frequency cutoff	Poor high frequencies attenuation	Dange of oscillation
C1	$2.2\mu F$	Input DC decoupling		Noise at switch-on switch-off
C2	$470\mu F$	Ripple rejection		Decrease of SVR
C3	$0.1\mu F$	Supply voltage bypass		Dange of oscillation
C4	$1000\mu F$	Output coupling to load		Higher low frequency cutoff
C5	$0.1\mu F$	Frequency stability		Danger of oscillation at high frequencies with inductive loads.
Cx	$\approx (2 \cdot \pi \cdot B \cdot R1)$	Upper frequency cutoff	smaller bandwidth	Larger bandwidth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MICROCHIP

dsPIC30F4011/4012 Data Sheet

High-Performance, 16-bit
Digital Signal Controllers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Note the following details of the code protection feature on Microchip devices:

- Microchip products meet the specification contained in their particular Microchip Data Sheet.
- Microchip believes that its family of products is one of the most secure families of its kind on the market today, when used in the intended manner and under normal conditions.
- There are dishonest and possibly illegal methods used to breach the code protection feature. All of these methods, to our knowledge, require using the Microchip products in a manner outside the operating specifications contained in Microchip's Data Sheets. Most likely, the person doing so is engaged in theft of intellectual property.
- Microchip is willing to work with the customer who is concerned about the integrity of their code.
- Neither Microchip nor any other semiconductor manufacturer can guarantee the security of their code. Code protection does not mean that we are guaranteeing the product as "unbreakable."

Code protection is constantly evolving. We at Microchip are committed to continuously improving the code protection features of our products. Attempts to break Microchip's code protection feature may be a violation of the Digital Millennium Copyright Act. If such acts allow unauthorized access to your software or other copyrighted work, you may have a right to sue for relief under that Act.

Information contained in this publication regarding device applications and the like is provided only for your convenience and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. MICROCHIP MAKES NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES OF ANY KIND WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, WRITTEN OR ORAL, STATUTORY OR OTHERWISE, RELATED TO THE INFORMATION, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ITS CONDITION, QUALITY, PERFORMANCE, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR PURPOSE. Microchip disclaims all liability arising from this information and its use. Use of Microchip devices in life support and/or safety applications is entirely at the buyer's risk, and the buyer agrees to defend, indemnify and hold harmless Microchip from any and all damages, claims, suits, or expenses resulting from such use. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, under any Microchip intellectual property rights.

Trademarks

The Microchip name and logo, the Microchip logo, Accuron, dsPIC, KEELoQ, KEELoQ logo, MPLAB, PIC, PICmicro, PICSTART, PRO MATE, rPIC and SmartShunt are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.


FilterLab, Linear Active Thermistor, MXDEV, MXLAB, SEEVAL, SmartSensor and The Embedded Control Solutions Company are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

Analog-for-the-Digital Age, Application Maestro, CodeGuard, dsPICDEM, dsPICDEM.net, dsPICworks, dsSPEAK, ECAN, ECONOMONITOR, FanSense, In-Circuit Serial Programming, ICSP, ICEPIC, Mindi, MiWi, MPASM, MPLAB Certified logo, MPLIB, MPLINK, mTouch, PICkit, PICDEM, PICDEM.net, PICtail, PIC³² logo, PowerCal, PowerInfo, PowerMate, PowerTool, REAL ICE, rLAB, Select Mode, Total Endurance, UNI/O, WiperLock and ZENA are trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.

SQTP is a service mark of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

All other trademarks mentioned herein are property of their respective companies.

© 2008, Microchip Technology Incorporated, Printed in the U.S.A., All Rights Reserved.

 Printed on recycled paper.

Microchip received ISO/TS-16949:2002 certification for its worldwide headquarters, design and wafer fabrication facilities in Chandler and Tempe, Arizona, Gresham, Oregon and design centers in California and India. The Company's quality system processes and procedures are for its PIC[®] MCUs and dsPIC[®] DSCs, KEELoQ[®] code hopping devices, Serial EEPROMs, microperipherals, nonvolatile memory and analog products. In addition, Microchip's quality system for the design and manufacture of development systems is ISO 9001:2000 certified.

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO/TS 16949:2002 ==

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



dsPIC30F4011/4012

High-Performance, 16-bit Digital Signal Controllers

Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the "dsPIC30F Family Reference Manual" (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the "dsPIC30F/33F Programmer's Reference Manual" (DS70157).

High-Performance, Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture with flexible addressing modes
- 83 base instructions
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 48 Kbytes on-chip Flash program space (16K instruction words)
- 2 Kbytes of on-chip data RAM
- 1 Kbyte of nonvolatile data EEPROM
- Up to 30 MIPS operation:
 - DC to 40 MHz external clock input
 - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 30 interrupt sources:
 - 3 external interrupt sources
 - 8 user-selectable priority levels for each interrupt source
 - 4 processor trap sources
- 16 x 16-bit working register array

DSP Engine Features:

- Dual data fetch
- Accumulator write-back for DSP operations
- Modulo and Bit-Reversed Addressing modes
- Two, 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single-cycle hardware fractional/integer multiplier
- All DSP instructions are single cycle
- ± 16 -bit, single-cycle shift

Peripheral Features:

- High-current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Timer module with programmable prescaler:
 - Five 16-bit timers/counters; optionally pair 16-bit timers into 32-bit timer modules
- 16-bit Capture input functions
- 16-bit Compare/PWM output functions
- 3-wire SPI modules (supports 4 Frame modes)
- I²C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- 2 UART modules with FIFO Buffers
- 1 CAN module, 2.0B compliant

Motor Control PWM Module Features:

- 6 PWM output channels:
 - Complementary or Independent Output modes
 - Edge and Center-Aligned modes
- 3 duty cycle generators
- Dedicated time base
- Programmable output polarity
- Dead-time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for A/D conversions

Quadrature Encoder Interface Module Features:

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-Bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

Analog Features:

- 10-Bit Analog-to-Digital Converter (A/D) with 4 S/H inputs:
 - 1 Msps conversion rate
 - 9 input channels
 - Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Brown-out Reset

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F4011/4012

Special Digital Signal Controller Features:

- Enhanced Flash program memory:
 - 10,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 100K (typical)
- Data EEPROM memory:
 - 100,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 1M (typical)
- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Flexible Watchdog Timer (WDT) with on-chip, low-power RC oscillator for reliable operation
- Fail-Safe Clock Monitor operation detects clock failure and switches to on-chip, low-power RC oscillator
- Programmable code protection
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
- Selectable Power Management modes:
 - Sleep, Idle and Alternate Clock modes

CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash technology
- Wide operating voltage range (2.5V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low-power consumption

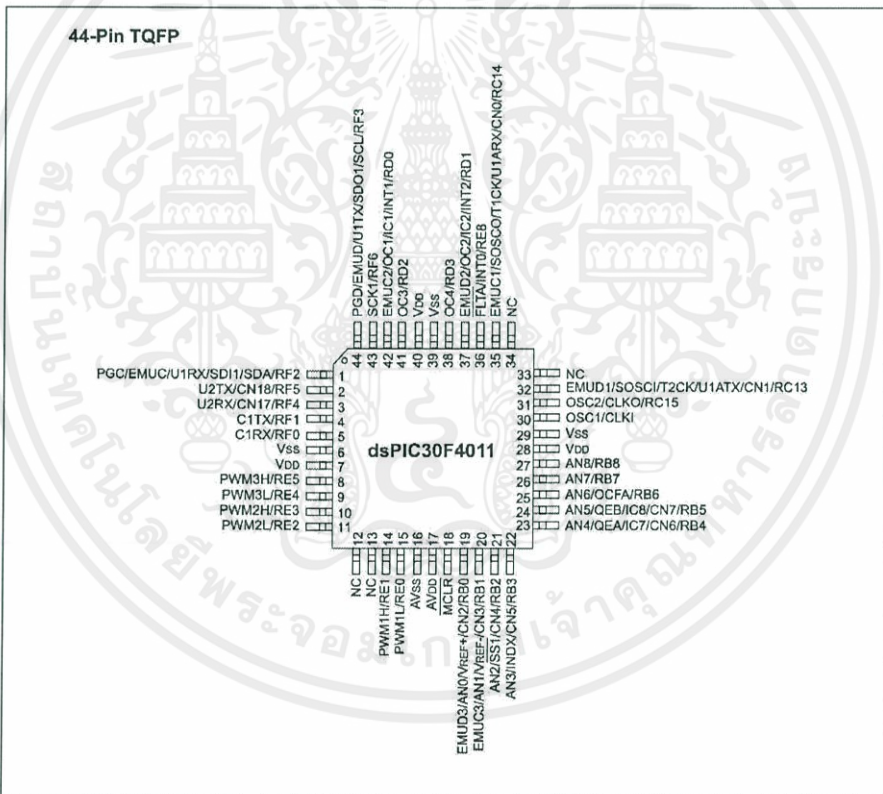
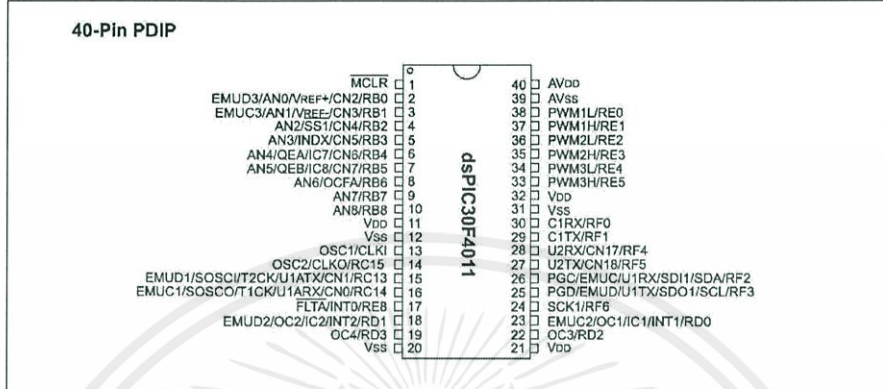
dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family

Device	Pins	Program Mem. Bytes/Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	10-Bit A/D 1 Msps	Quad Enc	UART	SPI	I ² C™	CAN
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F4011/4012

Pin Diagrams



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F4011/4012

1.0 DEVICE OVERVIEW

Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the *"dsPIC30F Family Reference Manual"* (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the *"dsPIC30F/33F Programmer's Reference Manual"* (DS70157).

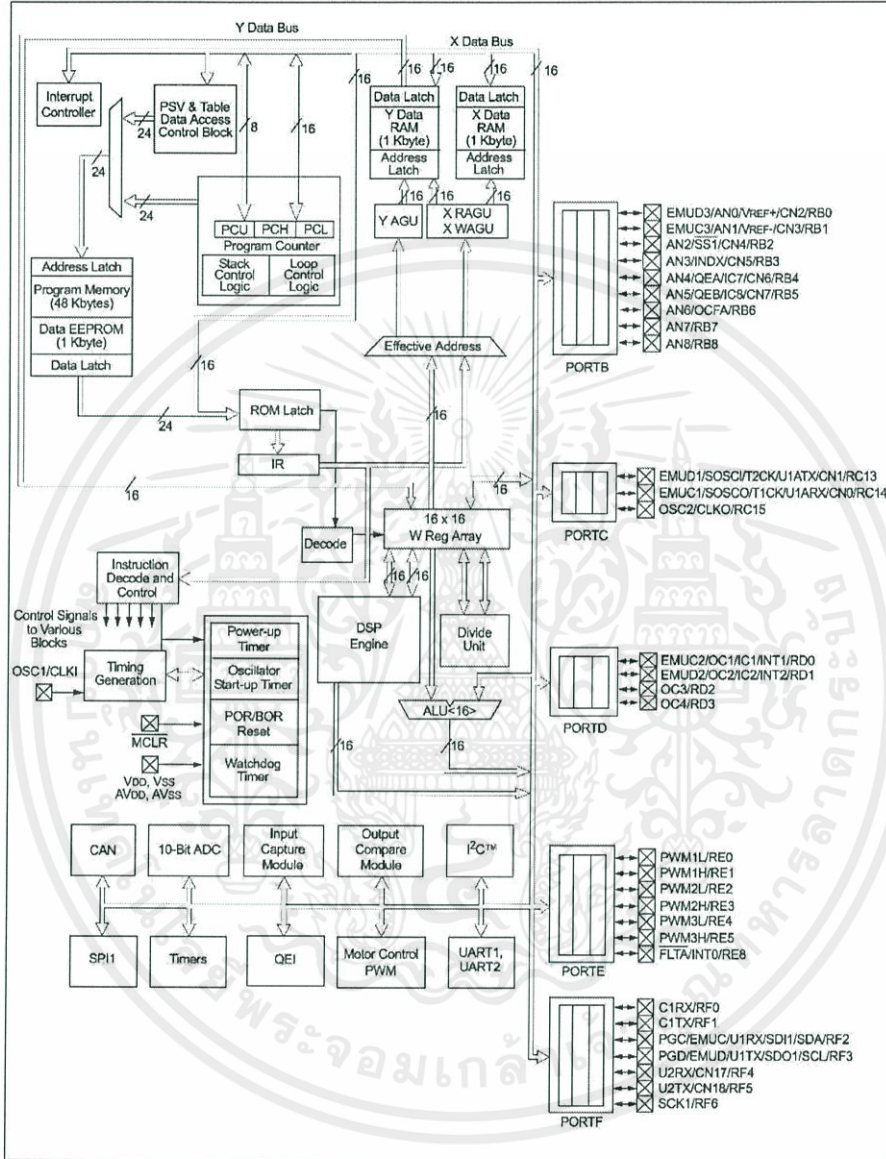
This document contains device-specific information for the dsPIC30F4011/4012 devices. The dsPIC30F devices contain extensive Digital Signal Processor (DSP) functionality within a high-performance, 16-bit microcontroller (MCU) architecture. Figure 1-1 and Figure 1-2 show device block diagrams for the dsPIC30F4011 and dsPIC30F4012 devices.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F4011/4012

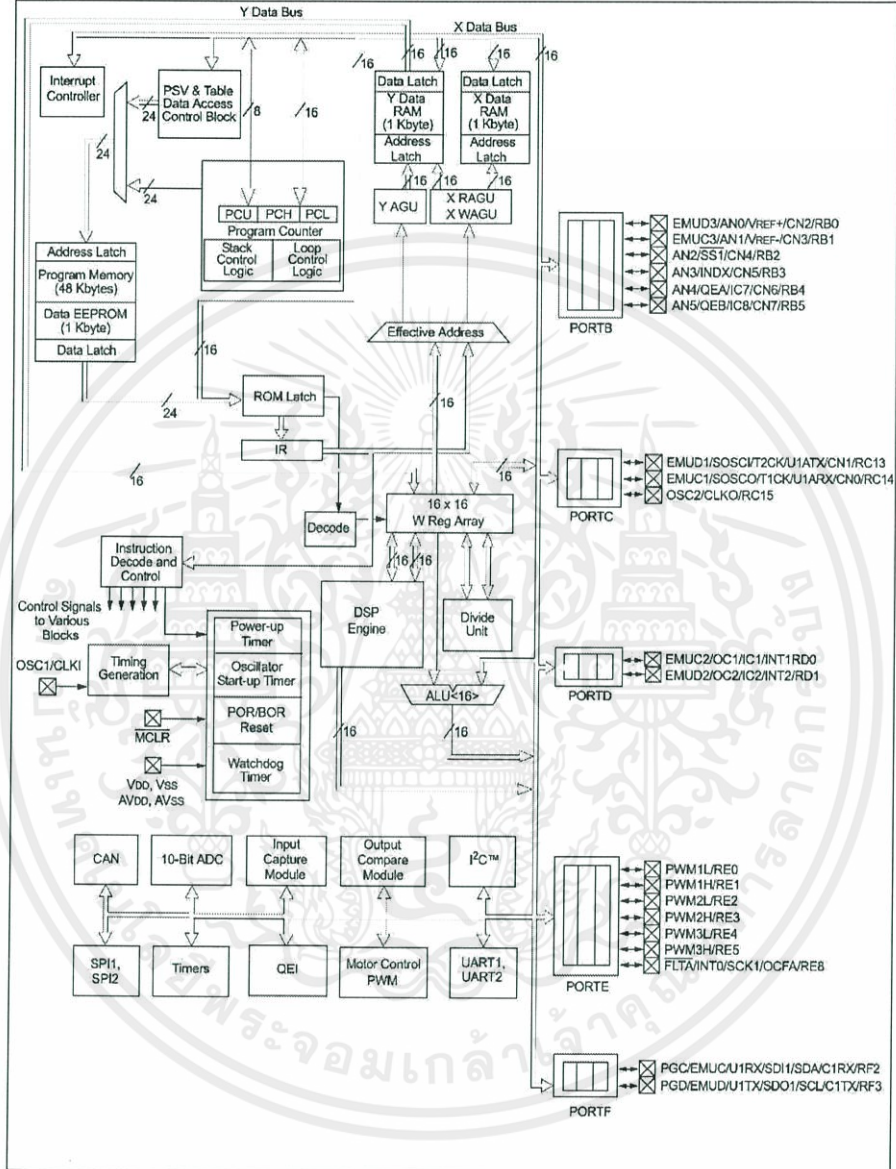
FIGURE 1-1: dsPIC30F4011 BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F4011/4012

FIGURE 1-2: dsPIC30F4012 BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F4011/4012

Table 1-1 provides a brief description of the device I/O pinout and the functions that are multiplexed to a port pin. Multiple functions may exist on one port pin. When multiplexing occurs, the peripheral module's functional requirements may force an override of the data direction of the port pin.

TABLE 1-1: dsPIC30F4011 I/O PIN DESCRIPTIONS

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
AN0-AN8	I	Analog	Analog input channels. AN0 and AN1 are also used for device programming data and clock inputs, respectively.
AVDD	P	P	Positive supply for analog module. This pin must be connected at all times.
AVSS	P	P	Ground reference for analog module.
CLKI CLKO	I O	ST/CMOS —	External clock source input. Always associated with OSC1 pin function. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes. Always associated with OSC2 pin function.
CN0-CN7 CN17-CN18	I	ST	Input change notification inputs. Can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.
C1RX C1TX	I O	ST —	CAN1 bus receive pin. CAN1 bus transmit pin.
EMUD EMUC	I/O I/O	ST ST	ICD Primary Communication Channel data input/output pin. ICD Primary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD1 EMUC1	I/O I/O	ST ST	ICD Secondary Communication Channel data input/output pin. ICD Secondary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD2 EMUC2	I/O I/O	ST ST	ICD Tertiary Communication Channel data input/output pin. ICD Tertiary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD3 EMUC3	I/O I/O	ST ST	ICD Quaternary Communication Channel data input/output pin. ICD Quaternary Communication Channel clock input/output pin.
IC1, IC2, IC7, IC8	I	ST	Capture inputs 1, 2, 7 and 8.
INDX QEA	I I	ST ST	Quadrature Encoder Index Pulse input. Quadrature Encoder Phase A input in QE1 mode.
QEB	I	ST	Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode. Quadrature Encoder Phase A input in QE1 mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode.
INT0 INT1 INT2	I I I	ST ST ST	External interrupt 0. External interrupt 1. External interrupt 2.
FLTA PWM1L PWM1H PWM2L PWM2H PWM3L PWM3H	I O O O O O O	ST — — — — — —	PWM Fault A input. PWM1 low output. PWM1 high output. PWM2 low output. PWM2 high output. PWM3 low output. PWM3 high output.
MCLR	I/P	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active-low Reset to the device.
OCFA OC1-OC4	I O	ST —	Compare Fault A input (for Compare channels 1, 2, 3 and 4). Compare outputs 1 through 4.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
I = Input P = Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F4011/4012

TABLE 1-1: dsPIC30F4011 I/O PIN DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
OSC1	I	ST/CMOS	Oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
OSC2	I/O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLK0 in RC and EC modes.
PGD	I/O	ST	In-Circuit Serial Programming™ data input/output pin.
PGC	I	ST	In-Circuit Serial Programming clock input pin.
RB0-RB8	I/O	ST	PORTB is a bidirectional I/O port.
8RC13-RC15	8I/O	8ST	PORTC is a bidirectional I/O port.
RD0-RD3	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port.
RE0-RE5, RE8	I/O	ST	PORTE is a bidirectional I/O port.
RF0-RF6	I/O	ST	PORTF is a bidirectional I/O port.
SCK1	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI1.
SDI1	I	ST	SPI1 data in.
SDO1	O	—	SPI1 data out.
SS1	I	ST	SPI1 slave synchronization.
SCL	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I ² C™.
SDA	I/O	ST	Synchronous serial data input/output for I ² C.
SOSCO	O	—	32 kHz low-power oscillator crystal output.
SOSCI	I	ST/CMOS	32 kHz low-power oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
T1CK	I	ST	Timer1 external clock input.
T2CK	I	ST	Timer2 external clock input.
U1RX	I	ST	UART1 receive.
U1TX	O	—	UART1 transmit.
U1ARX	I	ST	UART1 alternate receive.
U1ATX	O	—	UART1 alternate transmit.
U2RX	I	ST	UART2 receive.
U2TX	O	—	UART2 transmit.
VDD	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
Vss	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VREF+	I	Analog	Analog voltage reference (high) input.
VREF-	I	Analog	Analog voltage reference (low) input.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
 I = Input P = Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F4011/4012

Table 1-2 provides a brief description of the device I/O pinout and the functions that are multiplexed to a port pin. Multiple functions may exist on one port pin. When multiplexing occurs, the peripheral module's functional requirements may force an override of the data direction of the port pin.

TABLE 1-2: dsPIC30F4012 I/O PIN DESCRIPTIONS

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
AN0-AN5	I	Analog	Analog input channels. AN0 and AN1 are also used for device programming data and clock inputs, respectively.
AVDD	P	P	Positive supply for analog module.
AVSS	P	P	Ground reference for analog module.
CLKI CLKO	I O	ST/CMOS —	External clock source input. Always associated with OSC1 pin function. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes. Always associated with OSC2 pin function.
CN0-CN7	I	ST	Input change notification inputs. Can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.
C1RX C1TX	I O	ST —	CAN1 bus receive pin. CAN1 bus transmit pin.
EMUD	I/O	ST	ICD Primary Communication Channel data input/output pin.
EMUC	I/O	ST	ICD Primary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD1	I/O	ST	ICD Secondary Communication Channel data input/output pin.
EMUC1	I/O	ST	ICD Secondary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD2	I/O	ST	ICD Tertiary Communication Channel data input/output pin.
EMUC2	I/O	ST	ICD Tertiary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD3	I/O	ST	ICD Quaternary Communication Channel data input/output pin.
EMUC3	I/O	ST	ICD Quaternary Communication Channel clock input/output pin.
IC1, IC2, IC7, IC8	I	ST	Capture inputs 1, 2, 7 and 8.
INDX	I	ST	Quadrature Encoder Index Pulse input.
QEA	I	ST	Quadrature Encoder Phase A input in QE1 mode.
QEB	I	ST	Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode. Quadrature Encoder Phase A input in QE1 mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode.
INT0	I	ST	External interrupt 0.
INT1	I	ST	External interrupt 1.
INT2	I	ST	External interrupt 2.
FLTA	I	ST	PWM Fault A input.
PWM1L	O	—	PWM1 low output.
PWM1H	O	—	PWM1 high output.
PWM2L	O	—	PWM2 low output.
PWM2H	O	—	PWM2 high output.
PWM3L	O	—	PWM3 low output.
PWM3H	O	—	PWM3 high output.
MCLR	I/P	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active-low Reset to the device.
OCFA OC1, OC2	I O	ST —	Compare Fault A input (for Compare channels 1, 2, 3 and 4). Compare outputs 1 and 2.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
 I = Input P = Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F4011/4012

TABLE 1-2: dsPIC30F4012 I/O PIN DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
OSC1	I	ST/CMOS	Oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
OSC2	I/O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLK0 in RC and EC modes.
PGD	I/O	ST	In-Circuit Serial Programming™ data input/output pin.
PGC	I	ST	In-Circuit Serial Programming clock input pin.
RB0-RB5	I/O	ST	PORTB is a bidirectional I/O port.
RC13-RC15	8I/O	8ST	PORTC is a bidirectional I/O port.
RD0-RD1	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port.
RE0-RE5, RE8	I/O	ST	PORTE is a bidirectional I/O port.
RF2-RF3	I/O	ST	PORTF is a bidirectional I/O port.
SCK1	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI1.
SDI1	I	ST	SPI1 Data In.
SDO1	O	—	SPI1 Data Out.
SS1	I/O	ST	SPI1 Slave Synchronization
SCL	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I ² C™.
SDA	I/O	ST	Synchronous serial data input/output for I ² C.
SOSCO	O	—	32 kHz low-power oscillator crystal output.
SOSCI	I	ST/CMOS	32 kHz low-power oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
T1CK	I	ST	Timer1 external clock input.
T2CK	I	ST	Timer2 external clock input.
U1RX	I	ST	UART1 receive.
U1TX	O	—	UART1 transmit.
U1ARX	I	ST	UART1 alternate receive.
U1ATX	O	—	UART1 alternate transmit.
VDD	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
VSS	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VREF+	I	Analog	Analog voltage reference (high) input.
VREF-	I	Analog	Analog voltage reference (low) input.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
 I = Input P = Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****/

/* Hardware      : dsPIC30F4011    */
/* X-TAL         : 7.3728 MHz      */
/* Selec OSC Mode : XT w/PLL 16x   */

/*****/

/* Function   : Example Interface Character LCD */
/*****/

/* Character 16x2 4-Bit Mode Interface */
/* D4 = RE0   */
/* D5 = RE1   */
/* D6 = RE2   */
/* D7 = RE3   */
/* RS = RE4   */
/* EN = RE5   */

/*****/

#include <p30f4011.h> // dsPIC30F4011 MPU Register
#include <stdio.h>    // Used ftoa Function
#include "adc10.h"   // Used ADC Library Function

/* Setup Configuration For ET-BASE dsPIC30F4011 */
_FOSC(CSW_FSCM_OFF & XT_PLL16); // Disable Clock Switching ,
Enable Fail-Salf Clock , Clock Source = Primary XT + (PLL x 16)

_FWDT(WDT_OFF); // Disable Watchdog

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่สัญญา หรือเงื่อนไขใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

_FBORPOR(PBOR_OFF & PWRT_64 & MCLR_EN); // Disable Brown-Out ,Power ON =
64mS,Enable MCLR
_FGS(CODE_PROT_OFF); // Code Protect OFF
/* End Configuration For ET-BASE dsPIC30F4011 */

```

```
// Character LCD Interface Pins
```

```

#define TRIS_DATA_PIN_4 TRISEbits.TRISE0 // Direction D4
#define TRIS_DATA_PIN_5 TRISEbits.TRISE1 // Direction D5
#define TRIS_DATA_PIN_6 TRISEbits.TRISE2 // Direction D6
#define TRIS_DATA_PIN_7 TRISEbits.TRISE3 // Direction D7
#define TRIS_RS TRISEbits.TRISE4 // Direction RS
#define TRIS_E TRISEbits.TRISE5 // Direction E
#define DATA_PIN_4 LATEbits.LATE0 // RE0 = D4 LCD
#define DATA_PIN_5 LATEbits.LATE1 // RE1 = D5 LCD
#define DATA_PIN_6 LATEbits.LATE2 // RE2 = D6 LCD
#define DATA_PIN_7 LATEbits.LATE3 // RE3 = D7 LCD
#define RS_PIN LATEbits.LATE4 // RE4 = RS LCD
#define E_PIN LATEbits.LATE5 // RE5 = E LCD

```

```
/* Display ON/OFF Control */
```

```

#define DON 0x0F // Display on
#define DOFF 0x0B // Display off
#define CURSOR_ON 0x0F // Cursor on
#define CURSOR_OFF 0x0D // Cursor off
#define BLINK_ON 0x0F // Cursor Blink
#define BLINK_OFF 0x0E // Cursor No Blink

```

```

/* Cursor or Display Shift */
#define SHIFT_CUR_LEFT    0x13                // Cursor shifts to the left
#define SHIFT_CUR_RIGHT   0x17                // Cursor shifts to the right
#define SHIFT_DISP_LEFT   0x1B                // Display shifts to the left
#define SHIFT_DISP_RIGHT  0x1F                // Display shifts to the right

```

```

/* Function Prototypes */
void Initial_4bitLCD(void);                    // Initial LCD Interface
void SetCGRamAddr(unsigned char);
void SetDDRamAddr(unsigned char);             // Set Cursor Address
void WriteCmdLCD(unsigned char);              // Write Command
void WriteDataLCD(unsigned char);             // Write Data
void PutsLCD(unsigned char*);                 // Print Message
void Delay_tW_LCD(void);                       // Enable Pulse Delay
void Busy_LCD(void);                           // Wait LCD Busy
void Delay(unsigned long int);                 // Delay Time Function

```

```

/*Declare Variable*/
unsigned long adc_buff0,adc_buff1,z,v,i,Z,x,y;
unsigned int adc_count;
void int_adc(void);                            // Initial ADC Function

```

```

/*Main*/

```

```

int main(void)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned long value = 1000;
Initial_4bitLCD(); // Initial LCD 4 Bit Interface
init_adc(); // Initial ADC[0..3]

// Start Read ADC Continue //
while(1) // Loop Continue
{
WriteCmdLCD(0x01); // Clear Display (Clear Display,Set DD RAM Address=0)

ADCON1bits.SAMP = 1; // Start Sampling ADC NOW
while(!ADCON1bits.SAMP); // Wait Sampling Complete

ConvertADC10(); // Convert Result
while(BusyADC10()); // Wait Convert Result Complete

adc_buff0 = ReadADC10(1); // Read Voltage
adc_buff1 = ReadADC10(2); // Read Current

v = adc_buff0*10000/12.9493; // Convert Voltage
i = adc_buff1/10; // Convert Current
z = v/i; // Calculate Impedance

SetDDRamAddr(0x00); // Start Cursor Line-1
PutsLCD("Impedance Value"); // Show Cursor Line-1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
}

/*****/
/*   Initial ADC   */
/*****/

void init_adc()
{
    ADCON1bits.ADON = 0;           // Turn-OFF ADC Before Change
    Config
    SetChanADC10(    ADC_CHX_POS_SAMPLEA_AN0AN1AN2 &
                    ADC_CHX_NEG_SAMPLEA_NVREF ); // Set Channel
    ConfigIntADC10(ADC_INT_DISABLE);           // Dsiable ADC Interrupt
    OpenADC10(
    // Config1
        ADC_MODULE_ON &           // Turn-ON ADC Function
        ADC_IDLE_STOP &          // Stop ADC in IDLE Mode
        ADC_FORMAT_INTG &        // Result Format = Unsigned Integer
        ADC_CLK_AUTO &           // ADC Clock = Manual
        ADC_AUTO_SAMPLING_ON &   // Enable ADC Sampling
        ADC_SAMPLE_SIMULTANEOUS, // Sample Style = Simultaneous

        // Config2
        ADC_VREF_AVDD_AVSS &     // VDD=Vref(H),VSS=Vref(L)
        ADC_SCAN_ON &            // Enable Scan
        ADC_CONVERT_CH_0ABC & // Used ADC0 and ADC1 to Convert Result

```

```

        ADC_SAMPLES_PER_INT_2 &           // Number of Sample Between
Interrupt
        ADC_ALT_BUF_OFF &                 // Disable Alternate Buffer
        ADC_ALT_INPUT_OFF ,              // Disable Alternate Input

```

```

        // Config3
        ADC_SAMPLE_TIME_1 &              // Samplink Time = Fast
        ADC_CONV_CLK_INTERNAL_RC &      // Used Internal RC Clock
Sampling
        ADC_CONV_CLK_Tcy,                 // Conversion Clock = Fast

        ENABLE_AN0_ANA &                 // RB0 = analog
        ENABLE_AN1_ANA ,                 // RB1 = analog

        // ADC Config Scan = ON ADC0 , ADC3 and OFF ADC[124567]
        SKIP_SCAN_AN2 &                   // Disable Scan ADC1
        SKIP_SCAN_AN3 &                   // Disable Scan ADC2

        SKIP_SCAN_AN4 &                   // Disable Scan ADC4
        SKIP_SCAN_AN5 &                   // Disable Scan ADC5
        SKIP_SCAN_AN6 &                   // Disable Scan ADC6

        SKIP_SCAN_AN7                      // Disable Scan ADC7

```

```
);
```

```
}
```

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

```
/* Initial 4bitLCD */
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าวิธีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

```

void Initial_4bitLCD(void)
{
    TRIS_DATA_PIN_4 = 0;                // Set Port Direction =
Output
    TRIS_DATA_PIN_5 = 0;
    TRIS_DATA_PIN_6 = 0;
    TRIS_DATA_PIN_7 = 0;
    TRIS_RS = 0;
    TRIS_E = 0;
    RS_PIN = 0;                        // Instruction Select
    E_PIN = 0;                          // Disable Strobe
    Delay(50000);                        // Power-ON Delay
(minimum of 15ms)

    WriteCmdLCD(0x33);                  // Initial 4 Bit Interface Format
    WriteCmdLCD(0x32);
    WriteCmdLCD(0x28); // Function Set (DL=0 4-Bit,N=1 2 Line,F=0 5X7)
    WriteCmdLCD(0x0C); // Display on/off Control (Entry Display,Cursor off,Cursor not
Blink)
    WriteCmdLCD(0x06); // Entry Mode Set (I/D=1 Increment,S=0 Cursor Shift)
    WriteCmdLCD(0x01); // Clear Display (Clear Display,Set DD RAM Address=0)
}

/*****/

/* SetCGRamAddr Function*/

/*****/
void SetCGRamAddr(unsigned char address)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    RS_PIN = 0;                // Select Instruction
DATA_PIN_7 = 0;    // DB7 Must be 0 For Setting CGRam ADDR
DATA_PIN_6 = 1;    // DB6 Must be 1 For Setting CGRam ADDR
    DATA_PIN_5 = ((address & 0x20)>>5);
    DATA_PIN_4 = ((address & 0x10)>>4);

    E_PIN = 1;                // Strobe High Nibble
    Delay_tW_LCD();          // Enable Pulse Delay
    E_PIN = 0;
    Busy_LCD();
    RS_PIN = 0;                // Select Instruction
    DATA_PIN_7 = ((address & 0x08)>>3);
    DATA_PIN_6 = ((address & 0x04)>>2);
    DATA_PIN_5 = ((address & 0x02)>>1);
    DATA_PIN_4 = ((address & 0x01)>>0);
    E_PIN = 1;                // Strobe Low Nibble
    Delay_tW_LCD();          // Enable Pulse Delay
    E_PIN = 0;
    Busy_LCD();
}

/*****/

/* SetDDRamAddr Function*/

/*****/

void SetDDRamAddr(unsigned char address)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของการนำออกไปใช้

```

DATA_PIN_7 = 1;    // DB7 Must be 1 For Setting DDRam ADDR
    DATA_PIN_6 = ((address & 0x40)>>6);
    DATA_PIN_5 = ((address & 0x20)>>5);
    DATA_PIN_4 = ((address & 0x10)>>4);
    E_PIN = 1;                                           // Strobe High Nibble
    Delay_tW_LCD();                                     // Enable Pulse Delay
    E_PIN = 0;
    Busy_LCD();
    RS_PIN = 0;                                         // Select Instruction
    DATA_PIN_7 = ((address & 0x08)>>3);
    DATA_PIN_6 = ((address & 0x04)>>2);
    DATA_PIN_5 = ((address & 0x02)>>1);
    DATA_PIN_4 = ((address & 0x01)>>0);
    E_PIN = 1;                                           // Strobe Low Nibble
    Delay_tW_LCD();                                     // Enable Pulse Delay
    E_PIN = 0;
    Busy_LCD();
}

/*****/
/* WriteCmdLCD Function*/
/*****/

void WriteCmdLCD(unsigned char cmd)
{
    RS_PIN = 0;                                         // Select Instruction

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณิใดๆ DATA_PIN_6 = ((cmd & 0x40)>>6); ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DATA_PIN_5 = ((cmd & 0x20)>>5);
DATA_PIN_4 = ((cmd & 0x10)>>4);
E_PIN = 1; // Strobe High Nibble
Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
E_PIN = 0;
Busy_LCD();
RS_PIN = 0; // Select Instruction
DATA_PIN_7 = ((cmd & 0x08)>>3);
DATA_PIN_6 = ((cmd & 0x04)>>2);
DATA_PIN_5 = ((cmd & 0x02)>>1);
DATA_PIN_4 = (cmd & 0x01);
E_PIN = 1; // Strobe Low Nibble
Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
E_PIN = 0;
Busy_LCD();
Delay(50000); // 1.64mS Delay
}
/*****/
/* WriteDataLCD Function*/
/*****/
void WriteDataLCD(unsigned char data)
{
    RS_PIN = 1; // Select Data
    DATA_PIN_7 = ((data & 0x80)>>7);
    DATA_PIN_6 = ((data & 0x40)>>6);
    DATA_PIN_5 = ((data & 0x20)>>5);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DATA_PIN_4 = ((data & 0x10)>>4);
E_PIN = 1; // Strobe High Nibble
Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
E_PIN = 0;
Busy_LCD();

```

```

RS_PIN = 1; // Select Data
DATA_PIN_7 = ((data & 0x08)>>3);
DATA_PIN_6 = ((data & 0x04)>>2);
DATA_PIN_5 = ((data & 0x02)>>1);
DATA_PIN_4 = (data & 0x01);
E_PIN = 1; // Strobe Low Nibble
Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
E_PIN = 0;
Busy_LCD();

```

```

}

```

```

/*****

```

```

/* PutsLCD Function */

```

```

*****/

```

```

void PutsLCD(unsigned char* buffer)

```

```

{

```

```

    while(*buffer != '\0') // Loop Until End of Message

```

```

    {

```

```

        WriteDataLCD(*buffer); // Write Character to LCD

```

```

        buffer++;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

/*****/

/*Delay_tW_LCD Function*/
/*****/

void Delay_tW_LCD(void)                                // Enable Pulse Delay
{
    int i;
    for(i=0;i<18;i++);
}

/*****/
/*    Busy_LCD    */
/*****/
void Busy_LCD(void)                                    // 40uS Delay
{
    unsigned int i;
    for(i=0;i<1800;i++);
}

/*****/
/* Delay Time Function */
/*****/

void Delay(unsigned long int count1)

{
    while(count1 > 0) {count1--;}                    // Loop Decrease Counter
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าในรูปแบบใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****/
void Print4LCD(unsigned long value)
{
    unsigned char ibuff[11];
    ibuff[0] = (value/10000000)|'0';           // Ten Thousand
    ibuff[1] = ((value%10000000)/1000000)|'0'; //
    Thousand
    ibuff[2] = (((value%10000000)%1000000)/100000)|'0'; //
    Hundred
    ibuff[3] = (((((value%10000000)%1000000)%100000)/10000)|'0'; // Ten
    ibuff[4] = ((((((value%10000000)%1000000)%100000)%10000)/1000)|'0';
    // Last Digit
    ibuff[5] = '.'; // Point
    ibuff[6] =
    (((((value%10000000)%1000000)%100000)%10000)%1000)|'0';
    // Decimal Position 1
    ibuff[7] =
    ((((((value%10000000)%1000000)%100000)%10000)%1000)%100)|'0';
    // Decimal Position 2
    ibuff[8] =
    (((((((value%10000000)%1000000)%100000)%10000)%1000)%1000)%100)/10
    |'0'; // Decimal Position 3
    ibuff[9] =
    (((((((((value%10000000)%1000000)%100000)%10000)%1000)%1000)%100)%
    10)|'0'; // Decimal Position 4

```

```
ibuff[10] = 0;
```

```
// Force Zero
```

```
if(ibuff[0]!='0')ibuff[0]=' ';
```

```
// Show Space
```

Position 1

```
if((ibuff[0]!=' ')&&(ibuff[1]!='0'))ibuff[1]=' ';
```

```
// Show Space
```

Position 2

```
if((ibuff[1]!=' ')&&(ibuff[2]!='0'))ibuff[2]=' ';
```

```
// Show
```

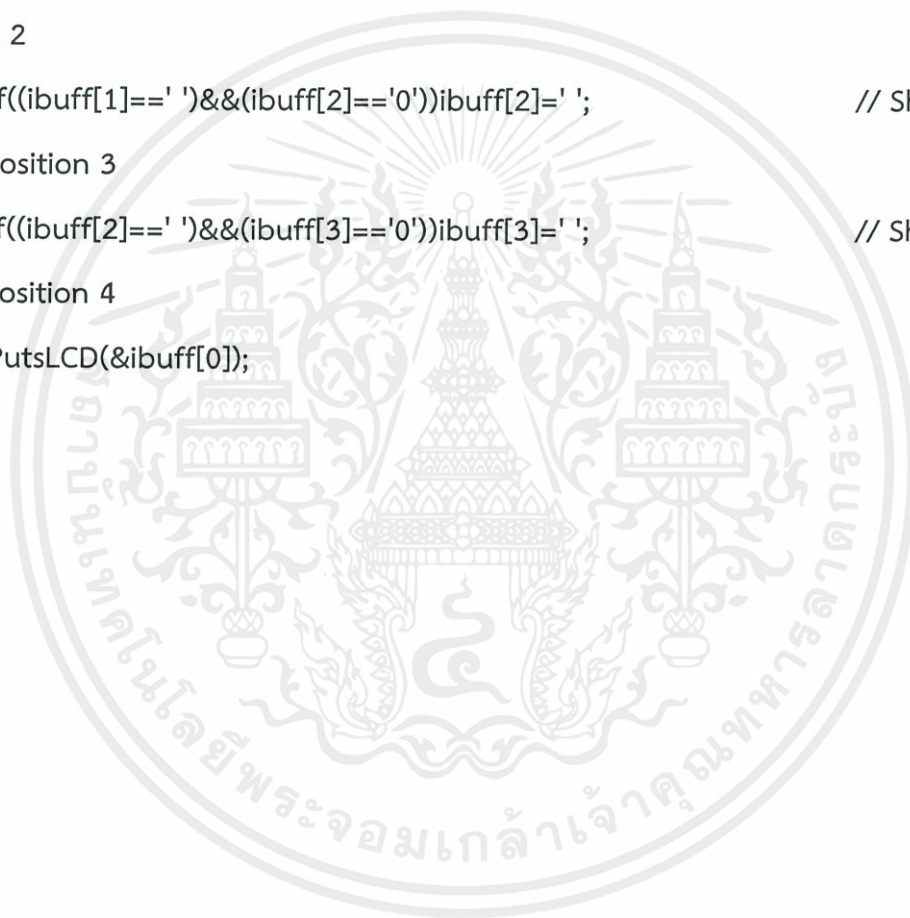
Space Position 3

```
if((ibuff[2]!=' ')&&(ibuff[3]!='0'))ibuff[3]=' ';
```

```
// Show
```

Space Position 4

```
PutsLCD(&ibuff[0]);
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นแบบเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวนด์

A PROTOTYPE OF GROUND-IMPEDANCE METER

ฉัตรชัย จิรพัชรศิริเลิศ¹ ชนกนันท์ หอนิรันดร์พงศ์¹ ชลวีร์ วัฒนกิจเจริญ¹ ชัยพงษ์ ลากอากาศรัตน์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 0-2739-2478

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบจนนำไปถึงการสร้างเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์สำหรับการใช้งานแบบพกพา โดยมีลักษณะเด่นคือสามารถทำการวัดได้ง่ายโดยไม่ต้องตัดต่อวงจรของสายกราวด์ สำหรับการออกแบบนั้นใช้กฎของโอห์มในการหาค่าอิมพีแดนซ์ โดยมีการเลือกใช้วงจรไฟฟ้าและไมโครคอนโทรลเลอร์ประกอบด้วย 1.) วงจรสร้างสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในสายกราวด์ผ่านแกนแม่เหล็กความถี่สูง 2.) วงจรวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งใช้หลักการของหม้อแปลงวัดกระแส (C.T) และ 3.) ประมวลผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะนำมาสู่การหาค่าอิมพีแดนซ์ และแสดงผลได้ทางจอ LCD พร้อมกันนี้ในอนาคตยังมีแนวคิดในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์ที่อยู่ไกลผ่านการส่งข้อมูลทางโครงข่ายไร้สาย ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

คำสำคัญ : ค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์

Abstract

This research represents a design conduce to create a portable Ground-Impedance meter. It dominate feature is easy to measure without disconnecting ground. A design use Ohm's law to calculate impedance value. Electrical circuits and microcontroller that use in this meter consist of 1.) sine wave signal generator circuit for induce voltage in ground loop through a high frequency magnetic core 2.) current measurement circuit which use principle of current transformer (CT) and 3.) process by using microcontroller which bring a result of impedance and show on LCD monitoring in the same time. In the future can be improved it's ability by transfer a data of ground impedance using wireless network that will make a much benefit for electrical engineering work.

Keyword: ground-impedance

1. บทนำ

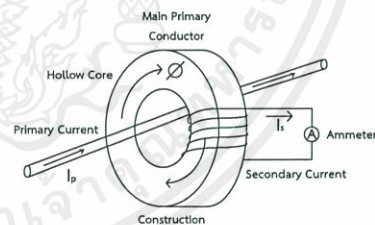
ในปัจจุบันได้มีการใช้ไฟฟ้าในงานระบบต่างๆมากขึ้น ซึ่งระบบเหล่านั้นจะมีการติดตั้งระบบกราวนด์ เพื่อป้องกันอันตรายแก่บุคคล และทรัพย์สิน จากการเกิดฟ้าผ่า การลัดวงจร ความผิดปกติอื่นๆ โดยระบบกราวนด์ดังกล่าวจะเป็นเส้นทางให้กระแสฟ้าผ่า กระแส

ช็อก กระแสลัดวงจร ไหลผ่านระบายลงสู่ดิน ถึงแม้ว่าจะทำการติดตั้งระบบกราวนด์เสร็จสิ้นแล้ว ก็ไม่ได้หมายความว่าระบบกราวนด์การเสียหายที่เดียว เนื่องจากฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงไปย่อมส่งผลให้ระบบกราวนด์มีการเปลี่ยนแปลงด้วย อีกทั้งยังมีปัจจัยภายนอกอื่นๆที่ส่งผลต่อระบบกราวนด์ด้วยเช่นกัน ทำให้ต้องทำการตรวจสอบค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวนด์อยู่เป็นระยะเพื่อตรวจสอบค่าอิมพีแดนซ์ว่ายังอยู่ในมาตรฐานหรือไม่ โดยในการวัดค่าอิมพีแดนซ์นั้นถ้าใช้เครื่องวัดระบบเก่าจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการวัดเนื่องจากต้องมีการตัดต่อวงจร ทำให้ต้องมีการหยุดใช้งานระบบไฟฟ้านั้นชั่วคราว ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเอาแนวคิดจากหลักการทำงานของแคลมป์บีมิเตอร์เข้ามาประยุกต์ใช้งานในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวนด์ต่างๆ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและหลักการการทำงานของหม้อแปลงเครื่องวัด

หม้อแปลงไฟฟ้านอกจากจะมีประโยชน์ทางด้าน การเพิ่มหรือลดแรงดันแรงดันไฟฟ้า แล้วยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานด้านการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะหลักการทำงานของหม้อแปลงกระแสเท่านั้น เนื่องจากการนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแรงดันเหนี่ยวนำ และวัดกระแส



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงเครื่องวัดกระแส

จากรูปที่ 1.1 เป็นโครงสร้างของวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงเครื่องวัดกระแส ซึ่งจะทำการวัดกระแสได้จากการนำแกนแม่เหล็กไปคล้องสายไฟที่ต้องการวัด ซึ่งจะได้อัตราส่วนของกระแส คือ

$$I_s = \left(\frac{N_p}{N_s}\right) I_p \quad (1)$$

โดยที่ N_p คือ จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (รอบ)

N_s คือ จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (รอบ)

I_p คือ ค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (แอมแปร์)

I_s คือ ค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ (แอมแปร์)

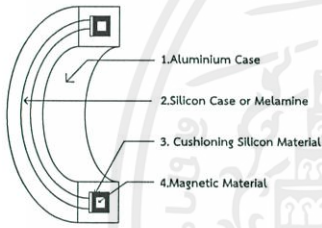
2.2 กฎของโอห์ม

กฎของโอห์ม เป็นกฎที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และ ความต้านทานโดยกฎของโอห์มกล่าวว่า “กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรแปรผัน โดยตรงกับแรงดันที่ป้อนและ แปรผกผันกับความต้านทานในวงจร” โดยสามารถนำมาเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$V = IR \quad (2)$$

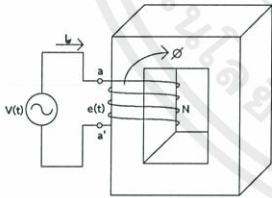
2.3 ทฤษฎีแกนแม่เหล็กความถี่สูง [5]

แกนแม่เหล็กมีหน้าที่หลักคือ เป็นเส้นทางเดินหลักสำหรับ เส้นแรงแม่เหล็กในการเชื่อม โยงระหว่างอุปกรณ์แม่เหล็ก โดยที่ความแตกต่างระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำ (50 หรือ 60 Hz) และหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง (ในหลักกิโลเฮิร์ตซ์หรือมากกว่านั้น) จะขึ้นอยู่กับ ชนิดเนื้อสารของแกนแม่เหล็กที่ใช้ โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำจะใช้ แกนเหล็ก (iron core) ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะใช้แกน เฟอร์ไรต์ (ferrite) เป็นต้น ตัวอย่างของแกนแม่เหล็กตามภาพที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพตัดของแกนแม่เหล็กชนิดพันเป็นแถบ (TWC)

2.4 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ [4]



รูปที่ 2.2 การกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับในวงจรแม่เหล็ก

รูปที่ 2.2 แสดงการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday’s Law) จะสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Voltage) ในขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กที่มีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ N รอบ จากความสัมพันธ์

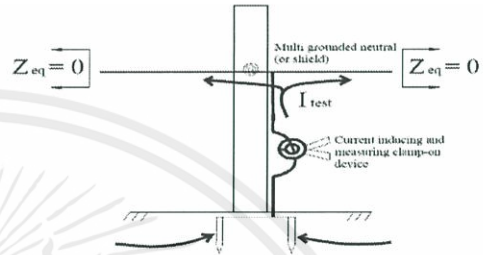
$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ในอนกาศอื่นนำไปใช้โดยไม่ขออนุญาต
และหาค่า RMS ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้จาก

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{max} \quad (4)$$

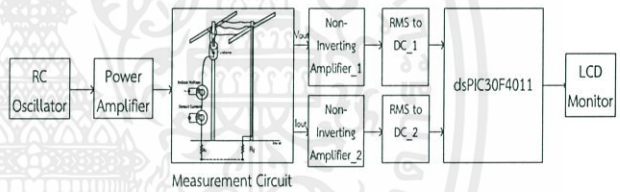
2.5 มาตรฐานของเครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน [6]

เครื่องมือวัดแบบแคลมป์ออนทำการวัดค่าความต้านทานของแท่งหลักดิน โดยการแคลมป์เข้ากับสายตัวนำหลักดิน เครื่องวัดแบบแคลมป์ออนจะเหนี่ยวนำแรงดันด้วยค่าความถี่ที่กำหนด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 3.4 กิโลเฮิร์ตซ์ แรงดันเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสที่ไหลภายในระบบซึ่งจะถูกทำการวัดค่าโดยเครื่องมือวัด โดยรูปที่ 2.3 แสดงการแคลมป์ของเครื่องมือวัดในการวัดค่าความต้านทานดิน



รูปที่ 2.3 การวัดค่าความต้านทานดิน โดยวิธีการแคลมป์ออน

3. การออกแบบและประกอบสร้าง



รูปที่ 3.1 ลำดับการทำงานในวงจรเครื่องมือวัด

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์

ในการออกแบบของเครื่องมือวัดความต้านทานดินนั้น จะมีองค์ประกอบอยู่ 5 อย่างดังรูปที่ 3.1 ได้แก่

1. วงจรสร้างแรงดัน (วงจร RC Oscillator และวงจร Power Amplifier)
2. วงจรตรวจวัดความต้านทานของสายกราวด์
3. วงจรขยายแรงดันแบบ ไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)
4. วงจรแปลงค่าแรงดันรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (RMS to DC Converter)
5. วงจรการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จากไมโครคอนโทรลเลอร์

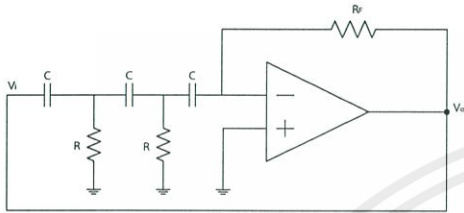
3.1 วงจรไฟเลี้ยง

ในส่วนของวงจรไฟเลี้ยงจะประกอบด้วยหม้อแปลง เพื่อแปลงค่าแรงดันให้เป็น 12,0-12 V จากนั้นนำมาผ่านวงจรเรียงกระแส และตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้แรงดันกระแสตรง สุดท้ายจึงกักค่าแรงดันให้เหลือ 9,0,-9 โดยใช้โวลต์เตจเรกูเลเตอร์

3.2 วงจรสร้างแรงดัน

3.2.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ [2]

ในส่วนของวงจรสร้างแรงดันนั้น ได้ใช้วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (RC Oscillator) ดังรูปที่ 3.2 สามารถทำได้โดยการใช้วงจรถ่ายที่มีอัตราขยายสูง เช่น อปแอมป์ (Op-amp) และความถี่ของวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์สามารถควบคุมได้โดยการปรับค่าความต้านทาน (R) และค่าความจุไฟฟ้า (C)



รูปที่ 3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์

3.2.2 วงจรขยายกำลังของสัญญาณ

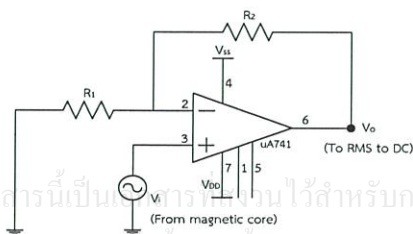
วงจรถ่ายกำลังที่นำมาใช้นี้เป็นวงจรถ่ายกำลังอย่างง่ายที่ใช้กันทั่วไปในงานประเภทการนำไปขยายเสียงในรถยนต์และมอเตอร์ไซค์ที่ใช้ไอซี UTC/TDA2003 โดยมีพิสัยการขยายกำลังไฟฟ้าสูงถึง 10 วัตต์ และใช้ไฟเลี้ยง 9-12 โวลต์ ที่โหลดขนาด 4 โอห์ม เป็นแบบ class D

3.3 วงจรตรวจวัดความต้านทานของสายกราวด์

แกนแม่เหล็กที่ใช้ในการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า จะเป็นแกนซึ่งได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัทคัมเวลล์ (Kumwell) โดยมีแกนแม่เหล็กอยู่ 2 แกน เพื่อไว้สำหรับการสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าโดยใช้หลักการของหม้อแปลงวัดกระแส

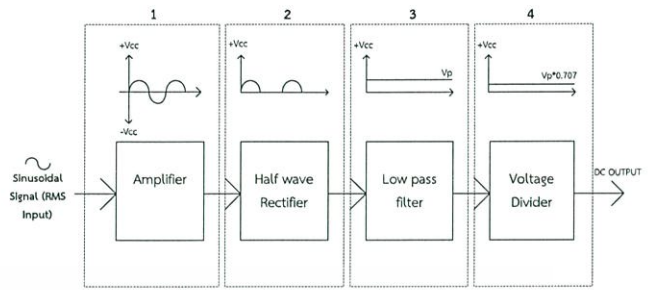
3.4 วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส

รูปที่ 3.3 แสดงวงจรเพื่อขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส โดยสัญญาณที่ออกจากแกนเหล็กทั้งในส่วนของวงจรถ่ายแรงดัน และวงจรวัดกระแส เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำมาประมวลผลได้ เพราะแรงดันและกระแสที่ใช้นั้นมีค่าที่น้อยมากในระดับมิลลิโวลต์



รูปที่ 3.3 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

3.5 วงจรเปลี่ยนแรงดัน RMS เป็น แรงดัน DC [3]

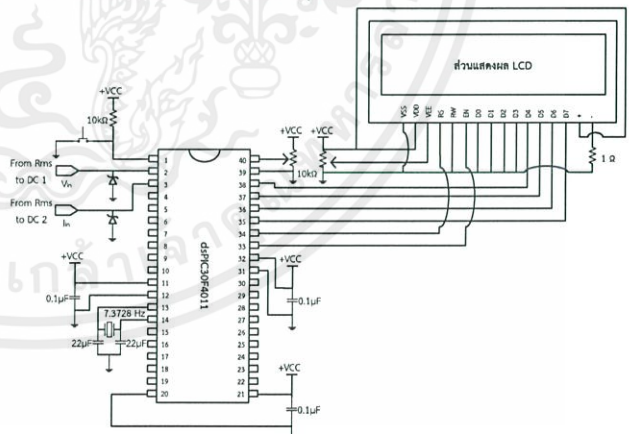


รูปที่ 3.4 บล็อกโคโตะแกรมการทำงาน

ในวงจรนี้จะเปลี่ยนค่าแรงดัน RMS เป็นแรงดัน DC โดยใช้ TL074 เพื่อจะทำให้ง่ายต่อการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยรูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการทำงานของวงจร

3.6 วงจรการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ [1]

ส่วนของวงจรถ่ายค่าจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ในการรับค่าสัญญาณอะนาล็อกที่ได้จากการวัด คือแรงดันและกระแส แล้วนำมาแปลงเป็นสัญญาณเป็นดิจิทัลเพื่อใช้ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์ ในที่นี้เลือกไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น dsPIC30F4011 เพราะสามารถคำนวณได้ทั้งสองค่าพร้อมกัน โดยแสดงวงจรถ่ายค่าอิมพีแดนซ์ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรคำนวณค่าและแสดงผล

4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์จำลอง

สำหรับค่าความต้านทานที่ได้มานั้นจะมาจากค่าการคำนวณในวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ที่มีชื่อว่า dsPIC30F4011 จากนั้นจะแสดงผลออกทางจอแอลซีดี (LCD Monitor) และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดคิมิเตอร์ (Multi-meter) ยี่ห้อ SANWA, FLUKE และ YOKOGAWA

ตารางที่ 1 ผลการทดลองของค่าความต้านทานที่วัดได้จาก ไมโครคอนโทรลเลอร์เทียบกับเครื่องมือวัดยี่ห้อต่าง

R ที่วัดได้จาก ต้นแบบ เครื่องมือวัด (Ω)	R ที่วัดได้จาก Multimeter ยี่ห้อ SANWA (Ω)	R ที่วัดได้จาก Multimeter ยี่ห้อ FLUKE (Ω)	R ที่วัดได้จาก Multimeter ยี่ห้อ YOKOGAWA (Ω)
Low Impedance	0.2	0.1	0.12
1.0157	1.1	1.2	0.98
2.0015	2.1	2.3	1.97
3.0357	3.1	3.2	2.97
4.2536	4.1	4.2	3.96
4.9798	4.9	5.2	4.95
High Impedance	6.0	6.2	5.95

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานจากต้นแบบ เครื่องมือวัดในช่วง 1-5 โอห์มนั้น ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัด ยี่ห้อต่างๆ ถ้าความต้านทานที่ได้้นั้นต่ำกว่า 1 โอห์ม เครื่องมือวัดจะแสดง สถานะ “Low Impedance” นั่นคือระบบกราวด์ใช้งานได้ดี แต่ถ้าความ ต้านทานที่ได้้นั้นมากกว่า 5 โอห์ม เครื่องมือวัดจะแสดงสถานะ “High Impedance” นั่นคือระบบกราวด์ใช้งานไม่ได้ ต้องทำการปรับปรุงต่อไป

6. สรุปผลการทดลอง

หลังจากที่ได้ทำการสร้างเครื่องมือวัดอิมพีแดนซ์กราวด์ ตาม ขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ โดยได้ทำการทดลองต่างๆเพื่อประกอบสร้างวงจร ในแต่ละส่วนขึ้นมา ก็ได้พบกับปัญหาบางอย่างเกี่ยวกับการทำงานของ อุปกรณ์ต่างๆ และข้อจำกัดของวงจรในการทำงาน แต่ก็สามารถสร้าง ต้นแบบเครื่องมือวัดอิมพีแดนซ์กราวด์ขึ้นมาได้อย่างประสบผลสำเร็จ ความวัดอุปกรณ์ที่ต้องการ

7. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ หากไม่ได้รับการสนับสนุน และคำปรึกษาจาก ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินทไหว อาจารย์ที่ปรึกษา คุณอรธณพจากบริษัท คัมเวล จำกัด ในการอนุเคราะห์ เครื่องวัดความต้านทานดินมาให้ศึกษา คุณนครศักดิ์ แสงศรี ที่คอยให้ยืม อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการทุกอย่าง ห้องศูนย์วิจัยและวิศวกรรมส่องสว่าง (ESIRC) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลอง ที่เจตต์ และพี่มิกซ์ ที่สละเวลา มากคอยสอน รวมถึงให้คำปรึกษาทุกอย่าง จึงขอขอบคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัททีทีที จำกัด, คู่มือการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรล-เลอร์รุ่น ET-BASE dsPIC30F2010/4011 (ออนไลน์), แหล่งที่มา: <http://ett.co.th/product2009/ET-PIC/man%20ET-BASE%20dsPIC30.pdf>
- [2] Chulalongkorn Electronic Laboratory, 2551, การทดลองเรื่องวงจร กำเนิดสัญญาณ (ออนไลน์), แหล่งที่มา: pioneer.netserv.chula.ac.th/~tarpom/384/LabSheet/OSC.pdf, 10 มกราคม 2557
- [3] ณัฐพนธ์ จงฤกษ์มิ่งคล และบัณฑิต ชินผา, RMS-to-DC Converter, THE BEST OF PROJECTS, 353-366 (2554): 83-96
- [4] พิชิต ล้ายอง, เครื่องจักรกลไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554
- [5] วีระเชษฐ ชันจิน และ วุฒิพล ชาริธีรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ หจก.วี.เจ.พรินต์ติ้ง, 2547
- [6] IEEE STANDARDS ASSOCIATION, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System”, IEEE Std 81™-2012, P 19-30, 2012



ประวัติผู้เขียนบทความ ฉัตรชัย จิรพัชรศิริเลิศ จบการศึกษจากโรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย ปัจจุบัน ศึกษาระดับปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)



ประวัติผู้เขียนบทความ ชนกันันท์ หอนิรันดร์พงศ์ จบการศึกษจากโรงเรียนอัสสัมชัญศรีราชา ปัจจุบัน ศึกษาระดับปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)



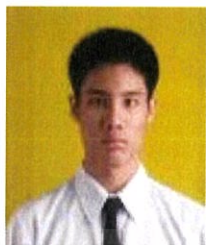
ประวัติผู้เขียนบทความ ชลวีร์ วัฒนกิจเจริญ จบการศึกษจากโรงเรียนกรุงเทพคริสเตียนวิทยาลัย ปัจจุบัน ศึกษาระดับปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)



ประวัติผู้เขียนบทความ ชัยพงษ์ ลากอากาศร์น จบการศึกษจากโรงเรียนสมุทรสาครวิทยาลัย ปัจจุบัน ศึกษาระดับปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายฉัตรชัย จิรพัชรศิริเลิศ (ต่อ)

975/27-28 ต.เมืองใต้ อ.เมือง จ.ศรีสะเกษ 33000

โทรศัพท์ 085-4130625

e-mail : manu_31674@hotmail.com

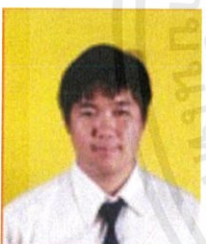


นายชนกนันท์ หอนิรันดรพงศ์ (กัน)

207/2 ถ.พัทลุง ต.ทับเที่ยง อ.เมือง จ.ตรัง 92000

โทรศัพท์ 087-3211440

e-mail : gan_chanoknun@hotmail.com

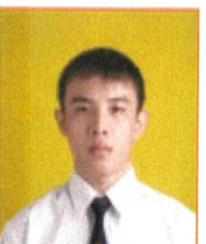


นายชลวีร์ วัฒกีเจริญ (เปา)

43 ซ.ท่านเจริญ สุขุมวิท81 พระโขนง วัฒนา จ.กรุงเทพมหานคร 10260

โทรศัพท์ 085-9837583

e-mail : burapa_arsura@hotmail.com



นายชัยพงษ์ ลาภอารรัตน์ (ปุ)

7/1 ม.8 ต.หนองบัว อ.บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร 74120

โทรศัพท์ 085-372-4675

e-mail : chaiyaphong01@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้