

ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

ปริญญานิพนธ์

ของ

พ.อ.อ.ประสงค์ สืบชาติ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา
เมษายน 2545
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

456.82

ปี ๒๕๔๖

๑.๒

ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

บทคัดย่อ

ของ

พ.อ.อ.ประสงค์ สืบชาติ

- 2 ๓.๓ 2545

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา

เมษายน 2545

๒.๑๔๙๑๓๐

ประสงค์ สืบชาติ (2545). **ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า.**

ปริญญาพนธ์ กศ.ม. (อุตสาหกรรมศึกษา). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม : ดร. ไพรัช วงศ์ยุทธไกร ,

ผศ.ดร. วีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา.

การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ เป็นแรงดันสูง 1,500 โวลต์ และวงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล 1.0 , 1.5 มิลลิแอมป์ พร้อมชุดแสดงผล เป็นตัวอักษร แสดงบนจอ แอลซีดี และสามารถตั้งเวลาทดสอบได้ 4 ระดับ คือ 5 , 10 , 60 , 90 วินาที ผู้วิจัยออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าขึ้น เพื่อใช้ทดแทนเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยดำเนินการสร้างและทดลองดังนี้

1. ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าและ ได้นำเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ไปทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าดังนี้

1.1 แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์

1.2 เวลาทดสอบ 5 , 10 , 60 , 90 วินาที

1.3 กระแสรั่วไหล 1.0 , 1.5 มิลลิแอมป์

ผลปรากฏเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้เหมือนกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน

2. ผู้วิจัยได้ส่งอุปกรณ์เปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ไปสอบเทียบที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้รับใบรับรองการสอบเทียบ หมายเลข ซีเอสอาร์ 0105 / 02 โดยได้ผลการสอบเทียบดังนี้

2.1 ความเที่ยงตรง ในการทดสอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ

ย่านวัด	กำหนดค่า กระแสต้านออก	ค่าที่วัดได้	ความคลาด เคลื่อน
1 มิลลิแอมป์	1 มิลลิแอมป์ 50 เฮิตซ์	1.000 มิลลิแอมป์	0.1 %
1.5 มิลลิแอมป์	1.5 มิลลิแอมป์ 50 เฮิตซ์	1.500 มิลลิแอมป์	0.1 %
3 มิลลิแอมป์	3 มิลลิแอมป์ 50 เฮิตซ์	3.001 มิลลิแอมป์	0.1 %
4 มิลลิแอมป์	4 มิลลิแอมป์ 50 เฮิตซ์	3.998 มิลลิแอมป์	0.1 %

3. ผู้เชี่ยวชาญได้ประเมินสมรรถนะของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า 5 ด้านดังนี้

3.1 สมรรถนะทางด้านวิศวกรรม มีความเหมาะสมดีมาก สามารถใช้หลักการทางด้านวิศวกรรมทำการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยใช้กฎของโอห์ม ใน

วงจรแบ่งกระแส เพื่อตรวจสอบกระแสรั่วไหล และใช้กฎการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า ของฟาราเดย์ ในการ ออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง

3.2 สมรรถนะทางด้านความปลอดภัย มีความเหมาะสมปานกลาง มีระบบป้องกันไฟฟ้าผิดปกติและระบบป้องกันอันตรายโดยใช้ฟิวส์

3.3 สมรรถนะทางด้านกายภาพ มีความเหมาะสมดีเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า สามารถถอดแยกชิ้นส่วนได้ และมีโครงสร้างที่คงทนแข็งแรงต่อการใช้งาน และเคลื่อนย้าย

3.4 สมรรถนะทางการใช้งาน มีความเหมาะสมดีในการใช้งานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ใช้งานได้สะดวก สามารถอ่านค่าได้เป็นตัวอักษร เพราะแสดงผลบนจอแอลซีดี

3.5 สมรรถนะทางการบำรุงรักษา มีความเหมาะสมดีเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า มีจุดที่ต้องบำรุงรักษาน้อยและอุปกรณ์สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดราคาถูก

DESIGN AND CONSTRUCTION OF ELECTRICAL INSULATION TESTING DEVICE.

AN ABSTRACT

BY

FS.1 PRASONG SUEBCHART

Presented in partial fulfillment of the requirements for the Master of
Education degree in Industrial Education
at Srinakharinwirot University
April 2002

Prasong Suebchart (2002). ***Design and Construction of Electrical Insulation Testing Device***

Master thesis, M.Ed. (Industrial Education) Bangkok: Graduate School,

Srinakharinwirot University. Advisor committee: Dr. Pairust Vongyuttakrai

Assist. Prof. Dr. Threraphon Thephasadin Na Ayuthya

This study was about the design and construction of an electrical insulation-testing device by using a transformer to enhance power voltage of the device from 220 volts to 1,500 volts. The circuit of leakage was tested 1.0 and 1.5 mA. The result was shown on LCD monitor. The circuit leakage was also tested in 4 levels at 5, 10, 60, and 90 seconds. The researcher built the electrical insulation-testing device in order to replace imported devices. The procedures used in the design and construction of the device are the following:

1.Design and construct the electrical insulation-testing device and subject it to test and compare it with other electrical insulation-testing devices, which are available from local factories. The following values were assigned:

1.1 Voltage test	1,500 Volt.
1.2 Time test	5 , 10 , 60 , 90 Sec.
1.3 Current test	1.0 ,1.5 mA.

The result shows that the electrical insulation-testing device is comparable to other testing devices.

2.The electrical insulation-testing device was sent for calibration at the National Institute of Metrology.(Reference: CSR No. 0105 / 02), the calibrating results were as follows:

AC Current source accuracy test.

Range	Setting Output	Measured Value	Uncertainty
1 mA	1 mA @ 50 Hz	1.000 mA	0.1 %
1.5 mA	1.5 mA @ 50 Hz	1.500 mA	0.1 %
3 mA	3 mA @ 50 Hz	3.001 mA	0.1 %
4 mA	4 mA @ 50 Hz	3.998 mA	0.1 %

3. Experts verified the performance of the electrical insulation-testing device in five categories.

3.1 Engineering performance: The experts verified the engineering performance of the device and found it to be at an excellent level. The electrical insulation-testing device used the appropriate engineering method of designing. The electrical insulation-testing device was constructed by using Ohm's Law in the current divider circuit to inspect the leakage current and induce voltage of Faraday's Law to design and construct high voltage transformer.

3.2 Safety performance: The experts verified the safety performance of the device and found it to be at a moderate level. The electrical insulation-testing device has an electrical protection system by using a fuse.

3.3 Physical performance: The experts verified the physical performance of the device and found it to be at a good level. The electrical insulation-testing device is durable and can be assembled and disassembled by parts.

3.4 Usage performance: The experts verified the usage performance of the device and found it to be at a good level. The electrical insulation-testing device is convenient to use. The result of its performs can be shown on LCD monitor.

3.5 Maintenance performance: The experts verified the maintenance performance of the device and found it to be at a good level. The electrical insulation-testing device has few parts to maintain and these are not expensive and are available in the local market.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

ของ

พ.อ.อ. ประสงค์ สืบชาติ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพร หะวานนท์)
วันที่ ๒๐ เดือน มกราคม พ.ศ. ๒๕๕๕

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธาน
(อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ ดร.อุพิทย์ สุวคันธกุล)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ โอภาส สุขหวาน)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงด้วยดีจากความเมตตากรุณาจากท่านอาจารย์ ดร. ไพรัช วงศ์ยุทธไกร ประธานกรรมการควบคุม และ ผศ.ดร. ชีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา กรรมการควบคุม อาจารย์ ดร. อุปวิทย์ สุกันทรกุล และ อาจารย์ โอภาส สุขหวาน กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาพร้อมทั้งให้คำแนะนำ แก่ไขดุแลให้กำลังใจและให้ข้อเสนอแนะ ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สุดใจ เห่งศรีไพร อาจารย์ ดร. ละเอียด วัชรเฝ้า ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบ ค่าโครงปริญญานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะต่างๆ ให้แนวคิดรวมไปถึงกำลังใจในการดำเนินงาน เพื่อให้งาน วิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณวิทยา พานิชตระกูล กรรมการผู้อำนวยการ บริษัท ฮาดารี อิเลคทริค จำกัด ที่ ท่านได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์ ให้ใช้พื้นที่ของบริษัท ในการสร้างและทดลองเก็บข้อมูลเครื่องมือที่ผู้วิจัยออกแบบและสร้างขึ้น

ขอขอบพระคุณ น.อ. ประดิษฐ์ จิตรรัตน์ ร.อ. สาคร สานส่งศักดิ์ และคุณ คมสัน ศักดิ์ศรีวัฒนา ที่กรุณา ให้ความช่วยเหลือ ในการออกแบบและสร้างเครื่อง พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะต่างๆในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับ นี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอน้อมรำลึกถึงพระคุณ บิดา – มารดา ครู – อาจารย์ อันเป็นที่เคารพรักอย่างสูง ที่ท่านได้ให้ ความรู้ กำลังใจ กำลังทรัพย์ และผู้ที่ลืมไม่ได้คือ นางสาว ภาริณี สิบชาติ พยาบาลระดับ 6 โรงพยาบาลพนัส นิคม เป็นผู้ให้กำลังใจและกำลังทรัพย์ตลอดมา นางสาว พรรณีภา สิบชาติ นางสาว นงลักษณ์ สิบชาติ ใต้ให้ ความช่วยเหลือสนับสนุนในทุกๆด้าน ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จนสำเร็จลงได้ อันพระคุณนี้หาที่เปรียบ มิได้

พ.อ.อ. ประสงค์ สิบชาติ

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ.....	1
	ภูมิหลัง	1
	ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
	ความสำคัญของการวิจัย.....	2
	ขอบเขตของการวิจัย.....	2
	นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
	กรอบแนวความคิดในการวิจัย.....	4
	สมมุติฐานในการวิจัย.....	4
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
	เครื่องใช้ไฟฟ้าและความปลอดภัย.....	5
	พลังงานไฟฟ้า.....	5
	เครื่องใช้ไฟฟ้า.....	5
	อันตรายที่เกิดจากการนำไฟฟ้าไปใช้งาน.....	5
	ความปลอดภัย.....	5
	ฉนวนและการตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า.....	6
	ฉนวนไฟฟ้า.....	6
	การตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าในด้านทนแรงดันสูง.....	6
	ทฤษฎีพื้นฐานแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
	การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
	กฎของการเหนี่ยวนำ.....	7
	กฎของแรง.....	8
	กฎของแอมแปร์.....	8
	วงจรแม่เหล็ก.....	9
	แรงเคลื่อนแม่เหล็ก.....	9
	เส้นแรงแม่เหล็ก.....	9
	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก.....	10
	สภาพความซึมซาบและความต้านทานของแม่เหล็ก.....	10
	ทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์.....	11
	โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า.....	11
	การพันขดลวด.....	12
	ทฤษฎีและหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	13
	หม้อแปลงที่ใช้ตามความเป็นจริง.....	17
	วงจรไฟฟ้า – อิเล็กทรอนิกส์.....	24
	ทรานซิสเตอร์และการไบแอส.....	26

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
2 (ต่อ)	ออปแอมป์.....27 การออกแบบวงจรไฟฟ้า – อิเล็กทรอนิกส์.....39 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า.....39 ออกแบบวงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล.....41 ออกแบบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....41 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....42 มาตรฐานผลิตภัณฑ์โดยทั่วไป.....42 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.934-2533.....43 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....44	
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....46 เกณฑ์ข้อกำหนดการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวน ของเครื่องใช้ไฟฟ้า.....46 การออกแบบเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า.....46 ลำดับขั้นตอนการวิจัย.....47 รับรู้ปัญหาของการตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า.....49 ศึกษารายละเอียดต่างๆที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบ ความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า.....49 ศึกษาวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ.....49 การออกแบบวงจรในส่วนต่างๆที่ใช้สร้างเครื่องตรวจสอบ ความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า.....50 กำหนดวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ.....55 กำหนดระยะเวลาสถานที่ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่อง ตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า.....57 กำหนดคุณสมบัติกรรมการตรวจสอบรูปแบบและการใช้เครื่อง ตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า.....57 การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า.....57 ทดลองการทำงานของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า.....58	
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล62 ผลการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวน ของเครื่องใช้ไฟฟ้า.....62 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการเปรียบเทียบมาตรฐาน79 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบประเมินของผู้เชี่ยวชาญ79	

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5	
สรุป อภิปรายผล ข้อเสนอแนะ	80
สรุปผลการวิจัย	81
อภิปรายผล	84
ข้อเสนอแนะ	85
บรรณานุกรม	86
ภาคผนวก	88
ภาคผนวก ก. หนังสือขอความร่วมมือเพื่อการวิจัย	89
ภาคผนวก ข. หนังสือรับรองผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัย	92
ภาคผนวก ค. รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์	96
ภาคผนวก ง. ภาพประกอบเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า	121
ภาคผนวก จ. คู่มือการใช้อุปกรณ์เปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องตรวจสอบความเป็น ฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า	128
ภาคผนวก ฉ. ใบประกาศนียบัตรรับรองอุปกรณ์เปรียบเทียบมาตรฐาน เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าจากสถาบัน มาตรวิทยาแห่งชาติ	133

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงผลการทดสอบพัฒนา.....	58
2 แบบตรวจประเมินตามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ.....	60
3 แสดงผลการทดสอบพัฒนา.....	63
4 การทดสอบพัฒนา.....	64
5 การทดสอบพัฒนา.....	65
6 การทดสอบพัฒนา.....	66
7 การทดสอบพัฒนา.....	67
8 การทดสอบพัฒนา.....	68
9 การทดสอบพัฒนา.....	69
10 การทดสอบพัฒนา.....	70
11 การทดสอบพัฒนา.....	71
12 การทดสอบพัฒนา.....	72
13 การทดสอบพัฒนา.....	73
14 การทดสอบพัฒนา.....	74
15 การทดสอบพัฒนา.....	75
16 การทดสอบพัฒนา.....	76
17 การทดสอบพัฒนา.....	77
18 การทดสอบพัฒนา.....	78
19 ผลการสอบเทียบ.....	82

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กรอบแนวความคิดในการวิจัย.....	4
2 การต่อเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า.....	7
3 (a) แสดงถึงกฎของ Ampere (b) แสดงถึงทิศทางของแรง F.....	9
4 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากจากแท่งแม่เหล็ก.....	10
5 การแบ่งชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	12
6 แบบของการพันขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า.....	13
7 หลักการเบื้องต้นของหม้อแปลง.....	13
8 การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux Distribution).....	15
9 การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า.....	16
10 แสดง Flux Wave.....	17
11 แสดงปรากฏการณ์ของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	19
12 รูปเวกเตอร์ของหม้อแปลง.....	20
13 พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก.....	22,50
14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส.....	24
15 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....	25
16 วงจรกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์.....	26
17 การไบแอสทรานซิสเตอร์.....	26
18 แสดงวงจรอิมิตเตอร์ร่วม.....	27
19 วงจรสมมูลออปแอมป์.....	28
20 สัญญาณลักษณะของออปอแมป์.....	29
21 วงจรขยายสัญญาณกลับทาง.....	30
22 วงจรขยายสัญญาณไม่กลับทาง.....	31
23 วงจรขยายความแตกต่าง.....	32
24 วงจรรวมกลับทาง.....	34
25 วงจรอินทิเกรเตอร์.....	35
26 วงจรอนุพันธ์.....	37
27 วงจรติดตามศักย์ไฟฟ้า.....	38
28 วงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล.....	41,53
29 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	42,55
30 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	48

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ประเทศไทยจัดอยู่ในประเทศที่กำลังพัฒนา ซึ่งประชากรส่วนใหญ่ของประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรม รัฐบาลพยายามเปลี่ยนจากประเทศเกษตรกรรมให้เป็นประเทศอุตสาหกรรม โดยรัฐบาลพยายามจัดโครงการสนับสนุนหลายโครงการ เช่นการจัดเขตพื้นที่อุตสาหกรรมโดยสำนักงานส่งเสริมการลงทุน ได้ให้สิทธิพิเศษทางด้านภาษีแก่โรงงานที่สร้างอยู่ในเขตพื้นที่อุตสาหกรรม นอกจากนี้ประเทศไทยยังเสียดุลการค้ากับต่างประเทศจำนวนปีละหลายพันล้านบาท โดยเฉพาะในหมวดของเครื่องใช้ไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2543 ประเทศไทยมียอดนำเข้าสินค้าห้าหมื่นกว่าล้านบาท (การเงินธนาคาร. 2543:68-71) ปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมากในประเทศไทย และใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศ โดยเฉพาะเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง (ทรงวุฒิ พานิช .2542:1) และส่วนใหญ่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ประเทศไทยต้องเสียดุลการค้า

ประเทศไทยยังเป็นประเทศผู้บริโภคนวัตกรรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทั้งนี้เพราะประเทศไทยขาดแคลนบุคลากรทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบกับรัฐบาลมีงบประมาณสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาน้อยมาก ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้สถาบันนานาชาติที่จัดอันดับความสามารถในการแข่งขันระดับสากล (International Institute for Management Development. IMD) จัดลำดับความสามารถในการแข่งขันด้านวิทยาศาสตร์ให้อยู่ในลำดับสุดท้ายคือลำดับที่ 47 ถึงแม้รัฐบาลพยายามสนับสนุน บุคลากรด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แต่ขบวนการส่งเสริมไม่ครบวงจร ยังขาดการสนับสนุนด้านงบประมาณงานศึกษาและวิจัย (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ . 2544 : -7) รัฐบาลจึงมีนโยบายในการพัฒนาบุคลากรทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยการอาศัยความร่วมมือทั้งภาครัฐและเอกชน ให้สนับสนุนงานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อสร้างรากฐานการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศอย่างจริงจัง (ธนพล วีราสา . 2544 : 8-10)

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นต่อชีวิตมนุษย์ มนุษย์พยายามพัฒนาเพื่อยกระดับความเป็นอยู่ให้ดีขึ้นก็ย่อมมีความต้องการใช้พลังงานมากขึ้นเป็นเงาตามตัว พลังงานไฟฟ้าก็เป็นพลังงานรูปหนึ่งที่สำคัญมนุษย์ในปัจจุบัน และความต้องการในรูปพลังงานนี้ก็มากขึ้นในอัตราส่วนที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและสะดวกในการใช้งาน จึงมีการพัฒนาระบบการผลิต การส่ง และการจ่ายพลังงานไฟฟ้ากันอย่างกว้างขวาง โดยพยายามจะให้ผู้ใช้งานสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าได้ตลอดเวลา ซึ่งการจัดเช่นนี้เป็นลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งของพลังงานไฟฟ้า คือผู้ใช้จะสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าได้ทันทีเช่น ต้องการใช้แสงสว่างก็สามารถกดสวิตช์เปิดไฟฟ้า หรือต้องการพลังงานขับเคลื่อนก็สามารถกดสตาร์ทมอเตอร์เป็นต้น (ชัชชัย สุมิตร. 2525 : 1) ไฟฟ้านับเป็นพลังงานที่สำคัญยิ่ง ประชาชนต้องนำไปประกอบกิจการมากมาย อาทิ เช่น บ้านพักอาศัย อาคารพาณิชย์ และโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับการใช้ระบบไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องควบคู่ไปกับเรื่องความปลอดภัย กฎเกณฑ์หรือข้อบังคับต่าง ๆ ก็เป็นสิ่งจำเป็นที่ผู้ใช้ควรได้รับรู้ ในเรื่องของความปลอดภัย (Safety) ความปลอดภัยยังช่วยทำให้อายุของอุปกรณ์ไฟฟ้ายืนยาวขึ้นและที่สำคัญยิ่งจะต้องไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อบุคคล สิ่งที่จะช่วยให้ปลอดภัยคือการเลือกใช้อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ได้มาตรฐานตามข้อกำหนดมอก. ซึ่งถ้าเครื่องใช้ไฟฟ้าได้มาตรฐานตามมอก.กำหนดแล้ว จะได้รับสัญลักษณ์ตัวSประทับที่ตัวสินค้าเพื่อสร้างความน่าเชื่อถือ

ถือว่าปลอดภัย (ธนบูรณ์ ศศิภาณุเดช. 2530 :1) มอก.934-2533 เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมที่กล่าวถึงความปลอดภัยในหมวดพัฒลัมไฟฟ้าการใช้ไฟฟ้าอย่างปลอดภัยนั้นสิ่งที่สำคัญคือฉนวน เพราะว่าเป็นวัสดุที่ไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านได้ ยิ่งฉนวนยิ่งดีไฟฟ้าที่แรงดันสูงก็ไม่สามารถไหลผ่านได้ ซึ่งส่วนที่เป็นฉนวนก็คือส่วนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่เราสามารถสัมผัสได้ ตรงกันข้ามกับตัวนำเป็นส่วนที่เราไม่สามารถสัมผัสได้เพราะตัวนำคือวัสดุที่ไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ ดังนั้น กระทรวงอุตสาหกรรมจึงออกพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมในหมวดของความปลอดภัย กำหนดให้เครื่องใช้ไฟฟ้าต้องผ่านการตรวจสอบความเป็นฉนวน โดยการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าที่จำหน่ายในประเทศต้องผ่านเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวน โดยปัจจุบันบริษัทที่ผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าต้องใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนที่นำมาจากต่างประเทศ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะออกแบบสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า พร้อมคู่มือการใช้งานเพื่อมาทดแทนเครื่องตรวจสอบที่มีใช้อยู่ โดยนำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยให้มีประสิทธิภาพตามเกณฑ์การสอบเทียบ การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้านี้จะใช้วงจรไฟฟ้าจากวงจรพื้นฐานแบบง่ายแต่มีประสิทธิภาพสูงในการใช้งานและใช้งานง่ายแสดงผลทางจอภาพ (LCD) เป็นตัวอักษรซึ่งต่างจากของต่างประเทศที่ใช้วงจรที่ยุ่งยากสลับซับซ้อนและใช้อุปกรณ์พิเศษที่ไม่มีจำหน่ายตามท้องตลาด

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตามเกณฑ์การสอบเทียบความเป็นฉนวนของมอเตอร์พัฒลัมไฟฟ้า

ความสำคัญของการวิจัย

ได้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปใช้ตรวจสอบกับเครื่องใช้ไฟฟ้า ตามเกณฑ์การสอบเทียบที่แรงดันไฟฟ้า 1,500 โวลต์ และสามารถทดแทนการนำเข้าเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนจากต่างประเทศ

ขอบเขตของการวิจัย

ผู้วิจัยออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าตามเกณฑ์การสอบเทียบ และตัวแปรที่ศึกษาคงนี้

1. สร้างไฟฟ้าแรงดันสูง 1,500 โวลต์
2. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.0 และ 1.5 มิลลิแอมป์
3. เวลาที่ใช้ทดสอบ 5 , 10 , 30 , 60 , 90 วินาที
4. ประสิทธิภาพตามเกณฑ์การสอบเทียบ
5. การประเมินผลของผู้เชี่ยวชาญสมรรถนะ 5 ด้านดังนี้
 - 5.1 สมรรถนะด้านวิศวกรรม
 - 5.2 สมรรถนะด้านความปลอดภัย
 - 5.3 สมรรถนะด้านกายภาพ

5.4 สมรรถนะด้านการใช้งาน

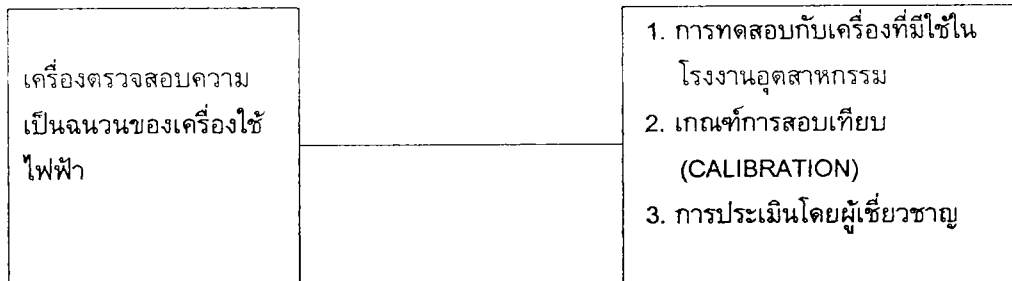
5.5 สมรรถนะด้านการบำรุงรักษา

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. การออกแบบเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า หมายถึง การกำหนดลักษณะวงจรของอุปกรณ์ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสัมพันธ์กับการใช้ของวัสดุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้สามารถใช้ในการตรวจสอบความเป็นฉนวนได้
2. การสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวน หมายถึง การประกอบวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกัน และบรรจุลงในกล่องโดยจัดให้มีความสัมพันธ์กันตามแบบที่กำหนดไว้
3. เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวน หมายถึง เครื่องมือที่สามารถพิจารณาหาข้อมูลเครื่องใช้ไฟฟ้ามีความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า
4. ฉนวน หมายถึง วัสดุต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า, วัสดุที่ใช้ห่อหุ้มตัวนำเพื่อไม่ให้ไฟฟ้าทำอันตรายต่อผู้ที่มาสัมผัส
5. ความเป็นฉนวน หมายถึง การที่กระแสไฟฟ้าไม่สามารถ ไหลผ่านวัตถุหรืออุปกรณ์นั้นๆ ได้
6. เครื่องใช้ไฟฟ้า หมายถึง เครื่องมือ, เครื่องจักรและเครื่องอำนวยความสะดวกต่างๆ ที่ใช้กำลังไฟฟ้าเป็นกำลังงานหลักให้อุปกรณ์ต่างทำงาน
7. แรงดัน หมายถึง ความต่างศักย์หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปอีกตำแหน่งหนึ่งได้ มีหน่วยเป็นโวลท์
8. กระแสไฟฟ้า หมายถึง การเคลื่อนตัวของประจุไฟฟ้า อัตราการไหลของประจุไฟฟ้า ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อวินาที หรือแอมแปร์
9. ความต้านทาน หมายถึง ความพยายามที่ไม่ยอมให้ประจุไฟฟ้าไหลผ่าน
10. เวลาที่ใช้ทดสอบ หมายถึง การกำหนดช่วงที่ใช้ทดสอบ ซึ่งจะช่วยให้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนพิจารณาได้ว่าเครื่องใช้ไฟฟ้ามีความปลอดภัยต่อการใช้งานหรือไม่
11. เกณฑ์การสอบเทียบ หมายถึง อุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าสามารถตรวจสอบกระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.0 และ 1.5 มิลลิแอมป์ โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.1 %
12. สมรรถนะด้านวิศวกรรม หมายถึง มีคุณค่าทางด้านวิศวกรรมและนวัตกรรมใหม่ ใช้หลักวิศวกรรมในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ได้อย่างเหมาะสม ใช้หลักการและทฤษฎีในการสร้างเครื่องอย่างถูกต้อง ใช้เทคโนโลยี และอุปกรณ์ในการสร้างและใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม
13. สมรรถนะด้านความปลอดภัย หมายถึง มีระบบป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าผิดปกติหรือจากการใช้งาน
14. สมรรถนะด้านกายภาพ หมายถึง ความสามารถถอดและแยกอุปกรณ์ของเครื่องได้ ความแข็งแรงของโครงสร้าง การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม
15. สมรรถนะด้านการใช้งาน หมายถึง ขั้นตอนการใช้งานของเครื่องได้อย่างเหมาะสม ใช้เวลาในการตรวจสอบ, ความสะดวก, การเคลื่อนย้ายทำได้ง่าย
16. สมรรถนะด้านการบำรุงรักษา หมายถึง อุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษาหาซื้อได้ง่ายราคาถูก มีจุดตรวจและซ่อมบำรุงน้อย

กรอบแนวความคิดในการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้สร้างกรอบความคิดไว้ดังนี้



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวความคิดในการวิจัย

สมมุติฐานในการวิจัย

เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีประสิทธิภาพ ตามเกณฑ์การสอบเทียบ

บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษา เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. เครื่องใช้ไฟฟ้าและความปลอดภัย
2. ฉนวนและการตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า
3. ทฤษฎีพื้นฐานแม่เหล็กไฟฟ้า
4. ทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์
5. การออกแบบวงจรไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์
6. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมตามเกณฑ์การสอบเทียบ
7. เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. เครื่องใช้ไฟฟ้าและความปลอดภัย

1.1 พลังงานไฟฟ้า ไฟฟ้าเป็นพลังงานชนิดหนึ่ง เป็นส่วนประกอบที่มีอยู่ในวัตถุธาตุทุกชนิด ตามข้อพิสูจน์ทางวิทยาศาสตร์ย่อมเป็นที่ทราบกันแล้วว่า วัตถุธาตุชนิดต่างๆที่มีอยู่ในโลกประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆที่เรียกว่า “ อะตอม ” ในแต่ละอะตอมประกอบด้วยโปรตอน นิวตรอน และ อิเล็กตรอนอยู่มากมาย สำหรับโปรตอนและนิวตรอนนั้นอยู่นิ่งไม่เคลื่อนไหว ส่วนอิเล็กตรอนนั้นสามารถที่จะ “ เคลื่อนไหว ” จากอะตอมหนึ่งไปอีกอะตอมหนึ่งได้ การเคลื่อนไหวจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่งของอิเล็กตรอนนี้เองคือสิ่งที่เราเรียกว่าไฟฟ้า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ได้มาจากโรงจักรไฟฟ้า(การไฟฟ้าฝ่ายผลิต)และแบตเตอรี่ ตามปกติไฟฟ้าจะไหลไปตามเส้นลวดที่เรียกว่า “ ตัวนำไฟฟ้า ” ซึ่งจะเป็นตัวนำพลังงานไฟฟ้ามาให้เราใช้ประโยชน์

1.2 เครื่องใช้ไฟฟ้า หมายถึง เครื่องอำนวยความสะดวก , เครื่องมือและเครื่องใช้ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นตัวให้กำลังงานในปัจจุบันจะเห็นได้ว่า เครื่องมือหรือสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆใช้ไฟฟ้าเป็นตัวให้กำลังงานทั้งสิ้นเพราะพลังงานไฟฟ้าสามารถนำมาใช้งานได้งานสะดวกและเป็นพลังงานสะอาดจึงมีผู้นิยมใช้มาก ในต่างประเทศพยายามดัดแปลงนำพลังงานไฟฟ้ามาทดแทนน้ำมันเช่นรถไฟฟ้า เป็นต้น

1.3 อันตรายที่เกิดจากการนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้งาน ไฟฟ้าทำอันตรายต่อชีวิตได้อย่างไร อันตรายจะบังเกิดขึ้น เมื่อร่างกายบังเอิญเข้าไปแตะและต่อกับส่วนหนึ่งในวงจรไฟฟ้า หรือต่อครบวงจรทำให้ไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย และการที่ร่างกายกลายเป็นส่วนหนึ่งในวงจรไฟฟ้าอาจเนื่องมาจากบังเอิญเข้าไปถูกระหว่างสายสองสาย หรือเข้าไปถูกสายไฟฟ้าเพียงจุดเดียว และในขณะเดียวกันนั้น ร่างกายส่วนใดส่วนหนึ่งแตะอยู่กับพื้นดิน หรือแตะกับวัตถุอื่นซึ่งติดต่อกับพื้นดิน จึงทำให้ร่างกายถูกกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ทำให้ได้รับอันตราย

1.4 ความปลอดภัย ไฟฟ้าจัดอยู่ว่าเป็นพลังงานที่มีคุณอนันต์แต่ก็มีโทษมหันต์ ถ้าใช้ผิดวิธีหรือขาดความระมัดระวัง ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2184 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 5211 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ความปลอดภัยของเครื่องใช้ไฟฟ้า มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนดความปลอดภัยของเครื่องใช้ไฟฟ้า การป้องกัน การสัมผัสส่วนที่มีไฟฟ้าและการเกิดความร้อน กระแสไฟฟ้ารั่วไหลและความทนแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิใช้งาน

ความทนความชื้นอ้างอิง ไออีซี 335 – 1 (1991) International Electrotechnical Commission (IEC 335 – 1 ; 1991)

ตาราง 1 ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อร่างกาย

ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย (มิลลิแอมป์)	ผลต่อร่างกาย
• น้อยกว่า 0.5 • 0.5 ถึง 2.0 • 2.0 ถึง 10.0	• ยังไม่รู้สึกล • รู้สึกบ้าง • กล้ามเนื้อหดกระตุกปานกลางถึงรุนแรง
• 10.0 ถึง 25.0	• เจ็บปวดไม่สามารถปล่อยให้หลุดออกได้
• 25.0 ถึง 50.0 • 50.0 ถึง 100.0	• กล้ามเนื้อหดกระตุกรุนแรง • หัวใจเต้นผิดปกติ (เต้น อ่อนหรือเร็ว)
• 100.0 ขึ้นไป	• หยุดหายใจ เนื้อหนังไหม้ เสียชีวิต

ตาราง 2 สภาวะความต้านทานของร่างกาย

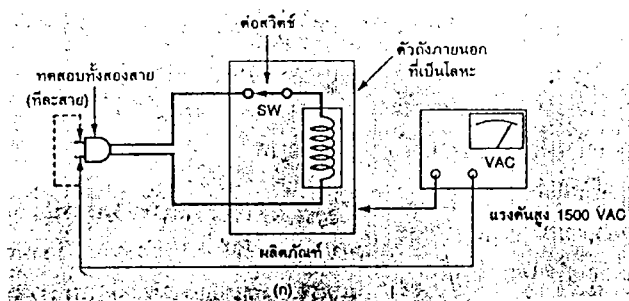
บริเวณของร่างกาย	ความต้านทาน (โอห์ม / ดร.ชม.)
ผิวหนังแห้ง	100,000 ถึง 600,000
ผิวหนังเปียก	1,000
ภายในร่างกายมือถึงเท้า	400 ถึง 6,000
หูถึงหู	100

2. ฉนวน และการตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.1 ฉนวนไฟฟ้า หมายถึง วัสดุที่มีคุณสมบัติในการกันหรือขัดขวางต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือวัสดุที่กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านได้ง่าย เช่นยาง ไฟเบอร์พลาสติก ฯลฯ ในชีวิตประจำวันได้นำฉนวนมาใช้ประโยชน์มาก โดยเฉพาะทางด้านความปลอดภัยเพะใช้ในการป้องกันกระแสไฟฟ้าไหลมาสัมผัสผู้ถูกร่างกายจะเห็นว่าเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในประเทศไทยจะต้องผ่านการทดสอบความทนและความเป็นฉนวนที่ดี โดยเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรมดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.2. การตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ในด้านการทนแรงดันสูง การตรวจสอบความทนฉนวนต่อไฟฟ้าแรงดันสูง(dielectric strength) การทดสอบความทนต่อไฟฟ้าแรงดันสูงจะใช้แรงดัน

ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1,500 โวลต์ ทำการทดสอบระหว่างตัวถังชั้นนอกของผลิตภัณฑ์ที่เป็นโลหะที่สามารถจับตัวหรือสัมผัสได้กับปลั๊กไฟทางด้านอินพุตที่จะต่อเข้ากับไฟบ้าน ดังแสดงในรูปที่ 2



ภาพประกอบ 2 การต่อเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า

โดยการทดสอบเริ่มจากแรงดันไฟฟ้าไม่เกินครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าทดสอบแล้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าทดสอบเป็นเวลา 1 นาที โดยต่อสวิตช์ของผลิตภัณฑ์ด้วย และผลิตภัณฑ์นั้นจะต้องไม่เกิดอาการกระโดดของประกายไฟ(spark) และจะต้องไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการทดสอบแต่อย่างใด ในที่นี้เรากำหนดเป็นกระแสรั่วไหล ถ้าเกิดมีการกระโดดของอิเล็กตรอนจะมีการไหลโดยกำหนดค่ากระแสรั่วไหลต้องไม่เกิน 1 มิลลิแอมป์

3. ทฤษฎีพื้นฐานแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1 การเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ฟาราเดย์ (Faraday)ได้ทำการทดลอง และค้นพบความจริงเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงผ่านขดลวดนั้นไปมา การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นได้จากวิธีการดังต่อไปนี้ วิธีที่1.โดยการให้ตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กที่หยุดนิ่งอยู่กับที่ วิธีที่2.โดยการให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ ตัดผ่านตัวนำที่หยุดอยู่กับที่ วิธีที่3.โดยการเปลี่ยนจำนวนของเส้นแรงของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดนั้น

วิธีที่หนึ่งนั้นนำไปใช้ในการทำเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าตรง วิธีที่สอง ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ และวิธีที่สามใช้กับการเหนี่ยวนำขดลวดและหม้อแปลงไฟฟ้า ถ้าหากพิจารณาว่าขดลวดนั้น เป็นหน่วยที่ให้กำเนิดกำลังไฟฟ้า แทนที่จะคิดว่าเป็นตัวนำตัวเดียว หรือด้านหนึ่งของขดลวดเท่านั้น วิธีทั้งสามข้างบนนี้ เป็นกฎของการตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux cutting rule)

3.2 กฎของการเหนี่ยวนำ ในปี 1831 ฟาราเดย์ (Faraday) ได้ค้นพบกฎเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า ต่อมาภายหลัง เลนซ์ (Lenz) ได้ทำการศึกษา และสรุปกฎเหล่านี้คือ กฎข้อที่หนึ่งเรียกว่า กฎของเลนซ์ (Lenz) ส่วนกฎข้อที่สอง เป็นกฎของ ฟาราเดย์(Faraday) ดังต่อไปนี้

กฎข้อที่ 1 ของเลนซ์(Lenz's Law) กล่าวว่า ในวงจรปิดใดๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสในวงจร ย่อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในวงจรมานั้นโดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสในวงจรมานั้นๆ

กฎข้อที่ 2 ของฟาราเดย์(Faraday's Law) กล่าวว่า การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของขดลวดหรือลูป(loop)อันหนึ่งนั้น เป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมขดลวดนั้นๆ หรือการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ระหว่างปลายของแท่งตัวนำอันหนึ่งนั้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการที่ตัวนำตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กนั้นๆ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

3.3 กฎของแรง(Force' law) กฎนี้ได้ค้นพบโดย คูลอมบ์(Coulomb) จึงเรียกว่ากฎของคูลอมบ์(Coulomb's Law) ซึ่งกล่าวว่าแรงระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้วนั้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแรงของขั้วแม่เหล็กทั้งสอง และเป็นสัดส่วนผกผันกับกำลังสองของระยะทางที่อยู่ระหว่างขั้วทั้งสองนั้น โดยเขียนเป็นสมการได้จากคำจำกัดความ ดังนี้

$$F = k (m_1 m_2 / r^2) \quad (3.3.1)$$

เมื่อ F = แรงระหว่างขั้วแม่เหล็กทั้งสอง

r = ระยะทางขั้วแม่เหล็กทั้งสอง

m_1 และ m_2 = ความแรงของขั้วแม่เหล็กทั้งสอง

k = เป็นค่าคงที่ของตัวกลาง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง และ

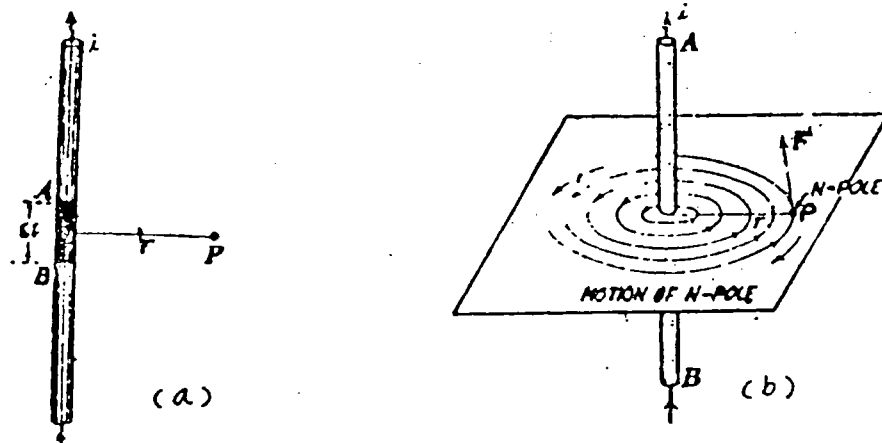
ยังเกี่ยว ข้องกับหน่วยของความแรงของขั้วแม่เหล็กที่ใช้ อาทิ เช่น ค่า $k = 1$ เมื่อ F มีหน่วยเป็น dynes, r เป็นเซนติเมตร และมีตัวกลางเป็นอากาศ

3.4 กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) กล่าวว่าแรงของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหนึ่งหน่วยของขั้วแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟที่ไหลผ่านตัวนำอันหนึ่งกระทำกับหนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กที่ระยะหนึ่งนั้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของตัวนำ และจำนวนกระแสที่ไหลผ่านตัวนำนั้น แต่เป็นสัดส่วนผกผันยกกำลังสองของระยะทางที่ตั้งฉากจากหนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กไปยังตัวนำนั้น ดังรูป 2.(a) จากคำจำกัดความของสมการ (3.4.1)

$$df \propto i \, dl / r^2 \quad (3.4.1)$$

$$df = i \, dl / 4\pi r^2 \quad (3.4.2)$$

เมื่อ 4π เป็น ค่าคงที่ของตัวที่เป็นสัดส่วนกับแรงที่เกิดขึ้น ทิศทางของแรงนี้ตั้งฉากกับระนาบซึ่งผ่านตัวนำและเส้นตรงที่ต่อเชื่อมระหว่างจุด P ไปยังความยาว dl (ดูภาพประกอบ 3) กฎของแอมแปร์(Ampere) นี้ไม่สามารถพิสูจน์โดยตรงได้ แต่ก็แสดงให้เห็นจากการทดลอง



ภาพประกอบ 3 (a) แสดงถึงกฎของ Ampere (b) แสดงถึงทิศทางของแรง F

3.5 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit) เราทราบแล้วว่าเมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนั้น

$$\text{เส้นแรงแม่เหล็ก} = \text{แรงเคลื่อนแม่เหล็ก} / \text{ความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็ก} \quad (3.5.1)$$

$$(\text{Magnetic flux ; } \phi) = (\text{Magnetomotive force ; m.m.f}) / (\text{Reluctance ; } R)$$

$$\text{m.m.f} = \phi R \quad (3.5.2)$$

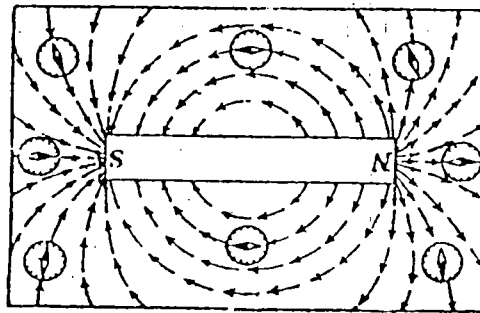
3.6 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force = m.m.f) คือพลังงานรูปหนึ่งที่ใช้ในการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กให้วิ่งรอบวงจรแม่เหล็กหนึ่งรอบ หรืออาจพิจารณาว่าเป็นความสามารถในการทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดใดขดลวดหนึ่ง m.m.f ในวงจรแม่เหล็กนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดกับจำนวนรอบ (turn) ของขดลวด และมีหน่วยเป็น แอมป์-รอบ (Amp-turn.)

$$F = \text{m.m.f} = NI \quad (3.6.1)$$

เมื่อ N = จำนวนรอบของขดลวด

I = กระแสเป็น ampere.

3.7 เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux ; ϕ) คือ เส้นแรงที่เกิดจากแม่เหล็กส่งอำนาจความเป็นแม่เหล็กออกมารอบตัวมันเอง ดังภาพประกอบ 3 โดยมีทิศทางของเส้นแรงวิ่งจากขั้วเหนือ (N) ไปยังขั้วใต้ (S) ภายนอกแม่เหล็ก และวิ่งจากขั้วใต้ (S) ไปยังขั้วเหนือ (N) ภายในแม่เหล็ก



ภาพประกอบ 4 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแท่งแม่เหล็ก.

3.8 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Intensity of magnetic field ; H) ก็คือความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ออกแรงกระทำกับหนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Amptum /metre หรือ Amp/metre สำหรับในตัวกลางที่เป็นอากาศหรืออื่นๆ นั้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กนั้น(field intensity) มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B (flux density ; B)นั้นคือ

$$B = \mu H$$

เมื่อ B มีหน่วยเป็น Weber/ m^2

μ คือ สภาพการซึมซาบของแม่เหล็ก (permeability) ไม่มีหน่วย

H คือ field intensity หรือ magnetic potential gradient

หรือเรียกว่า m.m.f gradient ก็ได้

3.9 สภาพการซึมซาบ และความต้านทานของแม่เหล็ก (Permeability and Reluctance คือ μ และ R) สภาพการซึมซาบของแม่เหล็ก ก็คือ ตัวกลาง ตัวหนึ่งที่สามารถทำให้เกิดสนาม หรือเส้นแรงแม่เหล็กได้มากน้อยแตกต่างกันไป ค่า μ เมื่อเป็นอากาศนั้นเท่ากับ 1 ค่า μ นี้ยังแสดงไว้ในรูปอัตราส่วนของ B / H ด้วยโดยที่ B เป็น flux density และ H เป็น field intensity

$$\therefore B = \mu H \quad (3.9.1)$$

$$B = 4\pi \times 10^{-7} \mu_r H \quad (3.9.2)$$

เมื่อ B = ความหนาแน่นของเส้นแรง (Wevber / m^2)

H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Amp-tum/m)

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

μ_r = Relative Permeability

ความต้านทานทางแม่เหล็ก (Reluctance ; R) ก็คือ ความต้านทานที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งอาจจะเป็นอากาศ หรือวัสดุอะไรก็ได้ที่อยู่บริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กส่งอำนาจไปถึง จะมากน้อยก็ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุต่างๆ ความต้านทานนี้จะต้านทานการส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากแหล่งกำเนิดเส้นแรงให้ลดลง

ไป R นี้เป็นส่วนโดยตรงกับความยาว l ที่เส้นแรงผ่านไปเพื่อให้ครบวงจรของตัวเอง และเป็นสัดส่วนผกผันกับ พื้นที่ A ที่เส้นแรงผ่าน รวมทั้งเป็นส่วนผกผันกับ μ ด้วย ฉะนั้นในอากาศจึงได้ว่า

$$R = l / (\mu_0 A) \quad (3.9-3)$$

สำหรับค่า R ในวงจรแม่เหล็กที่มีสภาพการซึมซาบใด ๆ นั้นได้ว่า

$$R = l / (\mu A)$$

สำหรับวงจรทางแม่เหล็กเท่าที่กล่าวมาแล้วข้างบนพอที่จะรวบรวมสมการได้ดังนี้

	F	$=$	$m.n.f = NI \phi R$
	H	$=$	NI/l
	ϕ	$=$	BA
	B	$=$	$4\pi \times 10^7 \mu_r H$
	R	$=$	$l/\mu A$
เมื่อ	F	$=$	แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (แอมป์-รอบ)
	N	$=$	จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)
	I	$=$	จำนวนกระแสที่ไหลผ่านขดลวด
	ϕ	$=$	เส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์)
	R	$=$	ความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็ก
	H	$=$	ความเข้มสนามแม่เหล็ก
	B	$=$	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์/ตร.ม.เมตร)
	μ	$=$	สภาพความซึมซาบของแม่เหล็กของสารนั้นๆ
	l	$=$	ความยาวของวงจรแม่เหล็กที่เส้นแรงวิ่งผ่าน(เมตร)
	A	$=$	พ.ท.หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กที่เส้นแรงวิ่งผ่าน (ตร.ม.เมตร.)
	μ_r	$=$	1 (ในอากาศ)

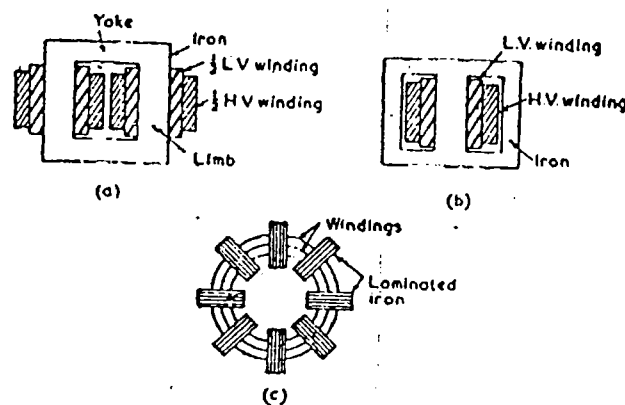
4. ทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์

เป็นเครื่องหรืออุปกรณ์ชนิดหนึ่งในการเพิ่มหรือลด (step up or step down) ระดับของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force ; e.m.f.) จากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง โดยมีข้อแม้ว่า ระดับของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปได้นั้นต้องเกิดจาก กระแสไฟสลับ (alternating current ; a.c.) ดังนั้นจึงนำคุณสมบัตินี้ไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่มหรือลดแรงดัน เพื่อใช้ในการทดสอบฉนวนชนิดต่างๆ

4.1 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า (Construction) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบธรรมดาที่ใช้กันอยู่ทั่วไปนั้น เป็นแบบที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ (Constant-potential transformer) มีขดลวดพันอยู่รอบแกนเหล็ก 2 ชุด และมีแกนเหล็กเป็นแผ่นเหล็กบางๆ ที่แต่ละแผ่นถูกเคลือบไว้ด้วยสารบางอย่างที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสีย (loss) ภายในแกนเหล็กอันเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า หม้อแปลงที่ใช้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่มีอยู่ทั่วไปมี 2 ชนิด คือ แบบแรกนั้นใช้สำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำ ให้กลายเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงเรียกว่า "Step-up transformer " ส่วนอีกแบบหนึ่งนั้นใช้เปลี่ยนจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงให้ลดลงเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำเรียกว่า "Step-down transformer " ขดลวดที่ได้รับกำลังไฟฟ้าเข้าไป

เรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) ขดลวดที่จ่ายกำลังไฟออกมาเรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) หม้อแปลงไฟฟ้าแบ่งเป็นชนิดใหญ่ๆ ได้ 3 ชนิด โดยพิจารณาจากลักษณะของการวาง หรือการจัดรูปของแกนเหล็ก แบ่งได้ดังนี้คือ

- "Core Type" เป็นแบบที่มีวงจรมแม่เหล็กวงจรรเดียว
- "Shell Type" เป็นแบบที่มีวงจรมแม่เหล็ก 2 วงจรร
- "Berry Type" เป็นแบบที่มีวงจรมแม่เหล็กกระจาย (distributed) ออกไปโดยรอบ ทั้ง 3 แบบนี้ได้แสดงไว้ดังภาพประกอบ 5 (a,b. และ c)



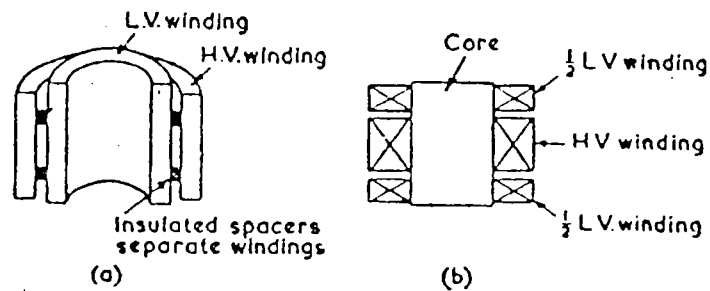
ภาพประกอบ 5 การแบ่งชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า

แบบ Core Type (ภาพประกอบ 5 a) นั้นครึ่งหนึ่งของขดลวดทาง primary และ secondary พันไว้รอบขาแต่ละข้างของแกนเหล็ก การพันแบบนี้ทำให้ลดการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก (flux leakage) ที่เกิดจากขดลวดทั้งสองลงได้ ซึ่งทำให้ได้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อง (linkage flux or mutual flux) ขดลวดทั้งสองมากยิ่งขึ้น แต่ถ้าพันขด primary และ secondary แยกกันไว้บนขาของแกนเหล็กแต่ละข้างแล้วจะทำให้เกิดการรั่วไหลของ flux มากยิ่งขึ้น ซึ่งมีผลต่อการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างจริงจัง (seriously) ปกติแล้วแบบ Core Type นี้มักใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ แบบ Shell Type (ภาพประกอบ 5 b) นี้มีขดลวดทั้ง primary และ secondary พันไว้ที่แกนกลางของแกนเหล็ก ส่วนที่เหลือของแกนเหล็กอีก 2 ขานี้ก็ทำหน้าที่เป็น low reluctance flux path นั้นเอง สำหรับแบบ Berry Type (ภาพประกอบ 5 c) นั้นมีแกนเหล็กวางอยู่เป็นวงรอบขดลวด แกนเหล็กนี้จำเป็นต้องมีโครงสร้างเป็นแบบ shell โดยที่แกนเหล็กกระจายออกไปรอบขดลวดเหล่านั้น แบบนี้เป็นแบบที่ไม่นิยมเพราะมีโครงสร้างที่ยุ่งยาก

4.2.การพันขดลวด (winding) การพันขดลวดของหม้อแปลงแบ่งได้ 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1.แบบ concentric ที่เป็นรูปทรงกระบอก (concentric cylinder) รูป 5 (a) แบบนี้มีขดลวดแรงต่ำอยู่ภายใน ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาการทำฉนวนหุ้มเส้นลวดที่ใช้ทำขดลวดนั่นเอง ลวดที่ใช้ในการทำคอยล์นั้นเป็นลวดทองแดงที่หุ้มฉนวน

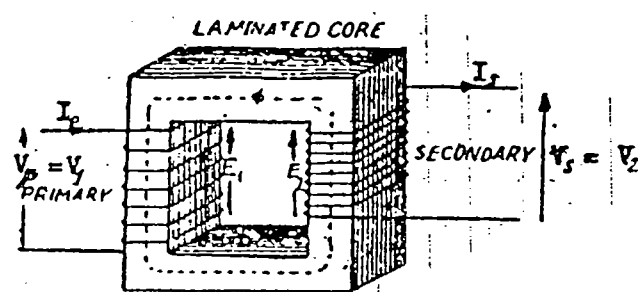
2. แบบประกบซ้อนกัน (sandwich) แบบนี้ (รูป 5 b) ช่วยในการลดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลให้ลดลงไป



ภาพประกอบ 6 แบบของการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

4.3 ทฤษฎีและหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Theory and Principle)

4.3.1 หลักการของหม้อแปลง (Transformer's principle) หม้อแปลงประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดที่พันอยู่บนแกนเหล็ก (ภาพประกอบ 7) ชุดที่ต่อไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่าชุดปฐมภูมิ (primary winding) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกตลอดอยู่ V_p (V_1) volts อีกชุดหนึ่งที่ต่อไปยังภาระทางไฟฟ้า (load) เรียกว่าชุดทุติยภูมิ (secondary winding) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกตลอดที่ load เป็น V_s (V_2) volts จำนวนของขดลวดทาง primary และ secondary มีจำนวนรอบเป็น N_p (N_1) และ N_s (N_2) ตามลำดับ เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า V volts เข้าไปที่ขด primary (pri) จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ แรงเคลื่อนไฟฟ้า V ทางด้าน secondary (sec) (ภาพประกอบ 6) ขึ้นถึงแม้ว่าจะไม่มี load มาต่อก็ตาม ในกรณีเช่นนี้ $V_s = E_2 = V_2$



ภาพประกอบ 7 หลักการเบื้องต้นของหม้อแปลง

4.3.2 อัตราส่วนของแรงเคลื่อนและกระแสไฟ (Voltage and Current Ratio) จากรูป เมื่อมี load มาต่อทางด้าน sec. ทำให้เกิดกระแส I_s ไหลอยู่ทาง sec

และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกตลอด $load = V_s$ ($V_s \neq E$) ส่วนทางด้าน pri. นั้นก็มีกระแส I_p และแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_p ออกมาจาก source เมื่อทำการสังเกตต่อไปก็พบว่าอัตราส่วน V_p/V นั้นมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของ N_p/N และ มีค่าใกล้เคียงกับส่วนกลับของอัตราส่วน I_p/I_s นั่นก็คือ $V_p I_s$ มีค่าใกล้เคียงกับ $V I_s$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ I_s เกิดขึ้นทาง sec. นั้นมีผลทำให้ I_s เปลี่ยนแปรด้วย นั่นคือ

$$V_p I_p \propto V_s I_s \quad (4.3)$$

เส้นแรงส่วนใหญ่ (ϕ) นี้คล้อง (link) ขดลวดของ pri. และ sec. ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นทั้ง 2 ขด (E_1 และ E_2) เคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้เป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบของขดลวดของแต่ละขด ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ตามกฎของการเหนี่ยวนำดังสมการ (2.3.0)

$$e = N (d\phi / dt) \quad (4.3.0)$$

เมื่อ e = แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นในขณะใดขณะหนึ่ง

N = จำนวนรอบของลวด ที่ได้รับอัตราเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยเวลา

$$d\phi / dt = \text{อัตราเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยเวลา}$$

นั่นคือ $E_1 / E_2 = N_p / N_s = a$ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง (Transformation Ratio) (4.3.1)

เมื่อ E_1 และ E_2 คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด pri. และ sec. ตามลำดับ N_p กับ N_s ก็คือจำนวนรอบของขดลวดทาง Pri. และ sec. เช่นกัน สำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของ pri. และ sec. ทั้ง 2 ข้างนั้น แตกต่างจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ฉะนั้นจึงไม่ทำให้ Vector ของ V_p และ V_s มีมุมแตกต่างไปจาก Vector ของ E_1 และ E_2 มากนัก ดังนั้น ถ้าหากพิจารณาว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (terminal voltage) นั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนขดลวดของแต่ละด้านโดยประมาณแล้ว ก็จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ 2.3.2

$$V_p / V_s = N_p / N_s \quad ; \text{Transformation ratio} \quad (4.3.2)$$

ถ้าหากว่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากภายในหม้อแปลงนั้นมีเป็นจำนวนเล็กน้อย ก็ตัดค่าที่เสียนั้นทิ้งไปได้ นั่นก็คืออาจพิจารณา ได้ว่ากำลังที่ได้รับ (power output) กับกำลังที่ใส่เข้าไป (power input) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$V_p I_p \cos \theta_p = V_s I_s \cos \theta_s \quad (4.3.3)$$

ค่า $\cos \theta_s$ นั้นหาได้จากชนิดของ load แต่เนื่องจากว่า Power factor ของทาง pri. และ sec. มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า

$$V_p I_p = V_s I_s \quad (4.3.4)$$

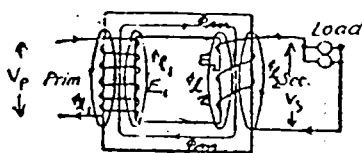
$$V_p / V_s = I_s / I_p = N_p / N_s \quad (4.3.5)$$

$$I_p N_p = I_s N_s \quad (4.3.6)$$

หม้อแปลงนี้จะทำหน้าที่ต่อเมื่อไฟที่ใส่เข้าไปทางด้าน pri นั้นเป็นไฟสลับ หรือไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะๆ (pulsed) ถ้าเป็นไฟตรง ก็เป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงการกระพริบขึ้นลง (fluctuating) หรือมีฉะนั้นก็ให้มีการเปิดปิดไฟตรงด้วยอัตราเร็วอัตราใดอัตราหนึ่งหรือหลายอัตราก็ได้ จึงจะทำให้เกิดการ

เหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นทาง sec. อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรง (flux change) นั้น จะนั้นถ้าไฟตรงที่ใส่เข้าไปทาง pri. มีค่าคงที่ตลอดเวลาจะทำให้ไม่มีไฟเกิดขึ้นทาง sec. ดังนั้นจึงทำให้หม้อแปลงมีลักษณะเด่นในการเปลี่ยนค่าของแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าในวงจรกระแสไฟสลับเท่านั้น

4.3.3 ทฤษฎี การทำงาน (Theory of Operation) แนวความคิด (concept) ที่เป็นพื้นฐานไว้ก่อน จะนั้นจึงจะกล่าวถึงหม้อแปลงไฟฟ้าตามความคิดฝัน (Ideal Transformer) หม้อแปลงชนิดนี้ไม่คิดการสูญเสีย ต่างๆ (loss) ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ดังนั้นจึงเป็นการวาดภาพพจน์ของหม้อแปลงไฟชนิดนี้ขึ้นในความคิดเท่านั้น หม้อแปลงไฟฟ้า ตามความคิดฝันหรือตามอุดมการณ์ (Ideal Transformer) ทำให้เกิดมีหลักการการทำงานดังนี้ (ภาพประกอบ 7)



ภาพประกอบ 8 Flux Distribution.

เมื่อใส่ไฟ V_p เข้าไปทำให้เกิดกระแสทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด ϕ เส้นแรงนี้จะเหนี่ยวนำขดลวดของมันเอง และขดลวดของทุติยภูมิให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น E_1 และ E_2 ขึ้นพร้อมๆกัน นั่นคือ E_1 และ E_2 ที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปตามกฎของ Lenz และ Faraday ตามลำดับ นั่นคือ $V_p = E_1$ และ $E_2 = V_2$ ในกรณีที่ เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าตามอุดมการณ์เท่านั้น ส่วนหม้อแปลงจริงๆ (Actual transformer) นั้นมีหลักการการทำงาน ดังภาพประกอบ 7 ดังนี้คือ เมื่อใส่ไฟสลับ V_p เข้าไปที่ด้านปฐมภูมิทำให้มีกระแส I_p ไหลผ่านขดลวดนี้ไปยังวงจรภายนอก (วงจรภายนอกนี้คือ ตัวจ่ายไฟหรือ Source ของวงจรนั่นเอง) ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) ϕ_1 ขึ้นที่ขดลวด Primary . ϕ_1 นี้ประกอบด้วย mutual Flux (ϕ_{1m}) และ leakage Flux ϕ_{1l} ขณะที่ ϕ_1 เปลี่ยนแปรไปตามการเปลี่ยนแปลงของกระแส ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ e.m.f. (electromotive force) ขึ้นภายในขด primary และมีทิศทางตรงกันข้ามกับ V_p (ตามกฎของ Lenz) ให้ไฟที่จ่ายเข้าไปเป็น sinusoidal waveform เพราะฉะนั้น ϕ_1 เป็น sine wave ด้วย (ไม่คิด loss ต่างๆ และ lag impressed Voltage V_p ไป 90°) นั่นคือ

$$\phi_1 = \phi_{1\max} \cos \omega t = \phi_{1\max} + \phi_{l1}$$

$$\text{ตามกฎของ Lenz ได้ } e_1 = -N_1 (d\phi_1 / dt) \quad (4.3.7)$$

$$e_1 = N_1 \omega \phi_{1\max} \sin \omega t$$

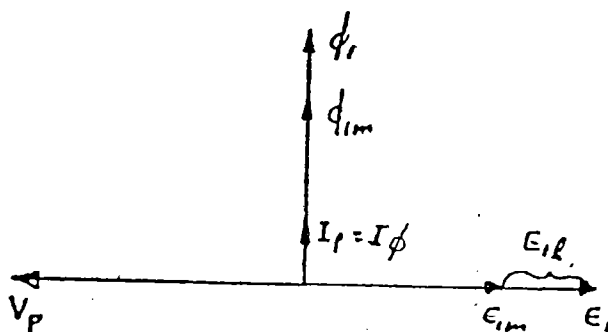
$$E_{1\max} = N_1 \omega \phi_{1\max} \quad \text{เมื่อ } \sin \omega t = 1$$

$$E_1 = 4.44 N_1 f_1 \phi_1 \max \quad (4.3.8)$$

เมื่อ E_1 = effective value หรือ r.m.s. value ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้น ใน primary และมีทิศทางตรงกันข้ามกับ V_p (volts) = back e.m.f (โวลต์)

- N_1 = จำนวนขดลวดทาง primary (รอบ)
 f_1 = ความถี่ของไฟสลับที่จ่ายให้กับขดลวด pri. (รอบ/วินาที = CPS)
 ϕ_{1max} = flux ทั้งหมดที่เกิดขึ้นทาง primary ขณะที่มีค่าสูงสุด (เวเบอร์) (1 weber = 10 lines)
 ϕ_{1m} = เส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่ขดปฐมภูมิ (Primary mutual flux) (เวเบอร์)
 ϕ_m = เส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่เกิดขึ้นทั้งทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ (mutual flux) (เวเบอร์)
 $= \phi_{1m}$

แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 นี้ประกอบด้วย E_{1m} และ E_{1l} ซึ่งเกิดจาก ϕ_{1m} และ ϕ_{1l} ทั้ง E_{1m} และ E_{1l} นี้ inphase กันดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 9 การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$\therefore E_{1m} + E_{1l} = V_p$$

เมื่อ E_{1m} = การเหนี่ยวนำที่เกิดจาก Mutual flux

E_{1l} = การเหนี่ยวนำที่เกิดจาก Self inductance หรือเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว(leakage flux)

สำหรับทางด้านทุติยภูมิ (secondary winding) นั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_2 ขึ้นในขณะเดียวกันกับที่ E_1 เกิดขึ้น และมีทิศทางไปทางเดียวกันด้วยแต่ E_2 นี้เกิดจาก ϕ_m เท่านั้น ดังนั้นขนาดของ E_2 จึงขึ้นอยู่กับจำนวน N_2 และ ϕ_m ที่มาคล้องขดลวด secondary E_2 ที่เกิดจาก ϕ_m เท่านั้น ดังนั้นขนาดของ E_2 จึงขึ้นอยู่กับจำนวน N_2 และ ϕ_m ที่มาคล้องขดลวด secondary E_2 ที่เกิดขึ้นนี้เกิดขึ้นตามกฎหมายของ Faraday

$$\therefore E_2 = 4.44 N_2 f_1 \phi_{m \max} \quad (4.3.9)$$

เมื่อ E_2 = induce c.m.f ทาง secondary = V_s (เมื่อ no load)

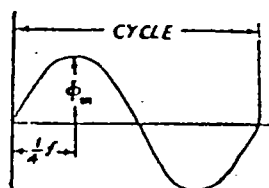
$\phi_{m \max}$ = maximum mutual flux ที่มา link หรือคล้องขด (sec.)
 $= \phi_{m \max}$ (สำหรับ Ideal transformer)

N_2 = จำนวนรอบของขดลวดทางด้าน secondary

ขณะ no load นี้ก็จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสดังนี้

$I_p = I_0$ (no load current) = I_0 (magnetizing current) โดยนี้ lag VP ไป 90° และ inphase กับ ϕ , ϕ_m (เมื่อเป็นหม้อแปลงตามอุดมการณ์) ขณะที่ทาง secondary ไม่มี load นั้น $I_p = I_0$ แต่เมื่อมี load เพิ่มขึ้น I_p ไม่เท่ากับ I_0 แล้ว แต่ I_0 ก็ยังคงที่อยู่ตลอดเวลา แม้ว่า load ทาง secondary จะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม

ในการหาสมการการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนี้ สามารถหาได้จากคำจำกัดความของ Faraday ได้เช่นเดียวกัน โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ flux ที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งเวลาหน่วยจากการพิจารณาจากรูปของ sine wave (รูป 9.) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กจาก 0 ถึงค่าสูงสุดคือ ϕ_{max} ภายใน $1/4f$ วินาที



ภาพประกอบ 10 แสดง flux wave

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วง $1/4f$ สำหรับตัวนำ 1 turn มีค่าเท่ากับ $\phi_{max} / (1/4f)$

$$\begin{aligned} \text{average e.m.f/turn} &= \phi_{max} \\ &= 4 f \phi_{max} \end{aligned} \quad (4.3.10)$$

$$\text{average e.m.f. for } N \text{ turn} = 4N f \phi_{max} \quad (4.3.11)$$

สำหรับ sine wave นั้นมีค่า form factor = 1.11

form factor = 1.11 = R.M.S value / average value

$$\therefore \text{R.M.S. value of e.m.f. for } N \text{ turn} = 4.44 N f \phi_{max} \quad (4.4.12)$$

จะเห็นได้ว่าสมการ e.m.f. ของ (2.3-7) (2.3-9) และ (2.3-12) มีสูตรเช่นเดียวกันทั้ง 3 สมการ

4.4 หม้อแปลงที่ใช้ตามความเป็นจริง (Actual Transformer) เพื่อความง่ายต่อการเข้าใจในทฤษฎีการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงทำการแยกแยะออกเป็นขั้นตอนดังนี้

ก. คัดการสูญเสีย (loss) ที่เกิดจากการสูญเสียที่แกนเหล็ก (core loss) ค่าการสูญเสียที่เกิดจากการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic leakage) และกำลังไฟที่เสียไปที่ขดลวด (copper loss) ในขดลวดตัดทิ้งไป
ข. ไม่คิดค่าการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic leakage) อย่างเดียว

ค. คัดการสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด (core loss+copper loss+magnetic leakage)

ทั้ง 3 ขั้นตอนข้างบนนี้ ต่างก็ต้องพิจารณาเมื่อตอนหม้อแปลงไฟไม่มีภาระ (no load) และตอนที่ได้รับ ภาระ (on load) โดยแยกเป็นขั้นตอนดังนี้

ก. คิดเฉพาะ เมื่อมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าไปที่แกนเหล็กเท่านั้น

4.4.1 เมื่อไร้ภาระ (NO-LOAD) เมื่อจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงนั้น ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) ขึ้น แม้ว่าจะไม่มีภาระไฟฟ้าจากรูป 10 สิ่งที่สูญเสียไปในแกนเหล็ก (core loss) ของหม้อแปลงไฟก็คือ hysteresis and eddy current losses นั้นเอง สำหรับ impedance drop ที่เกิดในขดลวดที่รับไฟเข้า อันเนื่องมาจากความต้านทานของขดลวดนั้นน้อยมาก (เมื่อขดที่จ่ายไฟวงจรเปิด) จึงไม่น่ามาคิด (I_0 มีค่า 2-10% ของ rated current) ฉะนั้นกระแสเมื่อไม่มี load I_0 (no load current) จึงประกอบด้วยกระแส 2 ส่วน ซึ่งตั้งฉากกัน คือ กระแสอันเนื่องมาจากการเกิด hysteresis and eddy current (I_{h+e}) กับกระแสที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetizing current) คือ I_ϕ สำหรับ I_{h+e} จะมาพร้อม (inphase) กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า VP ($V_P = E_1$) ที่จ่ายเข้าไปที่ขดลวดปฐมภูมิ แต่ V_P ($V_P = E_P$) ที่จ่ายเข้าไปที่ขดลวดปฐมภูมิ แต่ I_ϕ จะ lag E_1 ไป 90° ดังนั้นจึงทำให้ I_0 เกิดการมาที่หลัง (lag) จาก E_1 ไปเกือบ 90° นั้น คือ

$$\begin{aligned} I_0 &= I_{h+e} + I_\phi & (a) \\ \text{หรือ } I_0 &= \sqrt{(I_{h+e})^2 + (I_\phi)^2} \angle \theta_0 & (4.4.1) \\ \text{นั่นคือ } I_{h+e} &= I_0 \cos \theta_0 & (4.4.2) \\ \text{หรือ } I_\phi &= I_0 \sin \theta_0 & (4.4.3) \\ \text{เมื่อ } \theta_0 &= \tan^{-1} I_\phi & (4.4.4) \end{aligned}$$

โดยปกติแล้ว ขนาดของ I_ϕ นั้นมากกว่า I_{h+e} หลายเท่า ดังนั้นจึงทำให้ $\theta_0 \approx 90^\circ$ เพราะว่า I_0 มีค่าน้อยมาก ฉะนั้น จึงทำให้มุมที่แตกต่างระหว่าง V_P กับ E_1 มีค่าน้อยมาก ดังนั้นถ้าคิดโดยประมาณแล้วจึงอาจกล่าวได้ว่า I_0 มาที่หลัง (lag) V_P ไปเกือบเท่ากับ 90° จุดที่ควรจะต้องสังเกตอย่างระมัดระวังมีดังนี้

1. กระแส I_0 นี้มีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสไฟที่หม้อแปลงไฟต้องจ่ายให้กับภาระเต็มที (full load current)

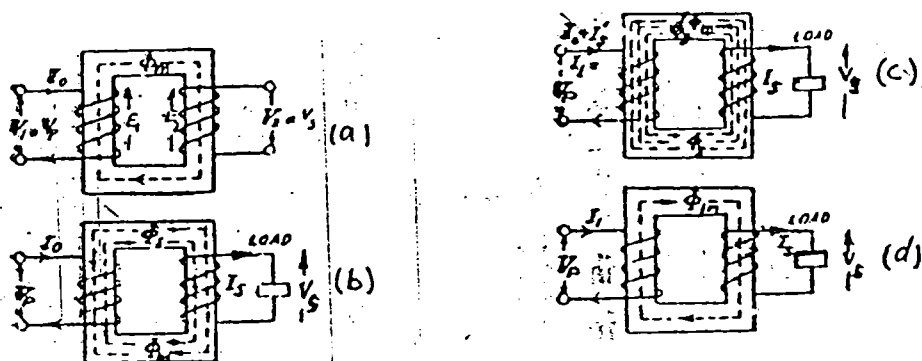
2. จากความจริงที่ว่า permeability ของแกนเหล็กนั้นเปลี่ยนแปลงไปกับค่าของกระแสกระตุ้น (exciting current) ช่วงเวลาที่ใส่เข้าไป ฉะนั้นรูปคลื่นของกระแสกระตุ้นหรือ กระแสที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetizing current) จึงไม่ใช่รูป sinusoidal wave อย่างแท้จริง (เพราะมี hysteresis เกิดขึ้นในแกนเหล็ก) เมื่อเป็นเช่นนั้น จึงไม่อาจที่จะใช้ vector เขียนแทนกระแสที่เกิดขึ้นนี้ เหตุผลก็คือปริมาณ vector ที่ใช้เขียนนี้ใช้เขียนแทนการเปลี่ยนแปลงของ sinusoidal เท่านั้น แต่ว่าในทางปฏิบัติแล้วไม่ได้ทำให้เกิดความแตกต่างไปมากนัก ฉะนั้นจึงถือเสมือนว่า I_0 เป็น sinusoidal ด้วย

3. เพราะว่า I_0 น้อยมาก ดังนั้น การสูญเสียกำลังไฟของขดลวดที่รับไฟจึงตัดทิ้งไป นั่นก็คือไฟที่ใส่เข้าไปนั้น เสียไปเนื่องจากการสูญเสียในแกนเหล็ก (iron loss) ของหม้อแปลง ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วมักถือว่าเป็นเช่นนั้น

4. เนื่องจากว่าสิ่งที่สูญเสียส่วนใหญ่นี้ เป็นการสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งทำให้ current vector เลื่อนไปจากเดิม (Ideal transformer) ดังนั้น θ_0 จึงเรียกว่า "hysteresi angle of advance"

4.4.2 เมื่อมีภาระไฟฟ้า (ON-LOAD) เมื่อทางด้านจ่ายไฟของหม้อแปลงได้รับการกระทำให้เกิดการไหลของกระแส I_s ขึ้นทางด้านนั้น ขนาดเฟส (phase) ของ I_s เมื่อเปรียบเทียบกับ V_s นั้นหาได้จากชนิดของภาระไฟฟ้าที่หม้อแปลงนั้นได้รับ กระแสจะมาพร้อม (inphase) กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อภาระไฟเป็น

ความต้านทานล้วน ๆ (pure resistance) แต่จะตามหลัง (lag) แรงเคลื่อนเมื่อภาระไฟเป็นแบบเหนี่ยวนำ (inductive) และจะนำหน้า (lead) เมื่อภาระไฟเป็นแบบที่มีความจุ (capacitive) กระแส I_s ที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิด ϕ_s ขึ้นมีทิศทางสวนกับเส้นแรงแม่เหล็กหลัก (main flux) ของทางดำนรับไฟ ซึ่งเป็นเส้นแรงแม่เหล็กร่วม (mutual flux) หรือเส้นแรงแม่เหล็กคล้อง ϕ_m (linkage flux) อันเนื่องมาจาก I_0 เส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_s นี้ เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กลด (demagnetising flux) ฉะนั้นจึงทำให้ ϕ_m มีค่าลดลงไปเพียงชั่วขณะหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้แรงเคลื่อนไฟที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ E_1 ลดลงไป เมื่อเป็นเช่นนั้นจึงทำให้ผลแตกต่างระหว่าง V_p กับ E_1 มากขึ้น จึงเป็นเหตุให้มีกระแสไหลเพิ่มขึ้นทางดำนที่รับไฟเข้า ให้กระแสที่ไหลเพิ่มขึ้นทางดำนรับไฟเข้าเป็น I'_s กระแสนี้มีทิศทางที่ต่อต้าน phase (anti phase) ให้กับ I'_s และมีชื่อว่ากระแสส่วนที่เป็นเฉพาะของภาระไฟของ ดำนรับไฟ (load component of primary current) กระแส I'_s นี้สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ'_s ขึ้นมีทิศทางไปทาง เดียวกับ ϕ_m แต่มีทิศทางตรงกันข้ามกับ ϕ_s และมีขนาดเท่ากับ ϕ_s ด้วย ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นทางวงจรแม่เหล็ก อันเนื่องมาจากกระแส I_s นั้นถูกทำให้สะเทิน (Neutralized) หรือหมดไปในทันทีทันใด โดย I'_s ซึ่งเกิดขึ้นพร้อม กันกับ I_s นั้นเอง ดังนั้นจึงทำให้ผลลัพธ์ของวงจรทางแม่เหล็กมีค่าคงที่ นั่นคือเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ ϕ_m อัน เนื่องมาจาก I_0 เท่านั้น แต่ว่ากระแสทางดำนรับไฟนั้นก็เปลี่ยนจาก I_0 ไปเป็น I_P ซึ่งเท่ากับ $I_0 + I'_s$ ตาม vector นั้นเอง กรรมวิธีการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากหม้อแปลงได้รับภาระไฟ I_s นั้นได้แสดงไว้ทั้งหมดเป็นขั้นตอนแล้ว ในภาพประกอบ 10 a ถึง d (a.) เมื่อยังไม่ได้รับภาระไฟ ก็มีแต่ ϕ_m เท่านั้น (b.) เมื่อได้รับภาระไฟ I_s ทางดำนจ่ายไฟ ทำให้เกิด ϕ_s ขึ้นสวนทางกับ ϕ_m (c.) ขณะ ϕ_m ลดไป ทำให้ E_1 ลดลงเกิด I'_s ไหลเพิ่มขึ้น ทางดำนรับไฟ I'_s นี้ ทำให้เกิด ϕ'_s มีทิศทางตรงข้ามกับ ϕ_s แต่มีขนาดเท่ากันโดยที่ยังมี I_s ทางดำนจ่ายไฟ ϕ_m กลับมาอยู่ในสภาพเดียวกับ (a) แต่ว่ากระแสเปลี่ยนจาก I_0 ไปเป็น I_P ซึ่งเท่ากับ $I_0 + I'_s$ โดยที่ภาระไฟ เป็น I_s ทางดำนจ่ายไฟ



ภาพประกอบ 11 แสดงปรากฏการณ์ของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux)

จะเห็นได้ว่าไม่ว่าภาระไฟทางดำนจ่ายไฟจะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตาม ก็ไม่ทำให้ค่าของเส้นแรงที่ไหลผ่านในแกนเหล็ก ทั้งหมดผิดแปลกไปจากเมื่อตอนไร้ภาระไฟมากนัก นั่นคือเส้นแรงทั้งหมด (net flux) มีค่าเท่ากับเมื่อตอนไร้ภาระไฟโดยประมาณ ดังนั้น จึงทำให้ค่าของการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) มีค่าคงที่ตลอดไปที่ค่าภาระไฟต่าง ๆ ทั้งนี้เพราะ ϕ_m มีค่าคงที่โดยประมาณ

$$\therefore \phi_s = \phi'_s$$

$$\begin{aligned}\therefore N_2 I_s &= N_1 I'_s \approx N_1 I'_1 \\ \therefore I_1 &= N_2 I_s \approx I_s / a = I'_s\end{aligned}$$

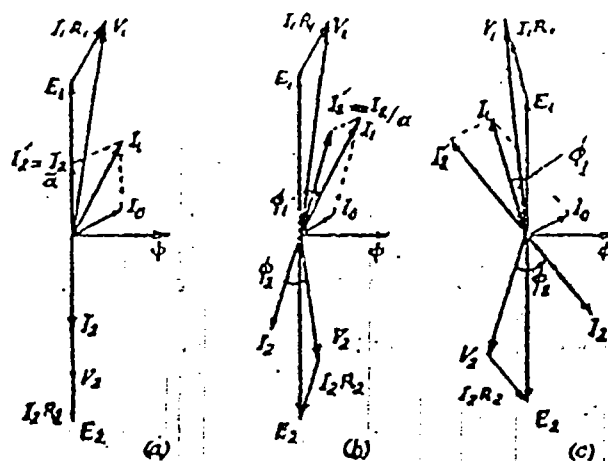
ฉะนั้น เมื่อหม้อแปลงได้รับการระไฟ จึงทำให้กระแสทาง pri. มีสองส่วน คือ I_0 และ I'_s (I_1) I'_s นี้ มีทิศทางของ phase ตรงข้ามกับ I_s และมีขนาดเท่ากับ I_s หากด้วย a กระแสทั้งหมดทางด้านรับไฟ ก็คือผลบวกตาม vector ของ I_0 กับ I'_s ถ้าไม่คิดค่าการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic leakage) อย่างเดียว (คิด core loss และความต้านทานของขดลวดลวดด้วย)

หม้อแปลงตามอุดมการณ์นั้น คิดว่าขดลวดไม่มีความต้านทาน และไม่มีส่วนที่สูญเสียต่าง ๆ (losses) แต่ว่าหม้อแปลงจริง ๆ นั้นต้องมีความต้านทานเสมอทั้ง 2 ด้านของขดลวด ฉะนั้นจึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนตกคร่อมความต้านทานของขดลวดทั้ง 2 ด้าน ซึ่งได้รับผลดังนี้

1) แรงเคลื่อนที่ขั้ว $V_2 = V_s$ ที่ร่วมกันตามเวกเตอร์มีค่าน้อยกว่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ E_2 ไปเป็นจำนวน $I_2 R_2$ เมื่อ R_2 คือความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ ดังนั้น V_2 ก็คือผลต่างทางเวกเตอร์ของ E_2 กับ $I_2 R_2$ ดังรูป 2.5-4

$$\therefore V_2 = E_2 - I_2 R_2$$

2) ทำนองเดียวกัน E_1 ก็คือผลต่างทางเวกเตอร์ของ $V_1 = V_p$ กับ $I_1 R_1$ เมื่อ R_1 เป็นความต้านทานของขดลวดทางปฐมภูมิ ดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 a, b และ c เป็นรูปเวกเตอร์ของหม้อแปลง

สมมูลย์ความต้านทาน ก็คือค่าความต้านทานที่ย้ายจากด้านหนึ่งของขดรับไฟหรือจ่ายไฟไปยังขดจ่ายไฟหรือรับไฟของอีกด้านหนึ่ง จากรูป 12 ต้องการย้ายค่า R_2 ไปไว้ทางด้านรับไฟ โดยที่ไม่ทำให้ค่าหรือคุณสมบัติของหม้อแปลงเปลี่ยนไป ค่าที่ย้ายไปใหม่นี้เรียกว่าค่าสมมูลย์ของ R_2 (R'_2) หลังจากได้ย้ายไปไว้ทางด้านรับไฟแล้ว ค่าสูญเสียที่เกิดทางด้านจ่ายไฟนี้ก็คือการสูญเสียที่ตัวรับไฟ ซึ่งมีกระแส I_1 เป็นตัวจ่ายให้ นั่นคือ ถ้า R'_2 เป็นสมมูลย์ของ R_2 เมื่อคิดที่ด้านรับไฟแล้ว ย่อมต้องมีค่าเท่ากับการสูญเสียที่เกิดขึ้น เมื่ออยู่ทางด้านจ่ายไฟอันเนื่องมาจาก R_2 ด้วย

$$\therefore I_1^2 R_2 = I_2^2 R_2 \quad (4.4.5)$$

$$\therefore R'_2 = (I_2 / I_1)^2 R_2 \quad (4.4.6)$$

เมื่อไม่คิด 10

$$\text{ได้ } R'_2 = a^2 R_2 \quad (4.4.7)$$

ทำนองเดียวกัน ความต้านทานสมมูลย์ของขดปฐมภูมิเมื่อย้ายไปได้ (refer to) ทางขดทุติย

ភូមិទី១ R'₁

$$R'_1 = R_1/a^2 \quad (4.4.8)$$

จากภาพประกอบ12 นั้นได้ย้ายค่าความต้านทานมาไว้ทางด้านรับไฟทั้งหมดเรียกความต้านทานที่ได้นี้ว่า ความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงทั้งตัว เมื่อคิดที่ด้านรับไฟ

$$\therefore R_{01} = R_1 + R'_2 = R_1 + a^2 R_2 \quad (4.4.9)$$

ทำนองเดียวกัน ความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงทั้งตัว เมื่อคิดด้านจ่ายไฟคือ R_{02}

$$\therefore R_{02} = R_2 + R_1/a^2 \quad (4.4.10)$$

સ્વરૂપ

เมื่อนำมาคิดที่ด้านรับไป (refer to primary)

$$\therefore R_{01} = R_1 + R'_2 \quad (4.4.11)$$

เมื่อนำมาคิดที่ด้านจ่ายไฟ (refer to secondary)

$$\therefore R_{02} = R_2 + R_1 \quad (4.4.12)$$

นั่นคือ เมื่อต้องการเปลี่ยนค่า R ไปคิดทางด้านรับไฟ ก็ให้ a^2 เข้าไปคูณ แต่ถ้าต้องการคิดทางด้านจ่ายไฟก็ให้ a^2 ไปหาร

ในเมื่อ $a = \text{transformation ratio} \approx V_1 = I_2 = I$

การรั่วของสนามแม่เหล็ก (Magnetic leakage) ได้กล่าวมาตอนต้นแล้วว่าสนามแม่เหล็กทั้งหมดที่คล้อง (link) ขดรับไฟนั้นย่อมคล้องขดจ่ายไฟทั้งหมดด้วย แต่ตามความเป็นจริงแล้วไม่เป็นเช่นนั้น ทั้งนี้เพราะมีสนามหรือเส้นแรงแบบบางส่วนที่ไม่ได้ไปคล้องทางขดจ่ายไฟ เส้นแรงแบบเหล่านั้นคือ ϕ_{11} ซึ่งมันจะครบวงจรของมัน โดยการผ่านอากาศ แทนที่จะผ่านแกนเหล็กจากขดลวดอันหนึ่งไปอีกอันหนึ่ง ทำนองเดียวกัน เส้นแรงแบบที่ไม่ได้ไปคล้องที่ขดรับไฟนั่นก็คือ ϕ_{12} = เส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (leakage flux) ของขดจ่ายไฟนั่นเอง ดังรูป 13 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วของแต่ละตัวที่เกิดขึ้น ต่างก็เป็นสัดส่วนกับจำนวนแอมป์รอบของแต่ละขดลวด นอกจากนั้นแม่เหล็กรั่วแต่ละตัวต่างก็มาพร้อม (inphase) กับกระแสที่ทำให้เกิดเส้นแม่เหล็กนั้น ๆ นั่นคือ ϕ_{11} มาพร้อมกับกระแสที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (I_1) ทางด้านรับไฟ ส่วน ϕ_{11} ก็มาพร้อมกับกระแส I_2 ซึ่งจ่ายให้กับภาระไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว แต่ละตัวต่างก็เหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในตัวของมันเอง (self induced e.m.f.) นั่นคือ ϕ_{11} ทำให้เกิด e_{11} และ ϕ_{12} ทำให้เกิด e_{12} ขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ $I_1 X_1$ และ $I_2 X_2$ ตามลำดับ

$$\therefore \quad e l_1 = l_1 X_1 = l_1 \times 2 \pi f l_1 \quad (4.4.13)$$

$$\text{and } e_{12} = I_2 X_2 = I_2 \times 2 \pi f L_1 \quad (4.4.14)$$

เมื่อ X_1 และ X_2 เป็น leakage reactance ของขดรับไฟและจ่ายไฟ (โอห์ม)

เมื่อ L_1 และ L_2 เป็น leakage inductance ของขดรับไฟและจ่ายไฟ (henry)

F เป็นความถี่ของไฟที่จ่ายให้หม้อแปลง (ครั้ง/วินาที)

จากที่กล่าวมาแล้วนี้จึงสรุปได้ว่า

$$1) \quad V_1 = E_1 + I_1 (R_1 + jX_1) \quad (4.4.15)$$

$$\text{และ } E_2 = V_2 + I_2 (R_2 + jX_2) \quad (4.4.16)$$

2) ในหม้อแปลงที่ใช้งานจริง ๆ นั้น ขดลวดแต่ละขดไม่ได้แยกกันอยู่บนขาหรือแกนแต่ละอัน ทั้งนี้เพราะจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วขึ้นมาเป็นจำนวนมาก

ลดค่ากระสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทั้งหมด (core loss+copper loss+magnetic leakage) ตามที่กล่าวมาแล้วในตอน ข.2 ก็พบว่าหม้อแปลงจริง ๆ นั้นต้องมีการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic leakage) ด้วย ฉะนั้น จึงสรุปความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงออกมาได้ดังนี้

1) impedance Z_1 และ Z_2 ของทางด้านรับไฟและจ่ายไฟ ต่างก็มีค่าเท่ากับผลบวกของความต้านทานและ reactance ของแต่ละด้านตามเวกเตอร์ดังสมการ (2.4-17) 2.4-18) ตามลำดับ

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (4.4.17)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \quad (4.4.18)$$

2.แรงเคลื่อนไฟที่จ่ายให้กับทางด้านรับไฟนั้น มีค่าเท่ากับผลบวกตามเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟที่เหนี่ยวนำขึ้น E_1 กับแรงเคลื่อนไฟตกคร่อม impedance $I_1 Z_1$ ที่เกิดขึ้นในขดรับไฟนั่นเอง

$$V_1 = E_2 + I_2 Z_2 \quad (4.4.17)$$

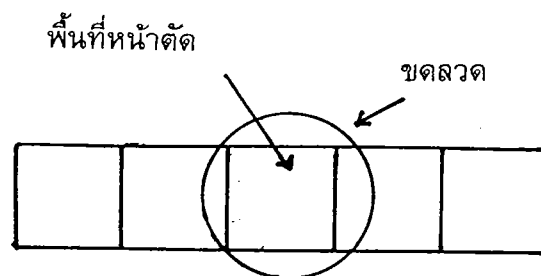
$$V_1 = E_2 + I_2 (R_2 + jX_2) \quad (4.4.18)$$

4.4.3 ประยุกต์การพันหม้อแปลงไฟฟ้า

4.4.3.1 การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จะหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กได้นั้น ต้องรู้กำลังของหม้อแปลงมีหน่วยเป็น วีเอ (VA) จากสูตรดังนี้

$$\text{กำลังของหม้อแปลง} = \text{แรงดัน} \times \text{กระแส} \quad (\text{VA}) \quad (4.4.19)$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} = \sqrt{\text{กำลังหม้อแปลง} / 5.58} \quad (\text{ตารางนิ้ว}) \quad (4.4.20)$$



ภาพประกอบ 13 พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

เมื่อ X_1 และ X_2 เป็น leakage reactance ของขดรับไฟและจ่ายไฟ (โอห์ม)

เมื่อ L_1 และ L_2 เป็น leakage inductance ของขดรับไฟและจ่ายไฟ (henry)

F เป็นความถี่ของไฟที่จ่ายให้หม้อแปลง (ครึ่ง/วินาที)

จากที่กล่าวมาแล้วนี้จึงสรุปได้ว่า

$$1) \quad V_1 = E_1 + I_1 (R_1 + jX_1) \quad (4.4.15)$$

$$\text{และ } E_2 = V_2 + I_2 (R_2 + jX_2) \quad (4.4.16)$$

2) ในหม้อแปลงที่ใช้งานจริง ๆ นั้น ขดลวดแต่ละขดไม่ได้แยกกันอยู่บนขาหรือแกนแต่ละอัน ทั้งนี้เพราะจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วขึ้นมาเป็นจำนวนมาก

ลดค่าการสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทั้งหมด (core loss+copper loss+magnetic leakage) ตามที่กล่าวมาแล้วในตอน ข.2 ก็พบว่าหม้อแปลงจริง ๆ นั้นต้องมีการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic leakage) ด้วย ฉะนั้น จึงสรุปความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงออกมาได้ดังนี้

1) impedance Z_1 และ Z_2 ของทางด้านรับไฟและจ่ายไฟ ต่างก็มีค่าเท่ากับผลบวกของความต้านทานและ reactance ของแต่ละด้านตามเวกเตอร์ดังสมการ (2.4-17) 2.4-18) ตามลำดับ

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (4.4.17)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \quad (4.4.18)$$

2.แรงเคลื่อนไฟที่จ่ายให้กับทางด้านรับไฟนั้น มีค่าเท่ากับผลบวกตามเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟที่เหนี่ยวนำขึ้น E_1 กับแรงเคลื่อนไฟตกคร่อม impedance $I_1 Z_1$ ที่เกิดขึ้นในขดรับไฟนั่นเอง

$$V_1 = E_2 + I_2 Z_2 \quad (4.4.17)$$

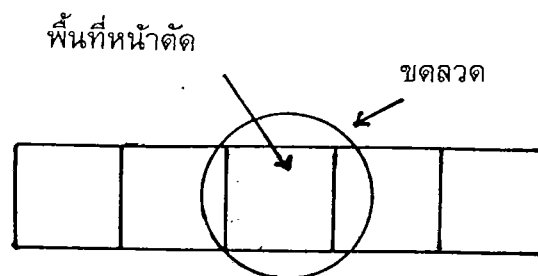
$$V_1 = E_2 + I_2 (R_2 + jX_2) \quad (4.4.18)$$

4.4.3 ประยุกต์การพันหม้อแปลงไฟฟ้า

4.4.3.1 การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จะหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กได้นั้น ต้องรู้กำลังของหม้อแปลงมีหน่วยเป็น วีเอ (VA) จากสูตรดังนี้

$$\text{กำลังของหม้อแปลง} = \text{แรงดัน} \times \text{กระแส} \quad (\text{VA}) \quad (4.4.19)$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} = \sqrt{\text{กำลังหม้อแปลง} / 5.58} \quad (\text{ตารางนิ้ว}) \quad (4.4.20)$$



ภาพประกอบ 13 พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

4.4.3.2 การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ

จากสูตร

$$N1 = E1 \times 10^8 / (4.44 \times F \times Bm \times A) \quad \text{รอบ} \quad (4.4.20)$$

$N1$ = จำนวนรอบของขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ (รอบ)

$E1$ = แรงดันทางด้านปฐมภูมิ (โวลต์)

F = ความถี่ (เฮิร์ต)

Bm = ความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ผ่านแกนเหล็กยังไม่อิ่มตัว
(ใช้ 64,500 เส้น / ตารางนิ้ว)

A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (ตารางนิ้ว)

4.4.3.3 คำนวณหาจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิ

จากสูตร

$$E1 / E2 = N1 / N2 \quad (4.4.21)$$

โดย

$E1$ = แรงดันทางด้านปฐมภูมิ (โวลต์)

$E2$ = แรงดันทางด้านทุติยภูมิ (โวลต์)

$N1$ = จำนวนรอบทางด้านปฐมภูมิ (รอบ)

$N2$ = จำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิ (รอบ)

4.4.3.4 คำนวณหากระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ ได้จากสูตรดังนี้

$$P = V1 \times I1$$

$$I1 = P / V1 \quad (\text{Amp})$$

∴ หาขนาดของลวดทองแดงทางด้านปฐมภูมิ (ใช้ค่า 450 เซอร์คิวลามีล / แอมแปร์)

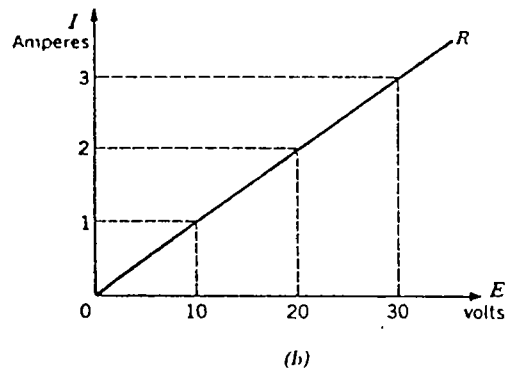
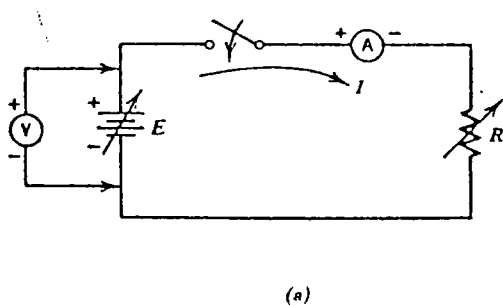
4.4.3.5 หากระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ ได้จากสูตร

$$P = V2 \times I2$$

$$I2 = P / V2 \quad (\text{Amp})$$

4.5 วงจรไฟฟ้า – อิเล็กทรอนิกส์

4.5.1 กฎของโอห์ม (Ohm's Law) ในปี ค.ศ. 1827 ยอร์จ ไซมอน โอห์ม ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยวงจรไฟฟ้าอย่างง่ายตามภาพประกอบ 14 a ประกอบการพิจารณา



ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า

โอห์มกำหนดให้ความต้านทานภายในวงจรมีค่าคงที่ แล้วเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นอีก 1 เทาซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 1 เทาด้วย นอกจากนี้เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นอีก 2 และ 3 เทา กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอีก 2 และ 3 เทาเช่นกัน ตามภาพประกอบ 14 b ทำให้สรุปได้ว่า “ กระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อค่าความต้านทานคงที่ ” จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้างกล่าวโอห์มสรุปเป็นสมการเพื่อใช้หาค่าความต้านทานดังนี้

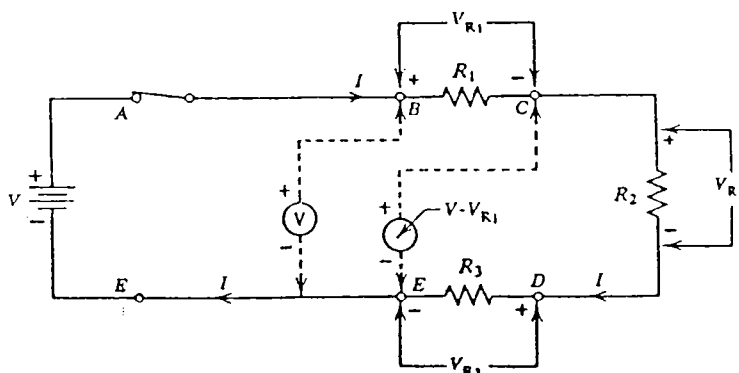
$$R = E / I \quad (4.4.22)$$

R = ความต้านทาน (โอห์ม)

E = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

4.5.2 กฎการแบ่งแรงดันไฟฟ้า



ภาพประกอบ 15 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

เมื่อนำกฎของโอห์มมาพิจารณาตามภาพประกอบ 15 ทำให้หาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_1 และ R_2 (V_1 และ V_2) ได้เป็น

$$I = E / R_T = E / (R_1 + R_2)$$

$$V_1 = IR_1 = (E / (R_1 + R_2)) R_1 \quad (4.4.23)$$

$$V_2 = IR_2 = (E / (R_1 + R_2)) R_2 \quad (4.4.24)$$

สมการ 4.4.23 และ 4.4.24 เป็นสมการที่สามารถนำมาใช้เป็นกฎในการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานใดๆในวงจรอนุกรมได้ดังนี้

$$V_x = E (R_x / R_T) \quad (4.4.25)$$

เมื่อ

V_x = แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานที่ต้องการทราบค่า

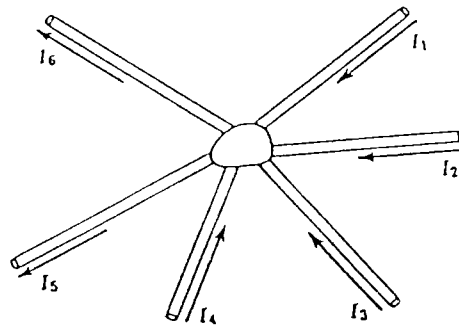
E = แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย

R_x = ตัวต้านทานที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม

R_T = ความต้านทานรวมของวงจร

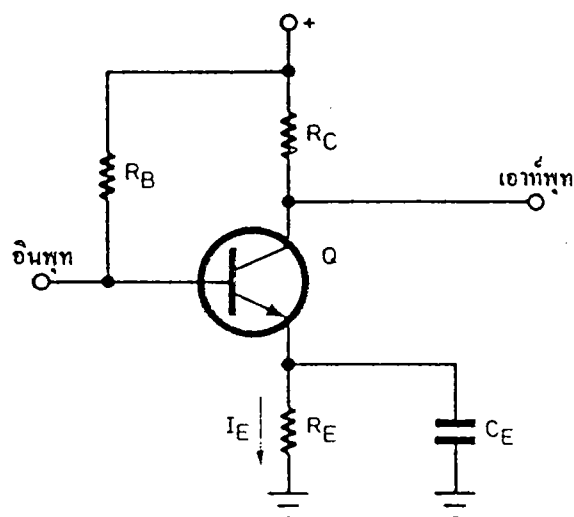
4.5.3 กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law ; KCL) กล่าวไว้ว่า

“ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่จุดต่อใดๆ ในวงจรไฟฟ้าจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าไหลออกจากจุดนั้น หรือ ผลรวมทางพีชคณิตระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่จุดต่อใดๆในวงจรไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากจุดนั้นมีค่าเท่ากับศูนย์



ภาพประกอบ 16 วงจรกระแสไฟฟ้าของเครื่องซอปปี้

4.6 ทรานซิสเตอร์และการไบแอส ทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งที่ประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยรอยต่อ พี – เอ็น 2 รอยต่อ คือ รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส และรอยต่อระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์ ทรานซิสเตอร์แบ่งออกเป็นทรานซิสเตอร์แบบ พี-เอ็น-พี และแบบ เอ็น-พี-เอ็น ในการใช้งานทรานซิสเตอร์ โดยทั่วไปเราจะไบแอสทรานซิสเตอร์ดังภาพประกอบ 17

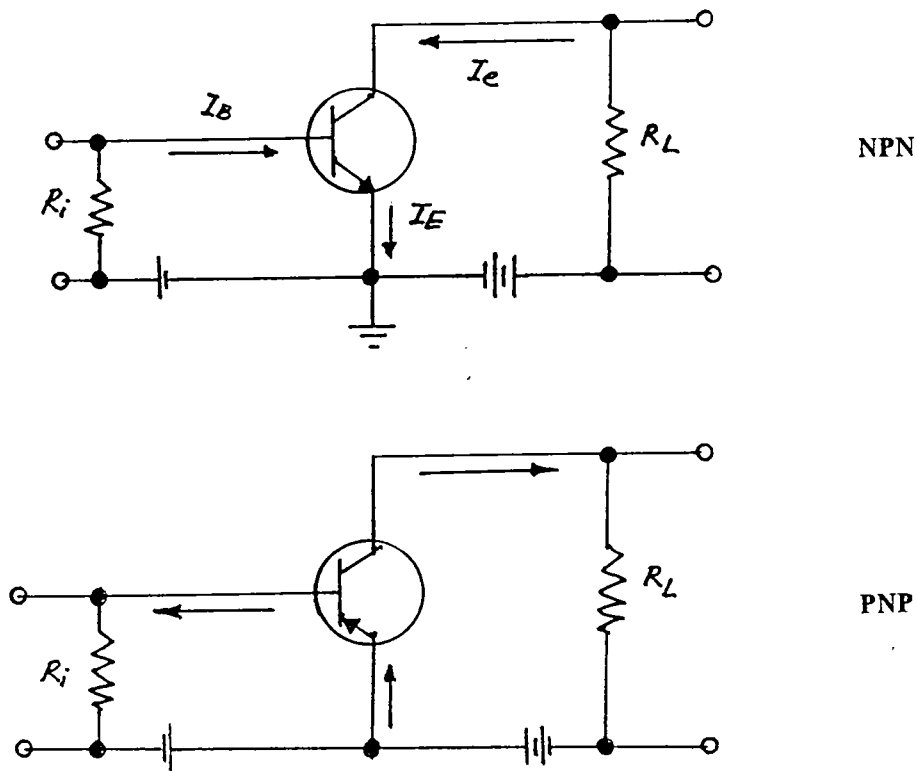


ภาพประกอบ 17 การไบแอสทรานซิสเตอร์

ทิศทางการไหลของกระแสจะเป็นอย่างไรก็ตามกระแสอิมิตเตอร์จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์เสมอ ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I_E = I_B + I_C$$

4.6.1 วงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common emitter circuit) ในวงจรอิมิตเตอร์ร่วม ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะต่ออยู่ระหว่างทางขาเข้าและขาออก สัญญาณขาเข้าจะป้อนเข้าทางด้านขาเบส และสัญญาณขาออกจะตกคร่อม R_L ที่ขาคอลเล็กเตอร์



ภาพประกอบ 18 แสดงวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

$$\text{อัตราขยายกระแสของวงจร } (\beta) = I_C / I_B \quad (4.4.26)$$

$$\text{อัตราขยายแรงดันของวงจร } (A_v) = \Delta V_C / \Delta V_B \quad (4.4.27)$$

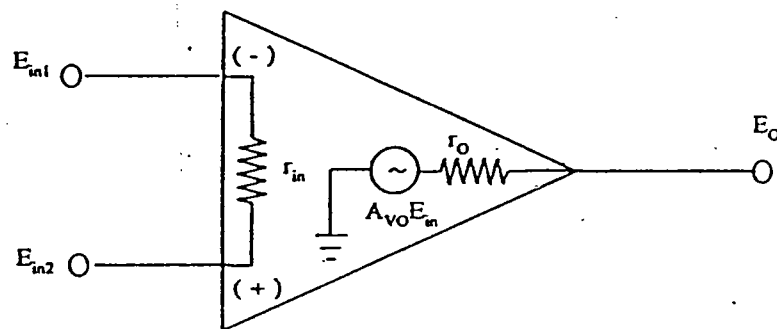
4.7 ออปแอมป์ (Operational amplifier)

ในการศึกษาออปแอมป์ อาจพิจารณาให้ออปแอมป์เป็นเครื่องขยายสัญญาณชนิดหนึ่งอยู่ในกล่อง ประกอบด้วยขาทางเข้าสองขา ขั้วทางออกหนึ่งขา แล้วทำการศึกษสมบัติต่างๆของเครื่องขยาย เช่น ความต้านทานทางเข้า ความต้านทานทางออก และแบนด์วิดท์ เป็นต้น ภาพประกอบ 38 เป็นวงจรสมมูลของออปแอมป์ วงจรประกอบด้วยขาทางเข้าชนิดความแตกต่างสองขา ทางออกหนึ่งขา ระหว่างขาทางเข้าจะมีความ

งานทางต่ออยู่ เรียกความต้านทานทางเข้า ทางด้านทางออกจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า อนุกรมอยู่กับความต้านทานตัวหนึ่งเรียกความต้านทานทางเข้าทางด้าน แรงเคลื่อนไฟฟ้าทางด้านทางออกนี้เท่ากับ $A_{vo}E_{in}$ โดยที่ A_{vo} เป็นอัตราขยายของเครื่องขยายสัญญาณ E_{in} เป็นความแตกต่างของสัญญาณที่ทางเข้า เครื่องขยายจะขยายเฉพาะผลต่างของสัญญาณ E_o เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ทางออก ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าเทียบกับศักย์ดินของวงจรการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ที่ทางเข้ากลับทาง(-) ในทิศทางเพิ่มขึ้นทำให้สัญญาณที่ทางออกเปลี่ยนแปลงในทิศทางลดลง และที่ทางเข้า (+) การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้าในทิศทางเพิ่มขึ้นจะทำให้สัญญาณที่ทางออกเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเพิ่มขึ้นด้วย

ในการออกแบบวงจรออปแอมป์จะพยายามให้มีสมบัติตามนี้
ออปแอมป์ในอุดมคติ

1. อัตราขยายความต่างศักย์วงเปิดเท่ากับอนันต์ $A_{vo}=\infty$
2. ความต้านทานทางเข้าเท่ากับอนันต์ $R_{in} = \infty$
3. ความต้านทานทางออกเท่ากับศูนย์ $R_o = 0$
4. แบนด์วิดท์ เท่ากับอนันต์ $BW = \infty$
5. มีความต่างศักย์ออฟเซตเท่ากับศูนย์ คือ $E_o = 0$ เมื่อ $E_{in}=0$

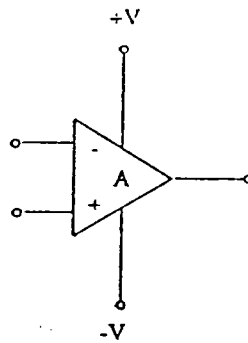


ภาพประกอบ 19 วงจรสมมูลของออปแอมป์

จากสมบัติอุดมคตินี้นำไปสู่คุณสมบัติสำคัญสำหรับการวิเคราะห์วงจร ที่ประกอบด้วยออปแอมป์อีกสองข้อคือ จากการที่อัตราขยายของออปแอมป์มีค่าเท่ากับอนันต์ สัญญาณไฟฟ้าใดๆที่ทางออกจะเป็นผลมาจากสัญญาณทางเข้าที่มีขนาดเล็กมาก จนกล่าวได้ว่าสัญญาณระหว่างขั้วทางเข้าของออปแอมป์เท่ากับศูนย์ การที่ความต้านทานทางเข้าของออปแอมป์ในอุดมคตินี้มีค่าเท่ากับอนันต์กล่าวได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ออปแอมป์ที่ขั้วทางเข้าเท่ากับศูนย์ การที่ความต้านทานทางเข้าของออปแอมป์ในอุดมคตินี้มีค่าเป็นอนันต์

4.7.1 สัญลักษณ์ของออปแอมป์ สัญลักษณ์ของออปแอมป์จะเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว มีขั้วสองขั้วที่ฐานของสามเหลี่ยม ได้แก่ขั้วทางเข้ากลับทางซึ่งแสดงด้วยเครื่องหมายลบ และขั้วทางเข้าไม่กลับทาง

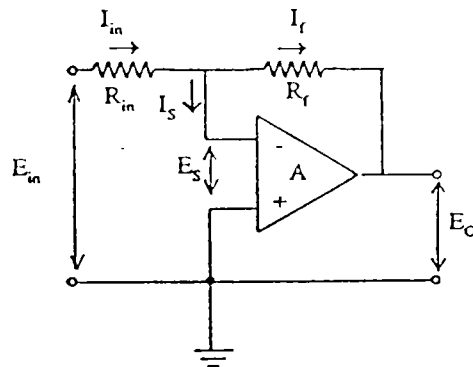
แสดงด้วยเครื่องหมายบวก โดยทั่วไปขั้วทางเข้าลบจะไว้ด้านบน เครื่องหมายของขั้วทางเข้าจะเขียนในสามเหลี่ยมตรงตำแหน่งทางเข้า ขั้วไฟฟ้าสำหรับต่อกลแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะเขียนต่อจากด้านล่างและด้านบนตามภาพประกอบ 18 ขั้วไฟฟ้านี้บางครั้งอาจไม่เขียนก็ได้ ซึ่งเป็นที่เข้าใจว่าถึงแม้จะไม่ได้เขียนขั้วไฟฟ้าในวงจรแต่ในทางปฏิบัติ จะต้องต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับวงจร ส่วนสุดท้ายได้แก่หมายเลขของอุปกรณ์ หมายเลขของออปแอมป์ จะเขียนไว้ที่กึ่งกลางของสามเหลี่ยม ในกรณีทั่วไปที่ไม่ได้ระบุหมายเลข จะใช้อักษร A เช่น A_1 , A_2 แทนออปแอมป์ตัวที่หนึ่งตัวที่สองในวงจร เป็นต้น



ภาพประกอบ 20 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

4.7.2 รูปแบบพื้นฐานของวงจรออปแอมป์ ออปแอมป์เป็นวงจรขยายสัญญาณ ที่สามารถนำมาประกอบกับวัสดุประกอบวงจรภายนอกเกิดเป็นวงจรขยายสัญญาณใหม่ ซึ่งมีสมบัติต่าง ๆ กันหลายรูปแบบ ในจำนวนรูปแบบต่าง ๆ นี้มีสองรูปแบบ ซึ่งถือเป็นรูปแบบพื้นฐาน คือวงจรขยายสัญญาณชนิดกลับทาง และวงจรขยายสัญญาณชนิดไม่กลับทาง

4.7.3 วงจรขยายสัญญาณรูปแบบกลับทาง ภาพประกอบ 20 เป็นวงจรขยายสัญญาณพื้นฐานชนิดกลับทาง ในวงจรนี้ทางเข้าบวกจะต่อกับศักย์ดินของวงจร สัญญาณที่ต้องการขยายจะเข้าที่ขั้วทางเข้าลบ ผ่านตัวต้านทาน R_{in} และมีการป้อนกลับของสัญญาณจากทางออกมาสู่ทางเข้าผ่านทางตัวต้านทาน R_f สมบัติของวงจรนี้ จะวิเคราะห์ได้โดยใช้คุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติ



ภาพประกอบ 21 วงจรขยายสัญญาณกลับทาง

จากการที่อัตราขยายสัญญาณของออปแอมป์มีค่าอนันต์ สัญญาณทางออก E_o จะเกิดจากสัญญาณทางเข้าที่มีขนาดเล็กมากจนประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้าให้ E_s เป็นความต่างศักย์ระหว่างขั้วทางเข้า $E_s = 0$ ศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้าลบจะเท่ากับศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้าบวกหรือเท่ากับศักย์ไฟฟ้าที่ดิน ดังนั้นความต่างศักย์ E_{in} จะ ปรากฏคร่อมตัวต้านทาน R_{in} และกระแสที่ไหลในตัวต้านทาน R_{in} คือ

$$I_{in} = E_{in} / R_{in} \quad (4.7.1)$$

จากการที่ความต้านทานทางเข้าที่ขั้วทางเข้ามีค่าสูงมาก กระแสที่ไหลเข้าสู่ออปแอมป์ I_s จึงเท่ากับศูนย์ แต่กระแส $I_{in} = I_s + I_f$ ดังนั้น

$$I_{in} = I_f \quad (4.7.2)$$

ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออก E_o เป็นศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมบน ตัวต้านทาน R_f ดังนั้น

$$E_o = - I_f R_f \quad (4.7.3)$$

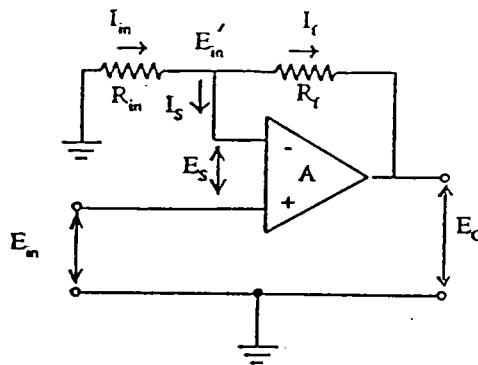
การที่ E_o มีเครื่องหมายเป็นลบเนื่องจาก ความต่างศักย์ที่ทางออกเป็นศักย์ไฟฟ้าเทียบกับดินของวงจร ซึ่งเมื่อพิจารณาทิศทางของกระแส I_f แล้วศักย์ไฟฟ้าทางด้านทางออกของออปแอมป์จะเป็นลบเทียบกับด้านทางเข้าหรือลบเทียบกับดิน

จากสมการ 4.7.1 และ 4.7.2 และ 4.7.3

$$E_{in} / R_{in} = - E_o / R_f \quad (4.7.4)$$

สมการ 4.7.4 เป็นสมการแสดงอัตราขยายของวงจรขยายกลับทาง อัตราขยายที่เป็นลบหมายความว่า ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกมีเฟสตรงข้ามกับศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้า อัตราขยายนี้ กำหนดได้ด้วยความต้านทานของตัวต้านทานภายนอกออปแอมป์สองตัวคือ R_f และ R_{in} อิมพีแดนซ์ทางเข้าของวงจรจะเท่ากับความต้านทานของตัวต้านทานของตัวต้านทาน R_{in} ที่ตำแหน่งขั้วทางเข้าลบ ของออปแอมป์เป็นจุดเชื่อมต่อของสัญญาณเข้า และสัญญาณป้อนกลับ และเป็นตำแหน่งที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับที่ทางเข้าบวก (ซึ่งในวงจรนี้ศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้าบวกคือศักย์ไฟฟ้าดิน) โดยไม่ขึ้นกับปริมาณกระแส I_{in} ดังนั้นจุดนี้จึงเปรียบเสมือนดินของวงจร (virtual ground)

4.7.4 วงจรขยายสัญญาณไม่กลับทาง วงจรขยายสัญญาณออปแอมป์พื้นฐานชนิดที่สองเป็นวงจรขยายสัญญาณ ไม่กลับทาง ตามภาพประกอบ 21 สัญญาณที่ต้องการขยายจะเข้าที่ทางเข้าบวก ที่ขั้วทางเข้าลบจะเป็นสัญญาณที่แบ่งมาทางออกโดยวงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน R_f และ R_{in} จากการที่ไม่มีกระแสไหลเข้าที่ขั้วทางเข้า ($I_s = 0$) และความต่างศักย์ระหว่างขั้วทางเข้ากับศูนย์ ($E_s = 0$) ศักย์ไฟฟ้า E_{in} จึงเท่ากับ E'_{in}



ภาพประกอบ 22 วงจรขยายสัญญาณไม่กลับทาง

จากการใช้กฎความต่างศักย์ของเคอร์ชอฟฟ์ทางด้านทางเข้า ได้กระแสทางเข้าคือ

$$I_{in} = - E_{in} / R_{in} \quad (4.7.5)$$

ถ้าให้ $I_s = 0$

$$I_{in} = I_f \quad (4.7.6)$$

ดังนั้น

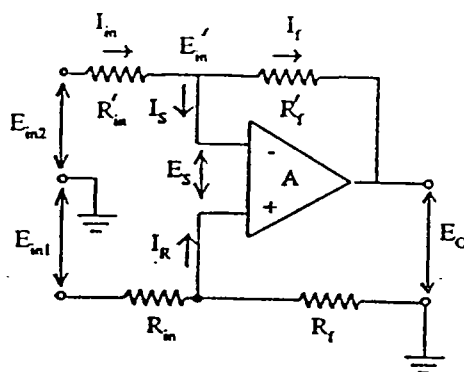
$$E_o = -I_{in}(R_{in} + R_f) \quad (4.7.7)$$

แทนค่า I_{in} จากสมการ 4.7.5 ลงใน 4.7.7 ได้

$$E_o / E_{in} = (R_{in} + R_f) / R_{in} \quad (4.7.8)$$

จากสมการอัตราขยายนี้ แสดงให้เห็นว่า อัตราขยายนี้กับค่าของตัวต้านทานภายนอกเพียงสองตัว และอัตราขยายนี้มีค่าที่ต่ำสุดเท่ากับหนึ่งเมื่อความต้านทานของตัวต้านทาน R_i เท่ากับศูนย์ เช่นเดียวกับกรณีของวงจรขยายกลับทาง กระแส I_{in} จะเท่ากับกระแส I_i เสมอ และปริมาณกระแสไม่ขึ้นกับความต้านทานของตัวต้านทาน R_i ดังนั้นจึงสามารถใช้ความต้านทานของ R_i คู่อัตราขยายแบบเชิงเส้นได้ โดยอัตราขยายจะแปรค่าจากหนึ่งถึงอนันต์ เมื่อความต้านทานของตัวต้านทาน R_i แปรค่าจากศูนย์ถึงอนันต์ ความต้านทานทางเข้าของวงจรขยายรูปแบบไม่กลับทางจะเท่ากับความต้านทานทางเข้าของตัวออปแอมป์ ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณทางเข้าต่อเนื่องกับทางเข้าของออปแอมป์โดยตรง ซึ่งสำหรับออปแอมป์ในอุดมคติ ความต้านทานนี้มีค่าเท่ากับอนันต์

4.7.5 วงจรขยายสัญญาณความแตกต่าง วงจรขยายสัญญาณความแตกต่าง เป็นวงจรที่รวมวงจรกลับทางและวงจรไม่กลับทางเข้าด้วยกัน ตามภาพประกอบ 22 สัญญาณที่ต้องการขยายจะเข้าสู่วงจรที่ขาทางเข้า E_{in1} และ E_{in2} การวิเคราะห์ห้วงจรนี้สามารถกระทำได้โดยแยกพิจารณาวงจรทีละส่วน แล้วนำมาประกอบกัน



ภาพประกอบ 23 วงจรขยายสัญญาณความแตกต่าง

จากสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติ I_s , I_r และ E_s เท่ากับศูนย์ ถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกที่เป็นผลมาจาก E_{in1} เท่ากับ E_{o1} และที่เป็นผลมาจาก E_{in2} เท่ากับ E_{o2} การหาค่า E_{o1} ทำได้โดยลัดวงจรทางเข้า E_{in2} การลัดวงจรนี้ ทำให้วงจรเป็นรูปแบบของวงจรขยายไม่กลับทาง ซึ่งสัญญาณที่ทางเข้าบวกจะได้รับขยายด้วยอัตราขยาย

$$A_1 = (R'_{in} + R_f) / R'_{in}$$

โดยมีสัญญาณที่ทางเข้าบวกเป็นสัญญาณที่แบ่งมาจาก E_{in1} ด้วยตัวต้านทาน R_{in} และ R_f เท่ากับ

$E_{in}((R_f / (R_{in} + R_f)))$ ดังนั้น E_{o1} เท่ากับสัญญาณที่ทางเข้านี้ คูณกับอัตราขยาย A_1 เท่ากับ

$$E_{o1} = E_{in} ((R_f / (R_{in} + R_f)) ((R'_{in} + R_f) / R'_{in})) \quad (4.7.9)$$

จากการที่ตัวต้านทาน R'_{in} R_{in} R_f R_f เป็นวัสดุภายนอกตัวออปแอมป์ ซึ่งสามารถกำหนดได้ ถ้าความต้านทานของตัวต้านทาน $R_{in} = R'_{in}$ และ R_f สมการ 2.7.9 จะเป็น

$$E_{o1} = E_{in1}(R_f / R_{in}) \quad (4.7.10)$$

สมการ 4.7.10 เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกเนื่องจากสัญญาณทางเข้า E_{in1}

การหาค่าของ E_{o2} ทำได้โดยการลัดวงจรทางเข้า E_{in1} การลัดวงจรนี้ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้าบวกของออปแอมป์เท่ากับศักย์ไฟฟ้าดินของวงจร ซึ่งวงจรนี้เป็นวงจรขยายรูปแบบกลับทาง ซึ่งอัตราขยาย ของวงจรเท่ากับ

$$A_2 = - R_f / R'_{in}$$

จากการที่ให้ ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_{in} = R'_{in}$ และ $R_f = R_f$ เขียนสมการนี้ใหม่ได้เป็น

$$E_{o2} = - E_{in2} (R_f / R_{in}) \quad (4.7.11)$$

เมื่อนำสัญญาณทางออก E_{o1} และสัญญาณทางออก E_{o2} มารวมกันจะได้ ศักย์ไฟฟ้าทางออก E_o ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณทางเข้า E_{in1} และ E_{in2} รวมกัน ดังนั้น

$$E_o = E_{o1} + E_{o2} = E_{in1} (R_f / R_{in}) - E_{in2} (R_f / R_{in})$$

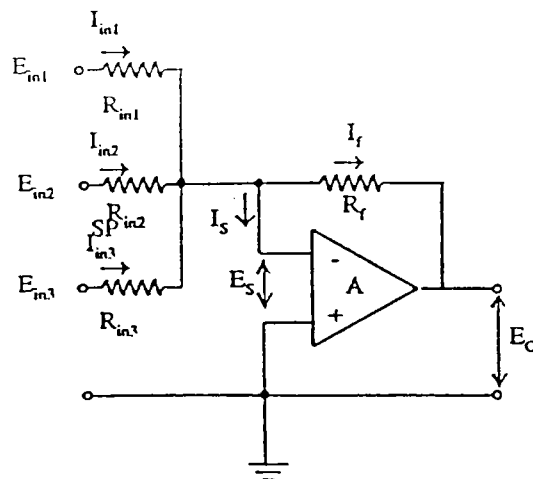
หรือเขียนในรูปของอัตราขยายสัญญาณได้เป็น

$$(E_o / (E_{in1} - E_{in2})) = R_f / R_{in} \quad (4.7.12)$$

สมการที่ 4.7.12 นี้เป็นสมการอัตราขยายความแตกต่าง ของสัญญาณทางเข้า วงจรนี้มีสมบัติเฉพาะคือจะไม่ขยายสัญญาณทางเข้าที่เหมือนกัน ซึ่งเห็นได้จากสมการ ถ้า $E_{in1} = E_{in2}$ แล้ว $E_{in1} - E_{in2} = 0$ และศักย์ไฟฟ้าทางออกเท่ากับศูนย์ สมบัติการไม่ขยายสัญญาณที่เหมือนกันของวงจร เป็นประโยชน์ในการตัดสัญญาณรบกวน ที่มีแหล่งกำเนิดร่วมกันสมบัติในการตัดสัญญาณร่วมกันเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อให้ความต้านทานของตัวต้านทาน

$R_{in} = R'_{in}$ และ $R_f = R_f$ อิมพีแดนซ์ที่ทางเข้าทั้งสองของวงจรไม่เท่ากัน อิมพีแดนซ์ ที่ทางเข้าบวกจะเท่ากับ $R_{in} + R_f$ อิมพีแดนซ์ ที่ทางเข้าลบจะเท่ากับ R'_{in} และอิมพีแดนซ์ระหว่างทางเข้าทั้งสองเท่ากับ $R_{in} + R'_{in}$

4.7.6. วงจรรวมกลับทาง



ภาพประกอบ 24 วงจรรวมกลับทาง

วงจรรวมกลับทาง (Summing inverter) เป็นวงจรที่ใช้ประโยชน์จากจุดรวมสัญญาณในวงจรขยายสัญญาณพื้นฐานชนิดกลับทาง ทำหน้าที่รวมสัญญาณที่ทางเข้า ภาพประกอบ 3.14 เป็นวงจรรวมสัญญาณกลับทาง เช่นเดียวกับวงจรขยายสัญญาณกลับทางทั่วไป กระแส $I_s = 0$ ความต่างศักย์ $E_s = 0$ และ $I_f = I_{in}$ โดยในวงจรรวมกลับทาง I_{in} เป็นผลรวมทางพีชคณิตของกระแสทางเข้า ซึ่งมีหลายจุดเช่น $I_{in1}, I_{in2}, I_{in3}$ เป็นต้น จากการที่ $E_s = 0$ ได้

$$I_{in1} = E_{in1} / R_{in1} ; I_{in2} = E_{in2} / R_{in2} ; I_{in3} = E_{in3} / R_{in3} \quad (4.7.13)$$

กระแสที่ผ่านจุดรวม(SP) คือ

$$I_{in} = I_{in1} + I_{in2} + I_{in3} \quad (4.7.14)$$

จากศักย์ไฟฟ้าที่จุดรวมเท่ากับศักย์ไฟฟ้าดิน

$$I_f = -E_o / R_f \quad (4.7.15)$$

$$\text{จาก } I_s = 0 \quad I_f = I_{in} \quad (4.7.16)$$

ดังนั้นจากสมการ 4.7.14 , 4.7.15 และ 4.7.16

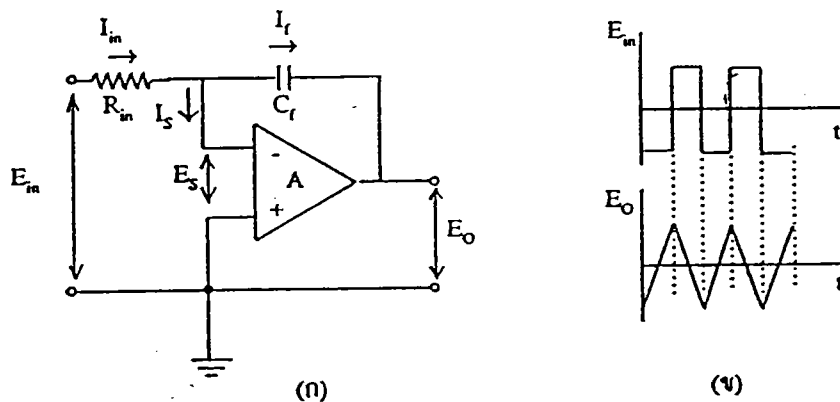
$$- E_o / R_f = I_{in1} + I_{in2} + I_{in3}$$

เมื่อแทนค่า $I_{in1}, I_{in2}, I_{in3}$ จากสมการ 3.13 แล้วจัดรูปใหม่ได้ เป็น

$$E_o = - ((E_{in1} (R_f/R_{in1})) + (E_{in2} (R_f/R_{in2})) + (E_{in3} (R_f/R_{in3}))) \quad (4.7.17)$$

สมการ 4.7.17 แสดงให้เห็นว่า สัญญาณที่ทางออกเป็นผลรวมแบบพีชคณิต ของสัญญาณทางเข้า โดยสัดส่วน ในการรวมขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความต้านทาน R_f ต่อ R_{in} ของสัญญาณเข้า แต่ละสัญญาณ ดังนั้นวงจรนี้จึง เป็นวงจรรวมสัญญาณ ซึ่งสามารถกำหนดสัดส่วนของสัญญาณเข้าที่จะนำมารวมกัน อัตราขยายสัญญาณของ วงจรโดยรวมจะแปรตามค่าของ ความต้านทาน R_f เช่นเดียวกับวงจรขยายสัญญาณในวงจรขยายกลับทาง สมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งของวงจรนี้คือ สัญญาณที่ป้อนเข้ามาที่ทางเข้าแต่ละทางเข้า จะรวมกันที่จุดรวม แบบเชิงเส้น โดยสัญญาณจากทางเข้าหนึ่งจะไม่รบกวนหรือส่งผลกระทบต่ออีกทางเข้าหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจาก สัญญาณแฉะแต่ละช่องจะรวมกันตรงจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าเหมือนกับดินของวงจร วงจรนี้สามารถรวมสัญญาณจาก หลายช่องสัญญาณ โดยเพิ่มตัวต้านทานทางเข้าที่จุดรวม เช่น R_{in4}, R_{in5} เป็นต้น

4.7.7 วงจรอินทิเกรเตอร์ จากที่ได้ศึกษามาแล้ว วงจรขยายสัญญาณกลับทางแสดงสมบัติใน การที่จะคงค่ากระแสป้อนกลับ I_f ให้มีค่าเท่ากับกระแส I_{in} วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นวงจรที่ใช้สมบัตินี้ของวงจรกลับ ทางในอินทิเกรตสัญญาณทางเข้า โดยแปลงวงจรขยายกลับทางเล็กน้อย ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวต้านทาน R_f ของวงจรขยายกลับทางเป็นตัวเก็บประจุ C_f ตามภาพประกอบ 43 เช่นเดียวกับวงจรขยายกลับทาง $E_s = 0$, $I_s = 0$ และ $I_f = I_{in}$ ศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้า E_{in} ทำให้เกิดกระแส I_{in} ไหลผ่านตัวต้านทาน R_{in} โดยที่ $I_{in} = E_{in} = E_{in}/R_{in}$



ภาพประกอบ 25 (ก) วงจรอินทิเกรเตอร์ (ข) สัญญาณทางเข้าและทางออก

สมมุติว่าสัญญาณทางเข้าเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมตามรูป 3.6.3 (ข) จากการที่กระแส $i_{in} = i_t$ ถ้ากระแส i_{in} คงที่ กระแส i_t จะคงที่ด้วยเช่นกัน กระแสนี้จะทำให้เกิดความต่างศักย์คร่อมบนตัวเก็บประจุ C_f ความต่างศักย์นี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาแบบเชิงเส้น ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกจะเป็นค่าอินทิกรัลของศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้า

การที่กระแส i_t ไหลเข้าตัวเก็บประจุทำให้เกิด ประจุบนตัวเก็บประจุ ปริมาณประจุสัมพันธ์กับกระแสตามสมการ

$$\Delta q = i_t \Delta t = i_{in} \Delta t \quad (4.7.18)$$

ดังนั้นความต่างศักย์คร่อมบนตัวเก็บประจุ ที่เกิดจากประจุนี้คือ

$$\Delta E = \Delta q / C_f = i_{in} (\Delta t / C_f) \quad (4.7.19)$$

ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกของวงจร คือความต่างศักย์ที่คร่อมบนตัวเก็บประจุ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่ทางออก จึงเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ที่คร่อมบนตัวเก็บประจุ ถ้าให้การเปลี่ยนแปลง ของความต่างศักย์ที่ทางออก คือ

$$\Delta E_o = - i_{in} (\Delta t / C_f) \quad (4.7.20)$$

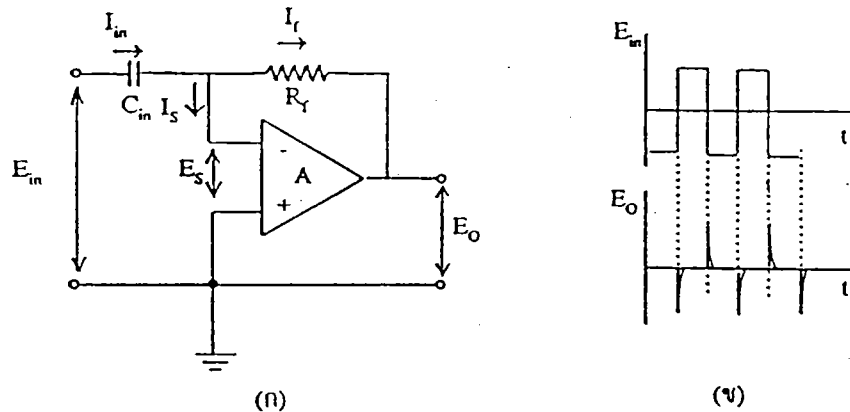
การให้เครื่องหมายลบในสมการ 4.7.20 เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าเทียบกับดินของวงจร ส่วนสมการความต่างศักย์ที่คร่อมบนตัวเก็บประจุ 4.7.19 เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ดินเทียบกับทางออก ดังนั้นขั้วของศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกตามสมการ 4.7.20 จึงตรงข้ามกับสมการ 4.7.19

แทนค่า $i_{in} = E_{in}/R_{in}$ ลงในสมการ 4.7.20 จะได้

$$\Delta E_o / \Delta t = (- E_{in} / (R_{in} C_f)) \quad (4.7.21)$$

อิมพีแดนซ์ทางเข้าของวงจรนี้เท่ากับ R_{in} เช่นเดียวกับวงจรขยายกลับทาง จากสมการ 4.7.21 ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออก E_o จะเท่ากับการอินทิเกรตศักย์ ไฟฟ้าทางเข้า ตามตัวอย่างในรูป 4.7.16 สัญญาณทางเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยม เมื่อผ่านวงจรอินทิเกรเตอร์แล้วจะได้สัญญาณที่ทางออกเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม

4.7.8 วงจรอนุพันธ์



ภาพประกอบ 26 วงจรอนุพันธ์

วงจรอนุพันธ์ (differentiator) เป็นวงจรที่มีพื้นฐานมาจากวงจรขยายชนิดกลับทางเช่นเดียวกับวงจรขยายอินทิเกรเตอร์ เมื่อเทียบกับวงจรกลับทาง ที่ทางเข้าของวงจรจะใช้ตัวเก็บประจุ C_{in} แทนตัวต้านทาน R_{in} การจัดตำแหน่งของตัวเก็บประจุกับตัวต้านทานในวงจรอนุพันธ์จึงสลับกับวงจรอินทิเกรเตอร์ กระแสที่ทางเข้าเป็นที่ใช้ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุ กระแสนี้จะสัมพันธ์กับความต่างศักย์ที่คร่อมบนตัวเก็บประจุ ตามสมการ

$$I_{in} = ((\Delta V_c C_{in}) / \Delta t) \quad (2.7.22)$$

เมื่อ V_c เป็นความต่างศักย์ที่คร่อมบนตัวเก็บประจุ และ Δt เป็นช่วงเวลาที่กระแสไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุ

จากสมบัติของออปแอมป์อุดมคติ ความต่างศักย์ $E_s = 0$ ทำให้ความต่างศักย์ที่คร่อมบนตัวเก็บประจุเท่ากับความต่างศักย์ E_{in} และการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ที่คร่อมบนตัวเก็บประจุเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ที่ทางเข้า หรือ $\Delta V_c = \Delta E_{in}$ แทนค่าลงในสมการ 2.7.22

$$I_{in} = ((\Delta E_{in} C_{in}) / \Delta t) \quad (2.7.23)$$

จากการที่วงจรขยายเป็นวงจรรูปแบบกลับทาง ศักย์ไฟฟ้าทางออกคือ

$$E_o = -I_f R_f = -I_{in} R_f \quad (2.7.24)$$

เมื่อแทนค่า I_{in} จากสมการ 4.7.23 ลงในสมการ 4.7.24 จะได้

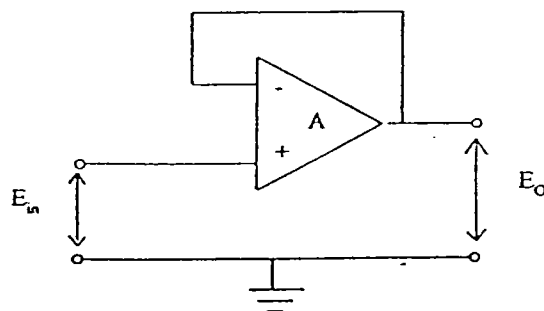
$$E_o = - ((\Delta E_{in} R_{in} C_{in}) / \Delta t) \quad (4.7.25)$$

สมการที่ 4.7.25 แสดงให้เห็นว่าศักย์ไฟฟ้าที่ทางออก เป็นอนุพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้า ถ้าสมมติว่าที่ทางเข้ามีสัญญาณเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกจะเป็นตามที่แสดงในภาพประกอบ 24 (ข)

4.7.9 วงจรติดตามศักย์ไฟฟ้า (Voltage follower) ภาพประกอบ 26 ขั้วชนิดความแตกต่าง เป็นวงจรที่มีพื้นฐานมาจากวงจรขยายไม่กลับทาง วงจรนี้มีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับตัววงจรขยายไม่กลับทาง วงจรนี้จะเหมือนกับวงจรขยาย ไม่กลับทางที่มีความต้านทาน R_{in} เท่ากับอนันต์ และมีความต้านทาน R_o เท่ากับศูนย์ การป้อนกลับของสัญญาณทางออกจะเท่ากับ 100 %

จากการที่ E_o เท่ากับศูนย์ ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วทางเข้าลบจะเท่ากับศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วทางเข้าบวก หรือเท่ากับ E_{in} เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกเท่ากับที่ทางเข้าลบ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกจึงเท่ากับศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้า

อิมพีแดนซ์ทางเข้าของวงจรขยาย จะเท่ากับอิมพีแดนซ์ทางเข้าของออปแอมป์ ซึ่งมีค่าสูงมาก ส่วนอิมพีแดนซ์ทางออกของวงจรเท่ากับศูนย์ วงจรที่มีสมบัติเช่นนี้เป็นวงจรที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างต้นกำเนิดสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ทางออกสูง กับภาระที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากต้นกำเนิดสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ทางออกสูง เมื่อเชื่อมต่อกับภาระที่มีอิมพีแดนซ์ไม่สูงเพียงพอ ความต่างศักย์ที่คร่อมบนภาระจะไม่เท่ากับศักย์ไฟฟ้าจากต้นกำเนิดสัญญาณ ได้ตัดคร่อมบนอิมพีแดนซ์ทางออกของต้นกำเนิดสัญญาณ



ภาพประกอบ 27 วงจรขยายสัญญาณติดตามศักย์ไฟฟ้า

เนื่องจากวงจรนี้มีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกจึงเหมือนกับที่ทางเข้า เราจึงเรียกววงจรนี้ว่าวงจรติดตามความต่างศักย์

5. การออกแบบวงจรไฟฟ้า – อิเล็กทรอนิกส์

5.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

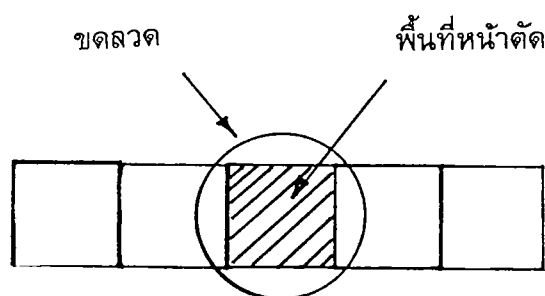
5.1.1 การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จะหาขนาดพื้นที่หน้าตัดได้ ต้องรู้กำลังของหม้อแปลงมีหน่วยเป็น วัตต์ (VA) คำนวณได้ดังนี้

$$\text{กำลังของหม้อแปลง} = \text{แรงดัน} \times \text{กระแส}$$

VA

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} = \sqrt{\text{กำลังหม้อแปลง} / 5.58}$$

ตารางนี้



ภาพประกอบ 13 พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

5.1.2 หาจำนวนรอบของขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ

จากสูตร

$$N1 = E1 \times 10^8 / (4.44 \times F \times Bm \times A) \quad \text{รอบ}$$

$N1$ = จำนวนรอบของขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ (รอบ)

$E1$ = แรงดันทางด้านปฐมภูมิ (โวลต์)

F = ความถี่ (เฮิรตซ์)

Bm = ความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ผ่านแกนเหล็กยังไม่อิ่มตัว
(ใช้ 64,500 เสิน / ตารางนิ้ว)

A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (ตารางนิ้ว)

แรงดันทางด้านปฐมภูมิที่ต้องการ เช่นไฟฟ้าที่เราใช้กันทั่วไปเท่ากับ 220 โวลต์ เราสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} N1 &= 220 \times 10^8 / (4.44 \times 50 \times 64,500 \times 9.46) \quad \text{รอบ} \\ &= 162.4 \quad \text{รอบ} \end{aligned}$$

5.1.3 หาจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิ เราสามารถหาได้จากสูตร

$$E1 / E2 = N1 / N2$$

โดย

$$E1 = \text{แรงดันทางด้านปฐมภูมิ (โวลต์)}$$

$$E2 = \text{แรงดันทางด้านทุติยภูมิ (โวลต์)}$$

$$N1 = \text{จำนวนรอบทางด้านปฐมภูมิ (รอบ)}$$

$$N2 = \text{จำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิ (รอบ)}$$

เช่น ถ้าให้

$$E1 = 220 \text{ V}$$

$$E2 = 1,500 \text{ V}$$

$$N1 = 162.4 \text{ รอบ}$$

ฉะนั้น

$$N2 = (N1 \times E2) / E1$$

$$= (162.4 \times 1,500) / 220$$

$$= 1,107 \text{ รอบ}$$

5.1.4 คำนวณหากะแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ดังนี้

หาคะแสด้านปฐมภูมิ

$$P = V1 \times I1$$

$$I1 = P / V1 \text{ (Amp)}$$

ถ้าให้ P เท่ากับ 500 VA และ V1 เท่ากับ 220 โวลต์ เราสามารถแทนค่าได้ดังนี้

$$I1 = 500 / 220$$

$$= 2.2 \text{ Amp.}$$

หาคะแสด้านทุติยภูมิ ถ้าให้ P เท่ากับ 500 VA และ V2 เท่ากับ 1,500 โวลต์ เราสามารถแทนค่าได้ดังนี้

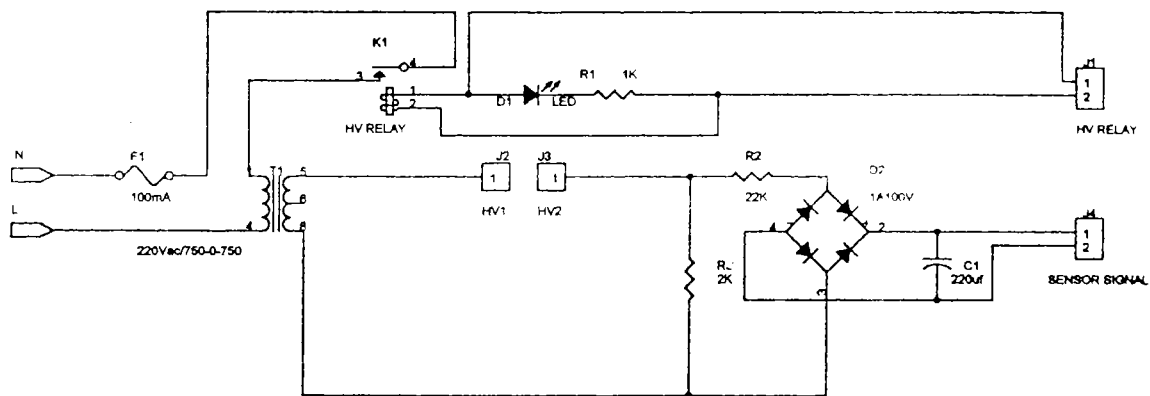
$$P = V2 \times I2$$

$$I2 = P / V2 \text{ (Amp)}$$

แทนค่าได้ดังนี้

$$I2 = 500 / 1,500$$

$$= 0.33 \text{ Amp.}$$



ภาพประกอบ 28 วงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล

5.2 ออกแบบวงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล เนื่องจากต้องการตรวจสอบกระแสรั่วไหลในขณะป้อนแรงดันสูง ดังนี้

จากกฎของโอห์ม

$$E = IR$$

จากวงจรภาพประกอบ 27 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_T = R_1 \times R_2 / (R_1 + R_2)$$

เพราะฉะนั้น

$$I_{R1} = (R_2 / (R_1 + R_2)) \times I_T$$

5.3 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน กำหนดอัตราการขยายของออปโตทรานซิสเตอร์ เท่ากับ (a) = 10 เท่าและคำนวณได้ดังนี้

ฉะนั้น

$$I_C = a \times I_{R1}$$

$$V_{O1} = I_C R_C$$

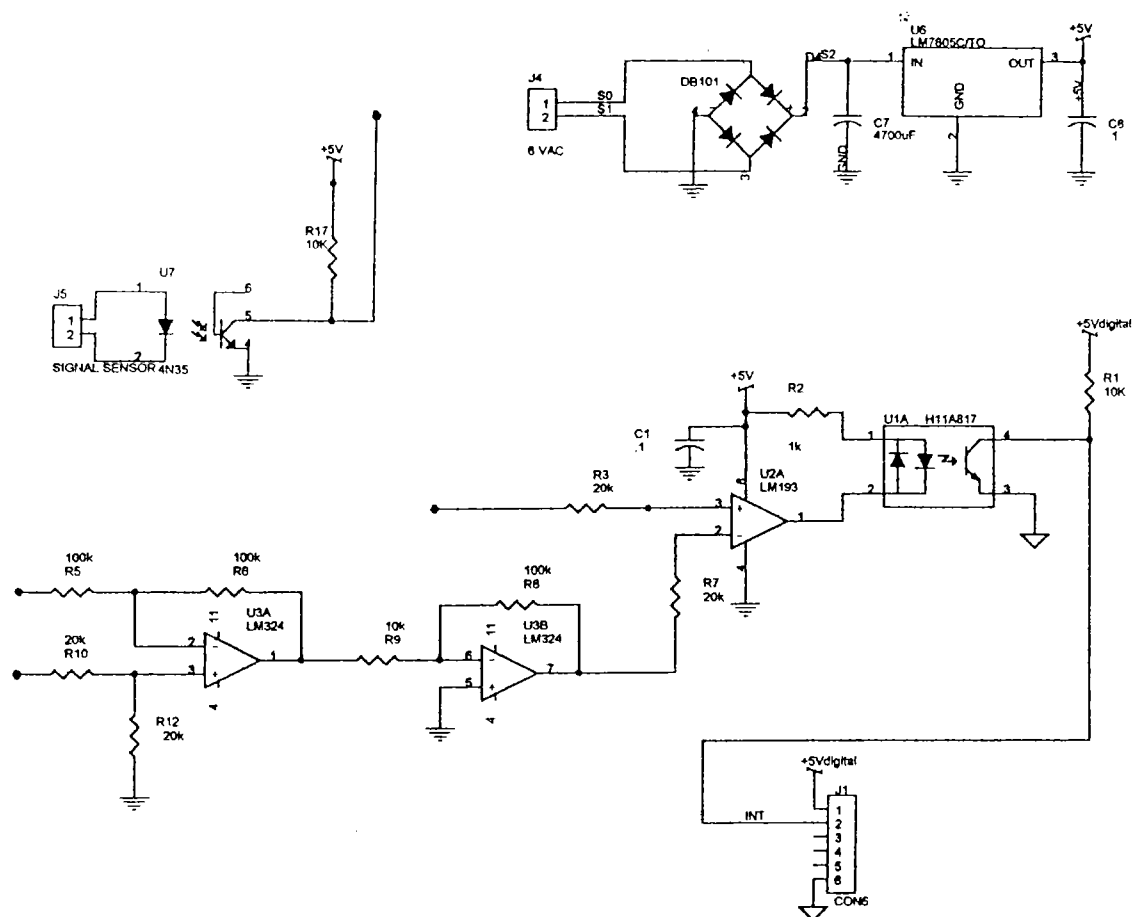
จากวงจรภาพประกอบ 28 จะได้

$$V_O = (1 + (R_F / R_1)) V_{CE}$$

ให้ $R_F = R_1$

$$V_O = 2 V_{O1}$$

จากวงจรเปรียบเทียบ และจากการคำนวณวงจรตรวจสอบ สามารถกำหนดให้ค่าของแรงดันเปรียบเทียบตามที่เรากำลังต้องการ



จากภาพประกอบ 29 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

6.มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

6.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์โดยทั่วไป เนื่องจากเครื่องใช้ไฟฟ้านั้น มีอยู่มากมายหลายชนิด และเครื่องใช้ไฟฟ้าเหล่านี้อาจจะก่อให้เกิดอันตรายกับผู้ใช้งาน หรือผู้ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าเหล่านี้ ถ้าอุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นมาอย่างไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการทางไฟฟ้าแล้ว ผู้ที่นำเครื่องใช้ไฟฟ้านี้ไปใช้งานก็อาจจะเป็นอันตรายขึ้นได้ เพื่อให้การผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้านี้ได้มาตรฐานเหมือนกัน อีกทั้งการผลิตที่มีการควบคุมทั้งคุณภาพและคุณสมบัติตลอดจนค่าทางเทคนิคต่างๆที่สำคัญทางไฟฟ้า ให้มีค่าเทคนิคต่างๆที่ถูกต้องตามหลักวิชาการดังนั้นในประเทศที่ได้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา เยอรมันตะวันตก ญี่ปุ่น สวีเดน และประเทศอื่นๆจึงได้สร้างกฎเกณฑ์ทางไฟฟ้าเหล่านี้ให้เกิดขึ้น สำหรับประเทศที่มีความเจริญทางด้านอุตสาหกรรมมากประเทศหนึ่งก็คือ ประเทศเยอรมันตะวันตก ก็ได้สร้างมาตรฐานต่างๆขึ้นมา โดยสมาคมทางไฟฟ้าที่สำคัญ 2 สมาคม ก็คือ

- 1 . DIN (Deutsches Institut fur Normung e.V.) และ
- 2 . VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker e.V.)

แต่เนื่องด้วยในแต่ละประเทศ มีสภาพภูมิอากาศและสภาพแวดล้อมของแต่ละประเทศมีความแตกต่างกัน นอกจากนั้นแล้ววิศวกรไฟฟ้าในแต่ละประเทศก็ยังมีความคิดเห็นเกี่ยวกับเทคนิคต่างๆทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งก็เป็นเหตุที่ทำให้มาตรฐานในแต่ละประเทศมีข้อกำหนด หรือกฎเกณฑ์ที่ถูกใช้ในการทดสอบค่าทางไฟฟ้าต่างๆก็มีความต้องการที่แตกต่างกันออกไป ด้วยเหตุนี้ ในแต่ละประเทศที่เจริญแล้ว จึงได้มีการสร้างมาตรฐานของแต่ละประเทศขึ้นมา เพื่อสอดคล้องกับความต้องการของประเทศนั้นๆ สำหรับประเทศไทยก็มีการตั้งข้อกำหนดทางด้านความปลอดภัยของกระทรวงอุตสาหกรรม ดังจะขอยกตัวอย่างมาแสดงดังนี้

6.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.934-2533 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 1601 (พ.ศ.2533) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2511 เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พัดลมไฟฟ้ากระแสสลับ เฉพาะด้านความปลอดภัย อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 15 แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2511 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมออกประกาศกำหนดมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พัดลมไฟฟ้ากระแสสลับ เฉพาะด้านความปลอดภัย มาตรฐานเลขที่ มอก.934-2533 ไว้ดังมีรายละเอียดต่อท้ายประกาศนี้ ประกาศ ณ วันที่ 18 พฤษภาคม 2533 โดยมีพลตำรวจเอกประมาณ อดิเรกสาร เป็นรัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมลงนามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพัดลมไฟฟ้ากระแสสลับ เฉพาะด้านความปลอดภัย ข้อ1.ขอบข่าย ข้อ1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเฉพาะด้านความปลอดภัยนี้กำหนด ส่วนประกอบและการทำคุณลักษณะที่ต้องการ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบพัดลมไฟฟ้ากระแสสลับ ข้อ1.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเฉพาะด้านความปลอดภัยนี้ครอบคลุมเฉพาะพัดลมไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตั้งโต๊ะ ชนิดติดผนัง ชนิดตั้งพื้น ชนิดแขวนเพดาน ชนิดสายรอบตัวและชนิดระบายอากาศที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส แรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 250 โวลต์ มีหรือไม่มีตัวเก็บประจุ และใช้งานเฉพาะภายในอาคารหรือสถานที่อื่นโดยมีลักษณะการใช้งานคล้ายกัน ข้อ2.บทนิยาม ความหมายของคำที่ใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเฉพาะด้านความปลอดภัยนี้ มีดังต่อไปนี้ ข้อ2.1 พัดลมกระแสสลับ ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า พัดลม. หมายถึง พัดลมที่มีใบพัดตั้งแต่ 2 ใบขึ้นไป ไข่มอเตอร์หมุนโดยตรง ข้อ2.2 แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่ผู้ทำระบุไว้ที่พัดลม ข้อ2.3 พิสัยแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด หมายถึง ขีดจำกัดของแรงดันไฟฟ้าระหว่างค่าต่ำสุดกับค่าสูงสุดที่ผู้ทำระบุไว้ที่พัดลม ข้อ4.6 ความทนไฟฟ้าแรงสูง พัดลมต้องทนแรงดันไฟฟ้าทดสอบได้เป็นเวลา 1 นาที โดยไม่เกิดการเสียหายฉนวนฉนวน การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 7.6,ข้อ7.6การทดสอบความทนไฟฟ้าแรงสูง ข้อ7.6.1 ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งมีขนาดไม่น้อยกว่า 500 โวลต์แอมป์ ข้อ7.6.2 ให้ทดสอบกับมอเตอร์และตัวเปลี่ยนอัตราเร็ว (ถ้ามี) ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วในสภาพการทำงานปกติ นอกจากตัวเก็บประจุซึ่งต้องปลดสายออกจากวงจรก่อนทดสอบ ข้อ7.6.3 ป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบตามข้อ 7.6.4 หรือข้อ 7.6.5 ซึ่งมีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ และมีลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ชอยด์ โดยให้เริ่มป้อนแรงดันไม่เกินครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าทดสอบ แล้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าทดสอบ คงค่านี้ไว้เป็นเวลา 1 นาที ข้อ7.6.4 ป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ 1,500 โวลต์ ระหว่างส่วนที่มีไฟฟ้ากับเปลือกนอกที่เป็นโลหะของมอเตอร์ ข้อ7.6.5 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าทดสอบสำหรับตัวเปลี่ยนอัตราเร็วที่แยกต่างหาก ให้ใช้ค่าดังต่อไปนี้ ข้อ7.6.5.1 1,500 โวลต์ ระหว่างขั้วต่อสายกับเปลือกนอกที่เป็นโลหะ ข้อ7.6.5.2 1,500 โวลต์ ระหว่างขั้วต่อสายทั้งสองของตัวเปลี่ยนอัตราเร็ว เมื่อปลดสวิตช์ ข้อ7.6.6 ป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบเป็นเวลา 1 นาทีแล้วให้อาแรงดันไฟฟ้าทดสอบออก

6.3 มาตรฐานการสอบเทียบ (Calibration) หมายถึง วิธีหรือการปฏิบัติตามขั้นตอนที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า เพื่อทำการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องวัดกับเครื่องมือที่อ่านได้ถูกต้องมากกว่า (Accuracy) เมื่อทราบค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดนั้นๆ แล้วจึงทำการปรับเทียบ ให้ได้ค่าที่ถูกต้องตามมาตรฐานจาก

โรงงานผู้ผลิต (Technical Standard) ถ้าไม่สามารถทำการเปรียบเทียบให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด ก็อาจเกิดความบกพร่องจากเครื่องมือวัดนั้นๆ ข้าราชการต้องทำการแก้ไขก่อน เมื่อแก้ไขข้อบกพร่องแล้วจึงนำมาเปรียบเทียบให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน ผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การสอบเทียบตามมาตรฐานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าเพื่อใช้ตรวจสอบพัดลมไฟฟ้าซึ่งมีเกณฑ์ตาม มอก.934-2533

สรุปผู้วิจัยได้ใช้ทฤษฎีดังต่อไปนี้ในการออกแบบสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าตามเกณฑ์การสอบเทียบ

1. ทฤษฎีพื้นฐานแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์ และบทประยุกต์ในการคำนวณหาขนาดของแกนเหล็ก, ขนาดของเส้นลวดทองแดง, จำนวนรอบของขดลวดทองแดงที่นำมาใช้ทำหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง
2. ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ กฎของโอห์ม ,กฎการแบ่งแรงดันและกระแส ของ เคอร์ชอฟฟ์ และวงจรคอมมอนอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์นำมาออกแบบสร้างวงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหลและวงจรเปรียบเทียบแรงดันกำหนดเพื่อส่งสัญญาณไปให้วงจรควบคุมและแสดงผล
3. ในการวิจัยออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้านี้ผู้วิจัยได้ใช้เกณฑ์การสอบเทียบ(Calibration)เป็นเกณฑ์กำหนดการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าเพราะถือว่าเป็นเกณฑ์มาตรฐานเป็นที่ยอมรับของในและต่างประเทศ ในปัจจุบันเราอยู่ในโลกแห่งการค้าเสรี การแข่งขันในตลาดผู้บริโภคสูงมาก การผลิตสินค้าทุกชนิดต้องได้คุณภาพมาตรฐานเท่านั้น ซึ่งการผลิตสินค้าดังกล่าวจะมีคุณภาพได้นั้นจะต้องผ่านการตรวจสอบจากเครื่องตรวจสอบที่แม่นยำเป็นที่เชื่อถือเครื่องวัดเหล่านั้นจึงต้องจึงต้องผ่านการสอบเทียบเพื่อเป็นที่ยืนยันและยอมรับกันเป็นมาตรฐานสากล

7. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมชาย สุขพันธ์ (2531 : 156 – 162) ได้ออกแบบสร้างเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ สามารถวัดกระแสรั่วไหล, อัตราการขยายกระแส, แรงดันเบรคดาวน์ สามารถวัดได้ทั้งทรานซิสเตอร์, เฟต, ไดโอดและเอสซีอาร์

เฉลิมพล ศรีอนันท์ (2531 : 120 – 122) ได้ออกแบบสร้างเครื่องทดสอบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ สามารถตรวจและวัดหาหาทรานซิสเตอร์วัดหาอัตราขยายกระแส ทดสอบไดโอด, แอลอีดีและเอสซีอาร์

ยงยุทธ วิษุธริธานต์ (2541 : 100 – 103) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือวัดทรานซิสเตอร์และทำการเปรียบเทียบผลการวัดได้จากเครื่องมือวัดทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นวัดกระแสคอนเล็กเตอร์จากเครื่องเขียนกราฟลักษณะของสารกึ่งตัวนำโดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BD 139 ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็นโดยจำกัดกระแสเบสเป็น 10 ช่วง

นิยม สังขวิเชียร (2542 : 76 – 77) ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องมัลติเพล็กซ์ในระบบสื่อสารสัญญาณของโทรศัพท์ ขนาด 32 ช่องสัญญาณในซึ่งมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพตามมาตรฐานของระบบสหภาพโทรคมนาคมนานาชาติ(ITU – T) ได้สร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและชุดมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ระบบสื่อสารสัญญาณของโทรศัพท์ขนาด 32 ช่องสัญญาณ โดยได้ศึกษาถึงตัวแปรค่าความผิดพลาดตามคุณสมบัติที่ใช้ในการสื่อสาร ด้านโทรคมนาคม ให้ได้ประสิทธิภาพตามมาตรฐานของระบบสหภาพโทรคมนาคมนานาชาติ(ITU – T)

นานา พวงปทุมานนท์ (2540 : 20-52)ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบรากกำลังสองเฉลี่ยจำนวนจริงในย่านสัญญาณความถี่ต่ำและความถี่สูงได้ทำการศึกษาโดยใช้ตัวคูณสัญญาณ

ภาคแรงดันกับสัญญาณภาคกระแสแบบสวิตช์แล้วจึงแปลงเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สัมพันธ์กับค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณซึ่งสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพทัดเทียมกับเครื่องที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการทดลอง การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยจะดำเนินการวิจัยตามหัวข้อต่อไปนี้

1. เกณฑ์ข้อกำหนดของการออกแบบ และสร้างเครื่องในการวิจัย
2. ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

1. เกณฑ์ข้อกำหนดของการออกแบบ และสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าในการวิจัย

1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

1.1.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 1,500 โวลต์ (Volts. V.) 50 เฮิร์ตซ์ (Hertz. H)
500 วีเอ (VA)

1.1.2 ชุดตรวจสอบกระแสรั่วไหล

1.1.3 ชุดควบคุมการทำงานและแสดงผล

1.2 ตัวแปรที่จะศึกษา เป็นการศึกษาถึงความสามารถตามเกณฑ์การสอบเทียบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

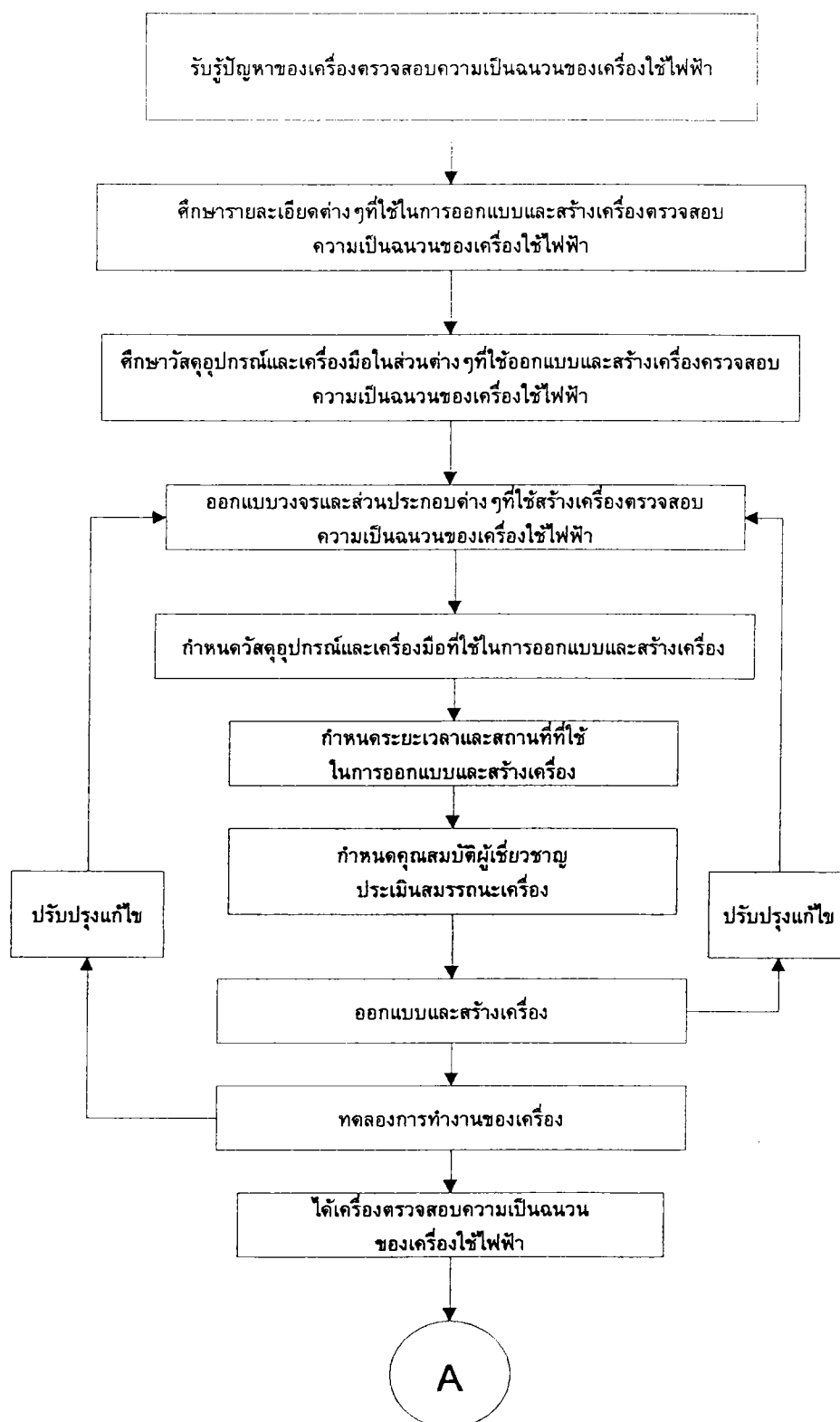
1.2.1 แหล่งจ่ายที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าในการทดสอบ 1,500 โวลต์

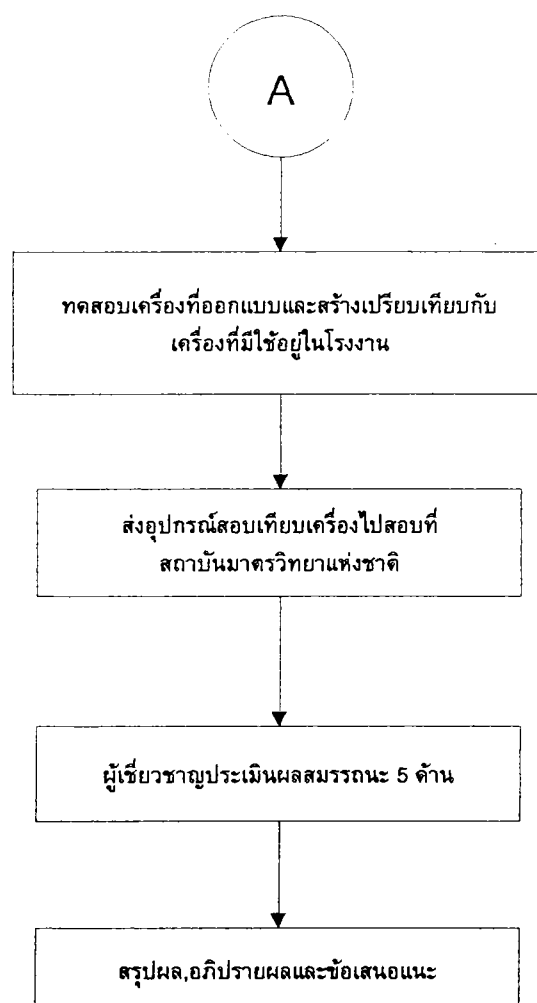
1.2.2 เวลาที่ใช้ทดสอบ สามารถกำหนดได้ดังนี้ 5 ,10 , 30 , 60 , 90 วินาที

1.2.3 กระแสรั่วไหลในขณะทดสอบต้องไม่เกิน 1.0 ,1.5 มิลลิแอมป์

2. ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจะดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้





ภาพประกอบ 30 แสดงขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

2.1 รับรู้ปัญหาของการตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เนื่องจากผู้วิจัยได้มีหน้าที่ควบคุมการทำงานในการประกอบเครื่องใช้ไฟฟ้าโดยเฉพาะพัดลมไฟฟ้า ซึ่งเมื่อประกอบเครื่องใช้ไฟฟ้าเสร็จสมบูรณ์จะต้องตรวจสอบความเป็นฉนวนในด้านการทนแรงดันสูง ตามเกณฑ์การสอบเทียบซึ่งเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ที่ใช้ตรวจสอบมีราคาสูงและต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้ามาทดแทนของที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

2.2 ศึกษารายละเอียดต่างๆที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.2.1 ศึกษาต้นคว้าจากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยเชิงทดลองที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า และงานวิจัยเชิงทดลองทางด้านไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง

2.2.2 ศึกษาถึงอุปกรณ์ที่ใช้สร้างแหล่งจ่ายแรงดันสูง และวงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหลพร้อมแสดงผล

2.3 ศึกษาวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในส่วนต่าง ๆที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.3.1 วัสดุเป็นการศึกษาถึงวัสดุ ที่ใช้ในการสร้างสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.3.1.1 ลวดทองแดงที่ใช้สร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

2.3.1.2 สายเคเบิลทองแดงทนแรงดันสูง 2,000 โวลต์

2.3.1.3 สายไฟฟ้า

2.3.1.4 ปริ้นเอนกประสงค์

2.3.1.5 ตะกั่วบัดกรี

2.3.2 อุปกรณ์ เป็นการศึกษาถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.3.2.1 เป็นการศึกษาอุปกรณ์ หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากแรงดัน 220 โวลต์ เป็นแรงดันสูง 1,500 โวลต์ และมีกำลังไฟฟ้าถึง 500 วัตต์ (VA)

2.3.2.2 เป็นการศึกษาถึงอุปกรณ์ ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ กระแส ซึ่งถ้ามีกระแสรั่วไหลจะส่งสัญญาณไปที่วงจรเปรียบเทียบและส่งสัญญาณไปให้ชุดควบคุมแสดงผล

2.3.2.3 เป็นการศึกษาถึงอุปกรณ์ ออปโตทรานซิสเตอร์ (Isolat) ซึ่งจะแยกแยะระหว่างวงจรที่ทดสอบโดยใช้แรงดันต่ำ จึงทำให้วงจรตรวจสอบมีความเสถียร และแม่นยำ

2.3.2.4 เป็นการศึกษาอุปกรณ์ ออปแอมป์ (Op Amp)ใช้ในการขยายสัญญาณ และเป็นกันชน (Buffer)สำหรับวงจรในภาคต่อไป และใช้เป็นวงจรเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณตรวจสอบกับค่าที่กำหนดไว้

2.3.2.5 เป็นการศึกษาอุปกรณ์ที่เป็น ไอซี (IC) ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผล ในการควบคุมการทำงานของวงจรตรวจสอบ และวงจรแสดงผล

2.3.2.6 เป็นการศึกษาอุปกรณ์ ที่เป็นตัวต้านทาน (Resistor) ตัวต้านทาน ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้มากที่สุดในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การใช้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ และการสร้าง

2.3.2.7 เป็นการศึกษาอุปกรณ์ที่เป็นไดโอด (Diode) ไดโอดเป็นตัวจัดการไหลของกระแสในทิศทางที่กำหนด(Rectifier) เราใช้ในการเรียงกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง

2.3.3 เครื่องมือเป็นการศึกษาถึงเครื่องมือที่ใช้ ในการออกแบบสร้างในส่วนของการใช้และทำการตรวจสอบคุณสมบัติของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตามเกณฑ์การสอบเทียบ

2.3.3.1 มัลติมิเตอร์ใช้ทำการวัดและตรวจสอบวงจรที่ได้ออกแบบไว้

2.3.3.2 ไขควง ใช้ทำการขันเข้าและออก ในการประกอบ

2.3.3.3 หัวแรงไฟฟ้า ใช้ในการบัดกรี

2.3.3.4 คีม ใช้จับและตัดอุปกรณ์

2.3.3.5 ประแจ ใช้ทำการขันเข้าและออก ในการประกอบ

2.3.3.6 สว่านไฟฟ้า ใช้ในการเจาะ

2.3.3.7 ตะไบโลหะใช้ในการตกแต่งหลังจากการเจาะ

2.3.3.8 เพาเวอร์ซัพพลาย ใช้ในการป้องกันแรงดันทดสอบและเป็นแหล่งจ่ายให้กับ

วงจรต่างๆที่เกี่ยวข้อง

2.4 การออกแบบวงจรในส่วนต่างๆที่ใช้สร้าง เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.4.1 ออกแบบวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

จากสูตร

กำลังของหม้อแปลง = แรงดัน x กระแส

VA

พื้นที่หน้าตัด = $\sqrt{\text{กำลังหม้อแปลง} / 5.58}$

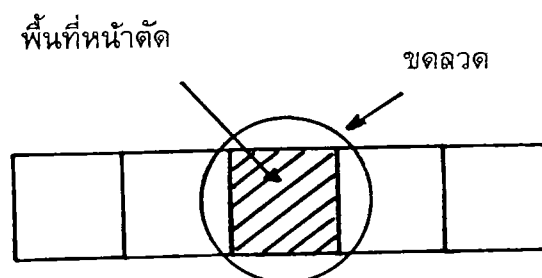
ตารางนี้

∴ เราต้องการกำลังของหม้อแปลง 500 VA

∴ พื้นที่หน้าตัด = $\sqrt{500 / 5.58}$
= 9.46

ตารางนี้

ตารางนี้



ภาพประกอบ 13 พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

2.4.2 หาจำนวนรอบของขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ

จากสูตร

$$N1 = E1 \times 10^8 / (4.44 \times F \times Bm \times A) \quad \text{รอบ}$$

$N1$ = จำนวนรอบของขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ (รอบ)

$E1$ = แรงดันทางด้านปฐมภูมิ (โวลต์)

F = ความถี่ (เฮิร์ต)

Bm = ความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ผ่านแกนเหล็กยังไม่อิ่มตัว
(ใช้ 64,500 เส้น / ตารางนิ้ว)

A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (ตารางนิ้ว)

แรงดันทางด้านปฐมภูมิที่ต้องการ เท่ากับ 220 โวลต์ เราสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} N1 &= 220 \times 10^8 / (4.44 \times 50 \times 64,500 \times 9.46) \quad \text{รอบ} \\ &= 162.4 \quad \text{รอบ} \end{aligned}$$

2.4.3 หาจำนวนรอบของขดลวดทองแดงทางด้านทุติยภูมิ

$$E1 / E2 = N1 / N2$$

โดย

$E1$ = แรงดันทางด้านปฐมภูมิ (โวลต์)

$E2$ = แรงดันทางด้านทุติยภูมิ (โวลต์)

$N1$ = จำนวนรอบทางด้านปฐมภูมิ (รอบ)

$N2$ = จำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิ (รอบ)

ฉะนั้น ถ้า

$$E1 = 220 \text{ V}$$

$$E2 = 1,500 \text{ V}$$

$$N1 = 162.4 \text{ รอบ}$$

ฉะนั้น

$$N2 = (N1 \times E2) / E1$$

$$= (162.4 \times 1,500) / 220$$

$$= 1,107 \quad \text{รอบ}$$

2.4.4 คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ดังนี้

หาค่ากระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ

$$P = V1 \times I1$$

$$I1 = P / V1 \quad (\text{Amp})$$

แทนค่าได้ดังนี้

$$I1 = 500 / 220$$

$$= 2.2 \text{ Amp.}$$

∴ หาขนาดของลวดทองแดงทางด้านปฐมภูมิ (ใช้ค่า 450 เซอร์คิวลามีล / แอมแปร์)

$$\begin{aligned}\therefore \text{หาขนาดของลวดทองแดงทางด้านปฐมภูมิ} &= 450 \times 2.2 \\ &= 990 \text{ เซอร์คิวลามีล}\end{aligned}$$

(เปิดตารางเบอร์ลวดจะได้ เบอร์ 21 เอสดับบีวีจี (S.W.G.))

หากระแสทางด้านทุติยภูมิ

$$P = V_2 \times I_2$$

$$I_2 = P / V_2 \quad (\text{Amp})$$

$$I_2 = P / V_2 \quad (\text{Amp})$$

แทนค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned}I_2 &= 500 / 1,500 \\ &= 0.33 \text{ Amp.}\end{aligned}$$

∴ หาขนาดของลวดทองแดงทางด้านทุติยภูมิ (ใช้ค่า 450 เซอร์คิวลามีล / แอมแปร์)

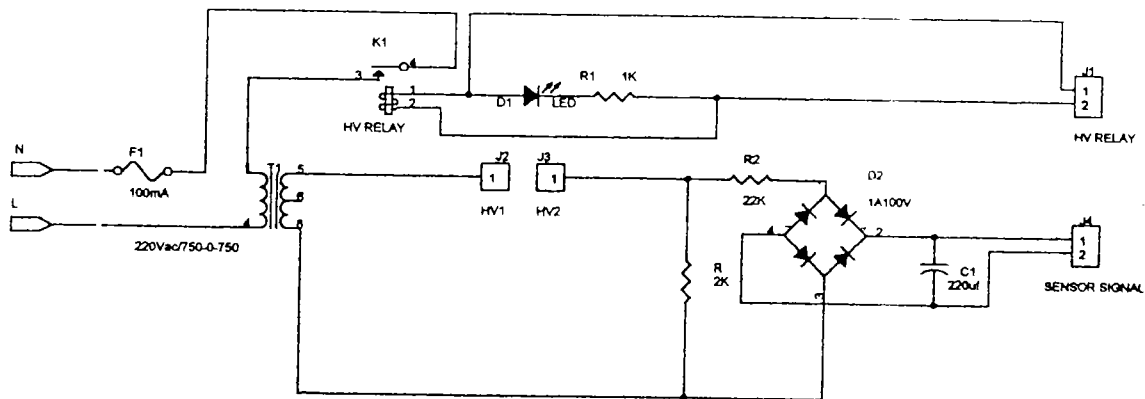
$$\begin{aligned}\therefore \text{หาขนาดของลวดทองแดงทางด้านทุติยภูมิ} &= 450 \times 0.33 \\ &= 148.5 \text{ เซอร์คิวลามีล}\end{aligned}$$

(เปิดตารางเบอร์ลวดจะได้ เบอร์ 30 เอสดับบีวีจี (S.W.G.))

สรุป จากการออกแบบ จะได้หม้อแปลงดังนี้

- | | | |
|---|-------|-------|
| ● กำลัง | 500 | VA |
| ● แรงดันทางด้านปฐมภูมิ | 200 | Volt. |
| ● แรงดันทางด้านทุติยภูมิ | 1,500 | Volt. |
| ● ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ เบอร์ 21 S.W.G. | 162.4 | รอบ |
| ● ขดลวดทางด้านทุติยภูมิ เบอร์ 30 S.W.G. | 1,107 | รอบ |

2.4.5 วงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล เมื่อมีกระแสรั่วไหลก็จะมีกระแสไหลผ่านมาทาง อา 2 (R2) 22 กิโลโอห์ม และจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมาที่ไดโอด ที่ทำหน้าที่แปลงแสงเพื่อส่งสัญญาณมาให้คาร์ดินทรานซิสเตอร์จะขยายสัญญาณและส่งสัญญาณต่อไปยังวงจรเปรียบเทียบเพื่อเปรียบเทียบสัญญาณว่ามีกระแสรั่วไหลเกินค่าที่กำหนดหรือไม่



ภาพประกอบ 28 วงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล

2.4.5.1 ออกแบบวงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล เนื่องจากต้องการตรวจสอบกระแสรั่วไหลตามข้อกำหนด ดังนี้

กระแสรั่วไหล 1.0 , 1.5 มิลลิแอมป์ จากวงจรภาพประกอบ 53 จะคำนวณอุปกรณ์ต่างๆได้ดังนี้ จากกฎของโอห์ม

$$E = IR$$

จากวงจรภาพประกอบ 57 $R1 = 2 \text{ K} ; R2 = 22 \text{ K}$

กำหนดให้

$$RT = R1 // R2$$

$$RT = R1 \times R2 / (R1 + R2)$$

$$= 2 \times 22 / (2 + 22)$$

$$= 1.83 \text{ K}\Omega$$

กำหนดให้

$$I_T = 1.0 \text{ mA}$$

เพราะฉะนั้น

$$I_{R1} = (R2 / (R1 + R2)) \times I_T$$

$$I_{R1} = (2 / (2 + 22)) \times 1.0$$

$$= 0.083 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{กำหนดให้} & I_T &= 1.5 \text{ mA} \\
 &\text{เพราะฉะนั้น} & I_{R1} &= (R2 / (R1 + R2)) \times I_T \\
 & & I_{R1} &= (2 / (2 + 22)) \times 1.5 \\
 & & &= 0.125 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

อัตราขยายของออปโตทรานซิสเตอร์ กำหนดให้เท่ากับ (a) = 10 เท่าและคำนวณได้ดังนี้

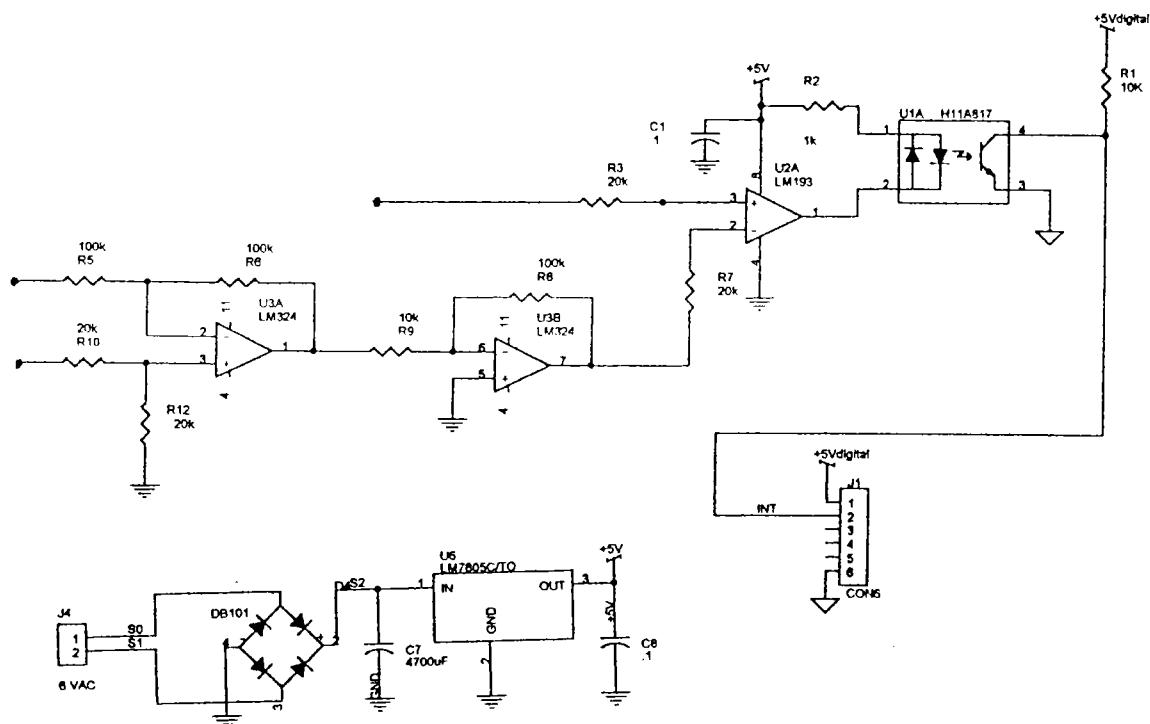
$$\begin{aligned}
 \text{ที่ } I_1 = 0.083 \text{ mA} \text{ จะได้} & & I_C &= a \times I_{R1} \\
 & & &= 10 \times 0.083 \\
 & & &= 0.83 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ที่ } I_1 = 0.125 \text{ mA} \text{ จะได้} & & I_C &= a \times I_{R1} \\
 & & &= 10 \times 0.125 \\
 & & &= 1.25 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ฉะนั้น} \quad \text{ที่ } I_C = I_1 = 0.83 \text{ mA} & & V_{O1} &= I_C R_C \\
 & & R_C &= 2.2 \text{ K}\Omega \\
 & & V_{O1} &= 0.83 \times 2.2 \\
 & & &= 1.82 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ฉะนั้น} \quad \text{ที่ } I_C = I_1 = 1.25 \text{ mA} & & V_{O1} &= -I_C R_C \\
 & & R_C &= 2.2 \text{ K}\Omega \\
 & & V_{O1} &= 1.25 \times 2.2 \\
 & & &= 2.75 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

2.4.6 วงจรเปรียบเทียบกระแสไหล โดยใช้ออปแอมป์ในการทำหน้าที่เปรียบเทียบและ
เป็นกันชน ทำให้เราสามารถนำสัญญาณจากวงจรตรวจสอบกระแสไหลมาทำการเปรียบเทียบ และขยาย
สัญญาณและส่งสัญญาณต่อไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานส่งสัญญาณต่อไปที่ชุดแสดงผลและควบคุมการ
ทำงาน



ภาพประกอบ 29 เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

จากวงจรภาพประกอบ 29 จะได้

$$\text{ให้ } R_F = R_1$$

$$\text{ให้ } V_{O1} = 1.82 \text{ Volt.}$$

$$V_O = (1 + (R_F / R_1)) V_{CE}$$

$$V_O = 2 V_{O1}$$

$$V_O = 2 \times 1.82 \\ = 3.64 \text{ Volt.}$$

$$\text{ให้ } R_F = R_1$$

$$\text{ให้ } V_{O1} = 2.75 \text{ Volt.}$$

$$V_O = 2 V_{O1}$$

$$V_O = 2 \times 2.75 \\ = 5.50 \text{ Volt.}$$

2.5 กำหนดวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในส่วนต่างๆ ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตามเกณฑ์การสอบเทียบ

2.5.1 วัสดุ

2.5.1.1 ลวดทองแดงเบอร์ 21 เอสดับบีวีจี (SWG) 1 ม้วน 2 กิโลกรัม

2.5.1.2 ลวดทองแดงเบอร์ 30 เอสดับบีวีจี (SWG) 1 ม้วน 0.5 กิโลกรัม

2.5.1.3 สายเคเบิลทนแรงดันสูง 2,000 โวลต์ 10 เมตร

2.5.1.4 สายไฟฟ้า ขนาด 0.1 , 0.3 , 0.5 , 0.8 และ 1 สแควร์ มิลลิเมตร ยาว 10

เมตร

2.5.1.5 ปรีนเอนกประสงค์ กว้าง 0.1 เมตร ยาว 0.1 เมตร จำนวน 1 ชิ้น

2.5.1.6 ตะกั่วบัดกรี 1 ม้วน

2.5.2 อุปกรณ์

2.5.2.1 แหล่งจ่ายแรงดันสูง เป็นแหล่งจ่ายกระแสสลับ ที่เปลี่ยนจากแรงดัน 220 โวลต์ เป็น 1,500 โวลต์ มีรายการดังนี้

- 1 ลวดทองแดง
- 2 แกนเหล็ก ตัวอี และตัวไอ
- 3 น้ำยาวานิช ทำหน้าที่เป็นฉนวน
- 4 สายไฟฟ้า

2.5.2.2 วงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหลทำหน้าที่ตรวจสอบกระแสรั่วไหล ในขณะที่จ่ายแรงดันสูงในการทดสอบ

- 1 ตัวต้านทาน
- 2 ไดโอด
- 3 รีเลย์
- 4 ออปโตทรานซิสเตอร์

2.5.2.3 วงจรควบคุมการทำงาน ถ้ามีสัญญาณจากวงจรตรวจสอบ ไมโครคอนโทรเลอร์จะส่งสัญญาณไปแสดงผล

- | | |
|---|-------------|
| 1 | IC CPU 8031 |
| 2 | RAM |
| 3 | ROM |
| 4 | I / O PORT |
| 5 | EPROM |
| 6 | ตัวต้านทาน |
| 7 | คาปาซิเตอร์ |

2.5.3 เครื่องมือ

2.5.3.1 มัลติมิเตอร์ ดิจิตอลและอนาล็อกอย่างละ 1 ตัว

2.5.3.2 ไขควง 1 ชุด

2.5.3.3 หัวแรงไฟฟ้า ชนิดแช่ 30 วัตต์ 1 ตัว

2.5.3.4 คีม 1 ชุด

2.5.3.5 ประแจ 1 ชุด

2.5.3.6 สว่านไฟฟ้าชนิดมือถือพร้อมดอกสว่าน 1 ชุด

2.5.3.7 ตะไบโลหะ 1 ชุด

2.5.3.8 เพาเวอร์ซัพพาย 1 ตัว

2.6 กำหนดระยะเวลาสถานที่ ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.6.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เริ่ม ตั้งแต่ วันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ 2544 ถึง วันที่ 11 มีนาคม พ.ศ. 2545

2.6.2 สถานที่ที่ใช้ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า บริษัท วณวิทย์ แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด แผนกประกอบสินค้าสำเร็จรูป ฝ่ายโรงงาน พระราม 2 บางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร

2.7 กำหนดคุณสมบัติกรรมการตรวจสอบรูปแบบและการใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าจำนวน 3 ท่าน

2.7.1 จบการศึกษาไม่ต่ำกว่าปริญญาตรี ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ , สาขาไฟฟ้าสื่อสาร , สาขาโทรคมนาคมหรือสาขาที่เกี่ยวข้องสาขาใดสาขาหนึ่ง

2.7.3 มีประสบการณ์ปฏิบัติงานทางด้านไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ไม่ต่ำกว่า 5 ปี

2.7.4 ใช้ผู้เชี่ยวชาญในการประเมิน 3 ท่าน

2.8 ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เพื่อการวิจัยครั้งนี้ ได้ดำเนินการสร้างส่วนประกอบต่างๆ โดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.8.1 สร้างแหล่งจ่ายแรงดันสูง

2.7.1.1 สร้างแหล่งจ่ายแรงดันสูง จากแหล่งจ่าย 220 โวลต์ เปลี่ยนเป็นแรงดันสูง 1,500 โวลต์ โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า ตามการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า โดยสั่งทำจาก ห้างหุ้นส่วนจำกัด แสงทองวิทย์ 82/108-110 ถนนพัฒนาการ เขตประเวศ กรุงเทพมหานคร

2.8.2 สร้างชุดตรวจสอบกระแสรั่วไหลตามข้อกำหนด 1.0, 1.5 มิลลิแอมป์(mA) โดยดูจากภาพประกอบ 27 โดยใช้ออปโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวส่งสัญญาณให้ออปแอมป์ เปรียบเทียบกับค่าแรงดันที่กำหนดไว้ เพื่อกำหนดให้ออปแอมป์ ส่งสัญญาณให้ทรานซิสเตอร์ทำงานและส่งสัญญาณต่อไปที่ชุดควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรเลอร์ เอ็มซีเอส 51 ส่งสัญญาณไปแสดงผลที่จอแอลซีดี

2.8.2.1 สั่งซื้ออุปกรณ์ตามรายละเอียด ของวงจรที่ได้กำหนดและออกแบบไว้ จากบริษัท อิเล็กทรอนิกส์ ซอร์ซ จำกัด ถนนบ้านหม้อ วังบูรพาภิรมย์พระนคร กรุงเทพมหานคร และบริษัท นัฐพงษ์ เซลล์แอนด์เซอร์วิส จำกัด 119 เจริญพานมอญ ถนน อัมรินทร์ กรุงเทพมหานคร

2.8.2.2 ประกอบอุปกรณ์ลงแผ่นวงจรพิมพ์ตามภาพประกอบ

2.8.3 สร้างชุดควบคุมการทำงานและแสดงผล ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยใช้ไมโครคอนโทรเลอร์ เอ็มซีเอส 51 ในการควบคุมการทำงานและใช้จอแอลซีดีในการแสดงผล

2.8.3.1 สั่งซื้ออุปกรณ์ควบคุม ชุดคำสั่งและชุดแสดงผลโดยใช้ ซิงเกิลบอร์ด ซีพีเอสบี 31 (Single Board , CP – SB 31)เป็นตัวควบคุมและแสดงผลจากบริษัท อีทีที จำกัด 1108/32 ศูนย์การค้าพระโขนง สุขุมวิท กรุงเทพมหานคร

2.8.4 เตรียมกล่องสำหรับบรรจุ โดยใช้กล่องเอนกประสงค์ขนาด กว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร มาทำการเจาะตามต้องการ จากบริษัท นัฐพงษ์ เซลล์แอนด์เซอร์วิส จำกัด 119 เจริญพานมอญ ถนน อัมรินทร์ กรุงเทพมหานคร

2.8.5 ทำการประกอบและเชื่อมต่อสายระหว่างชุดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ออกแบบไว้ กับวงจรชุดตรวจสอบกระแสรั่วไหล ชุดควบคุมการทำงานและแสดงผล และทดลองการทำงานของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.9 ทดลองการทำงานของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เปรียบเทียบกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าทดสอบกับพัลล์ที่ผลิตในโรงงานโดยให้ตัวพัลล์ที่ตรวจสอบกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน ตรวจสอบผ่าน 10 ตัว และตรวจสอบไม่ผ่านจำนวน 10 ตัว แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

2.9.1 ทำการทดลองวัดโดยกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาที่ใช้ทดสอบ 5 , 10 , 30 , 60 , 90 วินาที
3. กระแสรั่วไหล 1.0 , 1.5 มิลลิแอมป์

ตาราง 1 แสดงผลการทดสอบพัลล์

พัลล์	แรงดันทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแสรั่วไหล (มิลลิแอมป์)	ผลการทดลอง	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

2.10 สร้างอุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐานของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าและนำไปสอบเทียบที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

2.10.1 กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.0 มิลลิแอมป์ ค่าผิดพลาดไม่เกิน 0.1 %

2.10.2 กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.5 มิลลิแอมป์ ค่าผิดพลาดไม่เกิน 0.1 %

2.11 ให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินผล ทางด้านสมรรถนะของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า 5 ด้าน ดังนี้

2.11.1 สมรรถนะด้านวิศวกรรม

2.11.2 สมรรถนะด้านความปลอดภัย

2.11.3 สมรรถนะด้านกายภาพ

2.11.4 สมรรถนะด้านการใช้งาน

2.11.5 สมรรถนะด้านการบำรุงรักษา

สร้างแบบประเมินเพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินดังนี้

แบบประเมินเรื่องออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

แบบประเมินชุดนี้ เป็นแบบสอบถามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ เกี่ยวกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมา เรื่องความเหมาะสมด้านการใช้งาน

คำชี้แจง แบบประเมินชุดนี้แบ่งออกเป็น 4 ตอนคือ

ตอนที่ 1 วัตถุประสงค์ของแบบประเมิน

ตอนที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับสถานะภาพของผู้เชี่ยวชาญ

ตอนที่ 3 ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับ สมรรถนะเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า 5 ด้านดังนี้

1 สมรรถนะทางด้านวิศวกรรม

2 สมรรถนะด้านความปลอดภัย

3 สมรรถนะทางกายภาพ

4 สมรรถนะการใช้งาน

5 สมรรถนะการบำรุงรักษา

ตอนที่ 4 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ

1. วัตถุประสงค์ของแบบประเมิน

แบบประเมินชุดนี้สร้างขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือประกอบในการวิจัย มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ เกี่ยวกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า มีความเหมาะสมในด้านต่างๆเพียงใด

2. ข้อมูลเกี่ยวกับสถานะภาพผู้เชี่ยวชาญ

กรุณาเขียนเครื่องหมาย / ลงในกรอบ () หน้าข้อความที่ตรงกับความจริง และ / หรือเติมคำหรือข้อความลงในช่องว่าง

1. เพศ

() ชาย

() หญิง

2. อายุ

() 25 – 30

() 31 – 35

() 36 – 40

() 41 ขึ้นไป

3. ระดับการศึกษา

() ปริญญาตรี

() ปริญญาโท

() ปริญญาเอก

4. ประสบการณ์ในการทำงาน

() 5 – 10 ปี

() 11 - 15ปี

() 16 – 20 ปี

() 21ปีขึ้นไป

5. สาขาที่ปฏิบัติงานอยู่ในปัจจุบัน

() เครื่องกล

() ไฟฟ้ากำลัง

() อิเล็กทรอนิกส์

() อื่นๆ

3. ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า 5 ด้าน กรุณาเขียนเครื่องหมาย / ลงในช่องมาตราส่วนประเมินค่า 5 ระดับ ตามความคิดเห็นของท่าน หลังจากทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าและมีคะแนนกำหนดไว้ดังนี้

1. ระดับ 5 หมายถึง ผลประเมินระดับดีมาก
2. ระดับ 4 หมายถึง ผลประเมินระดับดี
3. ระดับ 3 หมายถึง ผลประเมินระดับปานกลาง
4. ระดับ 2 หมายถึง ผลประเมินระดับน้อย
5. ระดับ 1 หมายถึง ผลประเมินระดับน้อยมาก

ตาราง 2 แบบตรวจประเมินตามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

ข้อที่	รายละเอียดการประเมิน	น้อย มาก	น้อย	ปาน กลาง	ดี	ดี มาก
	สมรรถนะทางด้านวิศวกรรม					
1	มีคุณค่าทางวิศวกรรมและเป็นนวัตกรรมใหม่					
2	ใช้หลักวิศวกรรมในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้เหมาะสม					
3	ใช้หลักการและทฤษฎีในการสร้างเครื่องอย่างถูกต้อง					
4	ใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ในการสร้างเครื่องอย่างเหมาะสม					
5	ใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเหมาะสม					
	สมรรถนะด้านความปลอดภัย					
6	ระบบป้องกันถ้าเกินระบบไฟฟ้าผิดปกติ					
7	มีระบบป้องกันอันตรายจากการใช้งาน					
8	การป้องกันอันตรายจากการสัมผัสกับไฟฟ้าแรงดันสูง					
	สมรรถนะทางกายภาพ					
9	สามารถถอดและแยกอุปกรณ์ของเครื่องได้					
10	ความแข็งแรงของโครงสร้าง					
11	การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆได้อย่างเหมาะสม					
12	เครื่องมีขนาดกระทัดรัดเหมาะสมเมื่อเทียบกับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจสอบ					
13	เครื่องมีรูปทรงสวยงามใช้โทนสีเหมาะสม					

ข้อที่	รายละเอียดการประเมิน	น้อย มาก	น้อย	ปาน กลาง	ดี	ดีมาก
	สมรรถนะการใช้งาน					
14	ขั้นตอนการใช้งานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าเหมาะสม					
15	ใช้เวลาในการตรวจสอบเหมาะสม					
16	ความสะดวกในการใช้งานของเครื่อง					
17	ความสะดวกในการเคลื่อนย้ายเครื่อง					
18	สามารถนำไปใช้และพัฒนาในโรงงานอุตสาหกรรมได้					
	สมรรถนะการบำรุงรักษา					
19	อุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษาหาซื้อได้ง่ายราคาถูก					
20	การตรวจสอบและบำรุงรักษาเครื่องทำได้ง่าย					
21	ความสะดวกในการถอด / แยก ชิ้นส่วนอุปกรณ์					
22	มีจุดตรวจและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ต่างๆน้อย					

4. ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ

.....

.....

.....

เกณฑ์การแปลผล

ใช้ค่ามัธยฐานเลขคณิต หรือค่าเฉลี่ยของคะแนนที่เกิดจากการรวมคะแนนของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ท่าน แล้วหารด้วย 3 ดังสูตรการหาค่าเฉลี่ยดังนี้

$$\bar{X} = \sum x_i$$

แล้วทำการประเมินผลจากคะแนนเฉลี่ยดังนี้

- | | |
|------------------|--------------------------------|
| 1. ระดับ ดีมาก | คะแนนเฉลี่ย 4.50 – 5.00 คะแนน |
| 2. ระดับ ดี | คะแนนเฉลี่ย 3.50 – 4.49 คะแนน |
| 3. ระดับ ปานกลาง | คะแนนเฉลี่ย 2.50 – 3.49 คะแนน |
| 4. ระดับ น้อย | คะแนนเฉลี่ย 1.50 – 2.49 คะแนน |
| 5. ระดับ น้อยมาก | คะแนนเฉลี่ย ต่ำกว่า 1.49 คะแนน |

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาค้นคว้าตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยออกแบบวงจรและกำหนดวัสดุเครื่องมือ ที่ใช้ในการสร้างตามรายละเอียดที่ได้ศึกษาค้นคว้าไว้ และกำหนดระยะเวลาในการสร้าง ทดลองปรับปรุงและแก้ไขการทำงานของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งผลการสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า มีดังนี้

1. ออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายแรงดันสูง 1,500 โวลต์ (Volts. V.) 50 เฮิร์ตซ์ (Hertz. H.) 500 วีเอ (VA) จากการทดสอบโดยที่ป้อนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ให้กับหม้อแปลง ที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำให้เป็นแรงดันสูง จากการคำนวณขดลวดทางด้านเข้า (in put) ด้วยแรงดันปกติที่ใช้ในหน่วยงานทั่วไป 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ และแรงดันออก (out put) จากการวัดได้ค่าประมาณ 1,500 โวลต์ ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

2. ออกแบบและสร้างชุดตรวจสอบกระแสรั่วไหล โดยใช้ตัวต้านทานเป็นตัวแบ่งแรงดัน (Resistor R1 ; 2 K Ω , R2 ; 22 K Ω) จากนั้นจะผ่านวงจรเรกติไฟร์ (Rectifier) ทำหน้าที่เรียงกระแสเพื่อขับ แอล อี ดี (LED.) และส่งสัญญาณต่อให้ ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ทำงาน โดยวงจรตรวจสอบนี้จะทำงานก็ต่อเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตั้งแต่ 1.0 , 1.5 มิลลิแอมป์ตามที่กำหนด และถ้าไม่มีกระแสไหลผ่านหรือไหลผ่านน้อยกว่าวงจรนี้ก็ไม่ทำงาน จากการทดสอบเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

3. ออกแบบและสร้างชุดควบคุมการทำงานและแสดงผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เอ็มซีเอส 51 ในการควบคุมการทำงานของวงจร ซึ่งการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะควบคุมการทำงานได้แม่นยำและเที่ยงตรงและ จะส่งผลการตรวจสอบที่ชุดแสดงผล แอลซีดี ซึ่งจะแสดงผลเป็นตัวอักษรง่ายต่อการทำความเข้าใจในการใช้งานและ การแปลค่าจากผลการตรวจสอบ จากการทดสอบตามรายละเอียดที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

ผลการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

การทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล การใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ผู้วิจัยได้ทำหนังสือจากบัณฑิตวิทยาลัยไปยัง บริษัท วนวิทย์ แมนูแฟคเจอร์ จำกัด 66/13 ถนน พระราม 2 ซอย 94 แขวง สมคำ เขต บางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร เพื่อขอทำการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล โดยการทดสอบเทียบกับเครื่องที่มีอยู่ในโรงงาน โดยใช้ผลิตภัณฑ์ผลิตในโรงงานแล้ววัดเปรียบเทียบ แล้วนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลและนำเสนอ ดังนี้

การทดลองครั้งที่ 1 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัลลัมที่ปกติกับพัลลัมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 5 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.0 มิลลิแอมป์

ตาราง 3 แสดงผลการทดลองพัลลัม

ลำดับ (พัลลัม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	5	1.0	✓	—
2	1,500	5	1.0	✓	—
3	1,500	5	1.0	✓	—
4	1,500	5	1.0	✓	—
5	1,500	5	1.0	✓	—
6	1,500	5	1.0	✓	—
7	1,500	5	1.0	✓	—
8	1,500	5	1.0	✓	—
9	1,500	5	1.0	✓	—
10	1,500	5	1.0	✓	—

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีอยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 2 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัลลภที่ปกติกับพัลลภจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 10 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.0 มิลลิแอมป์

ตาราง 4 การทดสอบพัลลภ

ลำดับ (พัลลภ)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	10	1.0	✓	--
2	1,500	10	1.0	✓	--
3	1,500	10	1.0	✓	--
4	1,500	10	1.0	✓	--
5	1,500	10	1.0	✓	--
6	1,500	10	1.0	✓	--
7	1,500	10	1.0	✓	--
8	1,500	10	1.0	✓	--
9	1,500	10	1.0	✓	--
10	1,500	10	1.0	✓	--

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 3 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัลลัมที่ปกติกับพัลลัมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 60 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.0 มิลลิแอมป์

ตาราง 5 การทดสอบพัลลัม

ลำดับ (พัลลัม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	60	1.0	✓	--
2	1,500	60	1.0	✓	--
3	1,500	60	1.0	✓	--
4	1,500	60	1.0	✓	--
5	1,500	60	1.0	✓	--
6	1,500	60	1.0	✓	--
7	1,500	60	1.0	✓	--
8	1,500	60	1.0	✓	--
9	1,500	60	1.0	✓	--
10	1,500	60	1.0	✓	--

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 4 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัดลมที่ปกติกับพัดลมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 90 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.0 มิลลิแอมป์

ตาราง 6 การทดสอบพัดลม

ลำดับ (พัดลม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	90	1.0	√	--
2	1,500	90	1.0	√	--
3	1,500	90	1.0	√	--
4	1,500	90	1.0	√	--
5	1,500	90	1.0	√	--
6	1,500	90	1.0	√	--
7	1,500	90	1.0	√	--
8	1,500	90	1.0	√	--
9	1,500	90	1.0	√	--
10	1,500	90	1.0	√	--

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีอยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 5 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัดลมที่ปกติกับพัดลมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 5 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.5 มิลลิแอมป์

ตาราง 7 การทดสอบพัดลม

ลำดับ (พัดลม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	5	1.5	✓	--
2	1,500	5	1.5	✓	--
3	1,500	5	1.5	✓	--
4	1,500	5	1.5	✓	--
5	1,500	5	1.5	✓	--
6	1,500	5	1.5	✓	--
7	1,500	5	1.5	✓	--
8	1,500	5	1.5	✓	--
9	1,500	5	1.5	✓	--
10	1,500	5	1.5	✓	--

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 6 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัลลภที่ปกติกับพัลลภจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 10 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.5 มิลลิแอมป์

ตาราง 8 การทดสอบพัลลภ

ลำดับ (พัลลภ)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	10	1.5	✓	—
2	1,500	10	1.5	✓	—
3	1,500	10	1.5	✓	—
4	1,500	10	1.5	✓	—
5	1,500	10	1.5	✓	—
6	1,500	10	1.5	✓	—
7	1,500	10	1.5	✓	—
8	1,500	10	1.5	✓	—
9	1,500	10	1.5	✓	—
10	1,500	10	1.5	✓	—

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 7 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัดลมที่ปกติกับพัดลมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 60 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.5 มิลลิแอมป์

ตาราง 9 การทดสอบพัดลม

ลำดับ (พัดลม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	60	1.5	✓	--
2	1,500	60	1.5	✓	--
3	1,500	60	1.5	✓	--
4	1,500	60	1.5	✓	--
5	1,500	60	1.5	✓	--
6	1,500	60	1.5	✓	--
7	1,500	60	1.5	✓	--
8	1,500	60	1.5	✓	--
9	1,500	60	1.5	✓	--
10	1,500	60	1.5	✓	--

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 8 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัดลมที่ปกติกับพัดลมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 90 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.5 มิลลิแอมป์

ตาราง 10 การทดสอบพัดลม

ลำดับ (พัดลม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	90	1.5	✓	--
2	1,500	90	1.5	✓	--
3	1,500	90	1.5	✓	--
4	1,500	90	1.5	✓	--
5	1,500	90	1.5	✓	--
6	1,500	90	1.5	✓	--
7	1,500	90	1.5	✓	--
8	1,500	90	1.5	✓	--
9	1,500	90	1.5	✓	--
10	1,500	90	1.5	✓	--

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 9 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัลลภที่ผิดปกติกับพัลลภจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 5 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.0 มิลลิแอมป์

ตาราง 11 การทดสอบพัลลภ

ลำดับ (พัลลภ)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	5	1.0	--	✓
2	1,500	5	1.0	--	✓
3	1,500	5	1.0	--	✓
4	1,500	5	1.0	--	✓
5	1,500	5	1.0	--	✓
6	1,500	5	1.0	--	✓
7	1,500	5	1.0	--	✓
8	1,500	5	1.0	--	✓
9	1,500	5	1.0	--	✓
10	1,500	5	1.0	--	✓

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 10 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัดลมที่ผิดปกติกับพัดลมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 10 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.0 มิลลิแอมป์

ตาราง 12 การทดสอบพัดลม

ลำดับ (พัดลม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	10	1.0	--	✓
2	1,500	10	1.0	--	✓
3	1,500	10	1.0	--	✓
4	1,500	10	1.0	--	✓
5	1,500	10	1.0	--	✓
6	1,500	10	1.0	--	✓
7	1,500	10	1.0	--	✓
8	1,500	10	1.0	--	✓
9	1,500	10	1.0	--	✓
10	1,500	10	1.0	--	✓

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 10 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัดลมที่ผิดปกติกับพัดลมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

- สอ
1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
 2. เวลาทดสอบ 10 วินาที
 3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.0 มิลลิแอมป์

ตาราง 12 การทดสอบพัดลม

ดา	ลำดับ (พัดลม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
					ผ่าน	ไม่ผ่าน
—	1	1,500	10	1.0	--	✓
	2	1,500	10	1.0	--	✓
	3	1,500	10	1.0	--	✓
	4	1,500	10	1.0	--	✓
	5	1,500	10	1.0	--	✓
	6	1,500	10	1.0	--	✓
	7	1,500	10	1.0	--	✓
	8	1,500	10	1.0	--	✓
	9	1,500	10	1.0	--	✓
	10	1,500	10	1.0	--	✓

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

มีไ
จน

การทดลองครั้งที่ 12 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัลลภที่ผิดปกติกับพัลลภจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 90 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.0 มิลลิแอมป์

ตาราง 14 การทดสอบพัลลภ

ลำดับ (พัลลภ)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	90	1.0	--	✓
2	1,500	90	1.0	--	✓
3	1,500	90	1.0	--	✓
4	1,500	90	1.0	--	✓
5	1,500	90	1.0	--	✓
6	1,500	90	1.0	--	✓
7	1,500	90	1.0	--	✓
8	1,500	90	1.0	--	✓
9	1,500	90	1.0	--	✓
10	1,500	90	1.0	--	✓

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 13 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัลลัมที่ผิดปกติกับพัลลัมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 5 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.5 มิลลิแอมป์

ตาราง 15 การทดสอบพัลลัม

ลำดับ (พัลลัม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	5	1.5	--	✓
2	1,500	5	1.5	--	✓
3	1,500	5	1.5	--	✓
4	1,500	5	1.5	--	✓
5	1,500	5	1.5	--	✓
6	1,500	5	1.5	--	✓
7	1,500	5	1.5	--	✓
8	1,500	5	1.5	--	✓
9	1,500	5	1.5	--	✓
10	1,500	5	1.5	--	✓

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีอยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 14 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัลลัมที่ผิดปกติกับพัลลัมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 10 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.5 มิลลิแอมป์

ตาราง 16 การทดสอบพัลลัม

ลำดับ (พัลลัม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	10	1.5	—	✓
2	1,500	10	1.5	—	✓
3	1,500	10	1.5	—	✓
4	1,500	10	1.5	—	✓
5	1,500	10	1.5	—	✓
6	1,500	10	1.5	—	✓
7	1,500	10	1.5	—	✓
8	1,500	10	1.5	—	✓
9	1,500	10	1.5	—	✓
10	1,500	10	1.5	—	✓

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 15 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัลลัมที่ผิดปกติกับพัลลัมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 60 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.5 มิลลิแอมป์

ตาราง 17 การทดสอบพัลลัม

ลำดับ (พัลลัม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	60	1.5	--	✓
2	1,500	60	1.5	--	✓
3	1,500	60	1.5	--	✓
4	1,500	60	1.5	--	✓
5	1,500	60	1.5	--	✓
6	1,500	60	1.5	--	✓
7	1,500	60	1.5	--	✓
8	1,500	60	1.5	--	✓
9	1,500	60	1.5	--	✓
10	1,500	60	1.5	--	✓

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

การทดลองครั้งที่ 16 ผลการทดสอบใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตรวจสอบกับพัลลัมที่ผิดปกติกับพัลลัมจำนวน 10 ตัว โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้

1. แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์
2. เวลาทดสอบ 90 วินาที
3. กระแสรั่วไหลไม่เกิน 1.5 มิลลิแอมป์

ตาราง 18 การทดสอบพัลลัม

ลำดับ (พัลลัม)	แรงดัน ทดสอบ (โวลต์)	เวลาทดสอบ (วินาที)	กระแส (มิลลิแอมป์)	ผลการทดสอบ	
				ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	1,500	90	1.5	—	✓
2	1,500	90	1.5	—	✓
3	1,500	90	1.5	—	✓
4	1,500	90	1.5	—	✓
5	1,500	90	1.5	—	✓
6	1,500	90	1.5	—	✓
7	1,500	90	1.5	—	✓
8	1,500	90	1.5	—	✓
9	1,500	90	1.5	—	✓
10	1,500	90	1.5	—	✓

จากตารางสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ตรงกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีอยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการเปรียบเทียบมาตรฐานโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

โดยการนำอุปกรณ์เปรียบเทียบมาตรฐาน เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ไปเปรียบเทียบที่ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตาราง 19 ความเที่ยงตรง ในการทดสอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ

ย่านวัด	กำหนดค่า กระแสต้านออก	ค่าที่วัดได้	ความคลาดเคลื่อน
1 มิลลิแอมป์	1 มิลลิแอมป์ 50 เฮิร์ตซ์	1.000 มิลลิแอมป์	0.1 %
1.5 มิลลิแอมป์	1.5 มิลลิแอมป์ 50 เฮิร์ตซ์	1.500 มิลลิแอมป์	0.1 %
3 มิลลิแอมป์	3 มิลลิแอมป์ 50 เฮิร์ตซ์	3.001 มิลลิแอมป์	0.1 %
4 มิลลิแอมป์	4 มิลลิแอมป์ 50 เฮิร์ตซ์	3.998 มิลลิแอมป์	0.1 %

ได้รับใบรับรอง (Certificate of Calibration) CSR No. 0105 / 02 ลงวันที่ 27 มีนาคม พ.ศ.2545

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบประเมินของผู้เชี่ยวชาญ

จากแบบประเมินของผู้เชี่ยวชาญโดยการแบ่งเนื้อหาการประเมินดังนี้

3. ให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินสมรรถนะ 5 ด้านดังนี้

3.1 สมรรถนะทางด้านวิศวกรรม มีความเหมาะสม สามารถใช้หลักการทางด้านวิศวกรรม ทำการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยใช้กฎของโอห์ม ในวงจรแบ่งกระแส เพื่อตรวจสอบกระแสรั่วไหล และใช้กฎการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า ของฟาราเดย์ ในการออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง

3.2 สมรรถนะทางด้านความปลอดภัย มีระบบป้องกันไฟฟ้าผิดปกติและระบบป้องกันอันตรายโดยใช้ฟิวส์

3.3 สมรรถนะทางด้านกายภาพ เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า สามารถถอดแยกชิ้นส่วนได้ และมีโครงสร้างที่คงทนแข็งแรงต่อการใช้งาน และเคลื่อนย้าย

3.4 สมรรถนะทางการใช้งาน ในการใช้งานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ใช้งานได้สะดวก สามารถอ่านค่าได้เป็นตัวอักษร เพราะแสดงผลบนจอแอลซีดี

3.5 สมรรถนะทางการบำรุงรักษา เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า มีจุดที่ต้องบำรุงรักษาน้อยและอุปกรณ์สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดราคาถูก

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าได้ดำเนินการดังต่อไปนี้

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตามเกณฑ์การสอบเทียบ

ความสำคัญของการวิจัย

ได้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปใช้ตรวจสอบกับเครื่องใช้ไฟฟ้า ตามเกณฑ์การสอบเทียบและสามารถทดแทนการนำเข้าเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนจากต่างประเทศ

สมมติฐานในการวิจัย

เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ออกแบบ และสร้างขึ้นมีประสิทธิภาพ ตามเกณฑ์การสอบเทียบ

การดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าครั้งนี้ ผู้วิจัยจะดำเนินการต่อไปนี้

1 รับรู้ปัญหาของการตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เนื่องจากผู้วิจัยได้มีหน้าที่ควบคุมการทำงานในการประกอบเครื่องใช้ไฟฟ้าโดยเฉพาะพัดลมไฟฟ้า ซึ่งเมื่อประกอบเครื่องใช้ไฟฟ้าเสร็จสมบูรณ์จะต้องตรวจสอบความเป็นฉนวนในด้านการทนแรงดันสูง ตามเกณฑ์การสอบเทียบซึ่งเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ที่ใช้ตรวจสอบมีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้ามาทดแทนของที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

2 ศึกษารายละเอียดต่างๆที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.1 ศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยเชิงทดลองที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า และงานวิจัยเชิงทดลองทางด้านไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง

2.2 ศึกษาถึงอุปกรณ์ที่ใช้สร้างแหล่งจ่ายแรงดันสูง และวงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล พร้อมแสดงผล

2.3 ศึกษาวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในส่วนต่างๆที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.4 การออกแบบวงจรในส่วนต่างๆที่ใช้สร้าง เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.4.1 ออกแบบวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

2.4.2 ออกแบบวงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล

2.4.3 ออกแบบวงจรควบคุมและแสดงผล

3 กำหนดระยะเวลาสถานที่ ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

3.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เริ่ม ตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ 2544 ถึง วันที่ 11 มีนาคม พ.ศ. 2545

3.2 สถานที่ที่ใช้ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า บริษัท วณิชย ์ แมนูแฟคเจอร์ จำกัด แผนกประกอบสินค้าสำเร็จรูป ฝ่ายโรงงาน พระราม 2 บางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร

4 กำหนดคุณสมบัติผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบรูปแบบและการใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.7.1 จบการศึกษาระดับปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ , สาขาไฟฟ้าสื่อสาร , สาขาโทรคมนาคมหรือสาขาที่เกี่ยวข้องสาขาใดสาขาหนึ่ง

2.7.2 มีประสบการณ์ปฏิบัติงานทางด้านไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ไม่ต่ำกว่า 5 ปี

2.7.2 ใช้ผู้เชี่ยวชาญในการประเมินผล 3 ท่าน

5. สร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าและทดลองใช้เปรียบเทียบกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าของโรงงาน

6. ให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินผลของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

7. สร้างชุดเปรียบเทียบมาตรฐานของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าและส่งไปเปรียบเทียบที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1.การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ เป็นแรงดันสูง 1,500 โวลต์ และวงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล 1.0 , 1.5 มิลลิแอมป์ พร้อมชุดแสดงผล เป็นตัวอักษร แสดงบนจอ แอลซีดี และสามารถตั้งเวลาทดสอบได้ 4 ระดับ คือ 5 , 10 , 60 , 90 วินาที ผู้วิจัยออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าขึ้น สามารถใช้ทดแทนเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่นำเข้าจากต่างประเทศ

2. ส่งอุปกรณ์เปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ไปสอบเทียบที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยได้ผลการสอบเทียบดังนี้

2.1 ความเที่ยงตรง ในการทดสอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ

ตาราง 19 ผลการสอบเทียบ

ย่านวัด	กำหนดค่า กระแสต้านออก	ค่าที่วัดได้	ความคลาดเคลื่อน
1 มิลลิแอมป์	1 มิลลิแอมป์ 50 เฮิรตซ์	1.000 มิลลิแอมป์	0.1 %
1.5 มิลลิแอมป์	1.5 มิลลิแอมป์ 50 เฮิรตซ์	1.500 มิลลิแอมป์	0.1 %
3 มิลลิแอมป์	3 มิลลิแอมป์ 50 เฮิรตซ์	3.001 มิลลิแอมป์	0.1 %
4 มิลลิแอมป์	4 มิลลิแอมป์ 50 เฮิรตซ์	3.998 มิลลิแอมป์	0.1 %

จากการส่งอุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าดังกล่าวไปสอบเทียบ สามารถใช้งานได้จริงตามใบประกาศนียบัตร CSR No. 0105 / 02 ลงวันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 254

3. จากการทดสอบเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าและ ได้นำเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ไปทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าดังนี้

1.1 แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์

1.2 เวลาทดสอบ 5 , 10 , 60 , 90 วินาที

1.3 กระแสรั่วไหล 1.0 , 1.5 มิลลิแอมป์

ผลปรากฏเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้เหมือนกัน

4. จากการประเมินผลของผู้เชี่ยวชาญสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้ดังนี้

4.1 สมรรถนะทางด้านวิศวกรรม

4.1.1 มีคุณค่าทางด้านวิศวกรรมใหม่ ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.33

4.1.2 ใช้หลักวิศวกรรมในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.00

4.1.3 ใช้หลักการและทฤษฎีในการสร้างเครื่องอย่างถูกต้อง ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยที่ 4.33

4.1.4 ใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ในการสร้างเครื่องอย่างเหมาะสม ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.00

4.1.5 ใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเหมาะสม ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยที่ 4.66

4.2 สมรรถนะทางด้านความปลอดภัย

4.2.1 ระบบป้องกันถ้าเกินระบบไฟฟ้าผิดปกติ ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยที่ 3.33

4.2.2 มีระบบป้องกันอันตรายจากการใช้งาน ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยที่ 3.33

4.2.3 การป้องกันอันตรายจากการสัมผัสไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยที่ 3.33

4.3 สมรรถนะทางกายภาพ

4.3.1 สามารถแยกอุปกรณ์ของเครื่องได้ ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.00

4.3.2 ความแข็งแรงของโครงสร้าง ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.00

4.3.3 การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆได้อย่างเหมาะสม ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.00

4.3.4 เครื่องมีขนาดกระทัดรัด เหมาะสมเมื่อเทียบกับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจสอบ ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยที่ 3.33

4.3.5 เครื่องมีรูปทรงที่สวยงามใช้โทนสีเหมาะสม ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยที่ 3.33

4.4 สมรรถนะการใช้งาน

4.4.1 ขั้นตอนการใช้งานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าอย่างเหมาะสม ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.33

4.4.2 ใช้เวลาในการตรวจสอบอย่างเหมาะสม ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยที่ 4.66

4.4.3 ความสะดวกในการใช้งานของเครื่อง ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 3.66

4.4.4 สามารถนำไปใช้และพัฒนาในโรงงานอุตสาหกรรมได้ ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยที่ 4.66

4.5 สมรรถนะการบำรุงรักษา

4.5.1 อุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษาหาซื้อได้ง่ายราคาถูก ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.33

4.5.2 การตรวจสอบและบำรุงรักษาเครื่องทำได้ง่าย ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.00

4.5.3 ความสะดวกในการถอดและแยก ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 3.66

4.5.4 มีจุดตรวจและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ต่างๆน้อย ซึ่งผลจากการประเมิน อยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.33

4.6 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ ระบบการป้องกันอันตรายยังไม่ดีพอในขณะที่ใช้งานควรใช้อุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานกว่านี้ ตลอดจนขนาดและรูปลักษณะยังไม่ดีพอควรให้มีขนาดกระทัดรัดกว่านี้ ส่วนทางด้านอื่นอยู่ในขั้นดี

อภิปรายผล

ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของ เครื่องใช้ไฟฟ้า อภิปรายผลได้ดังนี้

1. การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันสูง 1,500 โวลต์ ผลการออกแบบสอดคล้องกับทฤษฎีการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฟาราเดย์ (Faraday's Law) และวงจรตรวจสอบกระแสรั่วไหล 1.0 , 1.5 มิลลิแอมป์ สามารถใช้งานได้เป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) สอดคล้องกับทฤษฎีวงจรแบ่งกระแสไฟฟ้า พร้อมชุดแสดงผล เป็นตัวอักษร แสดงบนจอ แอลซีดี และสามารถตั้งเวลาทดสอบได้ 4 ระดับ คือ 5 , 10 , 60 , 90 วินาที ผู้วิจัยออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าขึ้น สามารถใช้ทดแทนเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่นำเข้าจากต่างประเทศสอดคล้องกับงานวิจัยของนายนิยม สังขวิเชียร เรื่องการออกแบบและสร้างเครื่องมัลติเพล็กซ์ในระบบสื่อสารสัญญาณของโทรศัพท์ขนาด 32 ช่องสัญญาณ

2. ส่งอุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ไปสอบเทียบที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยสามารถนำอุปกรณ์สอบเทียบไปปรับเทียบเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าได้ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดมาตรฐาน กระทรวงอุตสาหกรรมทางด้านความปลอดภัยในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่จะต้องผ่านการตรวจสอบความเป็นฉนวนโดยเครื่องตรวจสอบที่ได้ผ่านการสอบเทียบและได้ใบรับรองผลการสอบเทียบ

3. จากการทดสอบเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าและ ได้นำเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ไปทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในโรงงาน โดยกำหนดค่าดังนี้

1.4 แรงดันทดสอบ 1,500 โวลต์

1.5 เวลาทดสอบ 5 , 10 , 60 , 90 วินาที

1.6 กระแสรั่วไหล 1.0 , 1.5 มิลลิแอมป์

ผลปรากฏเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้เท่าเทียมกับเครื่องที่มีใช้อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นไปตามสมมติฐานการวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของนายเฉลิมพล ศรีอนันท์ ได้ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถใช้ทดแทนเครื่องนำเข้าที่มีราคาแพงได้

4. ให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินสมรรถนะ 5 ด้านดังนี้

4.1 สมรรถนะทางด้านวิศวกรรม มีความเหมาะสมดีมาก สามารถใช้หลักการทางด้านวิศวกรรมทำการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าได้ดีมากสอดคล้องกับงานวิจัยของนายยงยุทธ วิฑูรย์รัตนันต์ ได้ทำการออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือวัดทรานซิสเตอร์โดยใช้ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ทางด้านวิศวกรรม

4.2 สมรรถนะทางด้านความปลอดภัย มีระบบป้องกันไฟฟ้าผิดปกติและระบบป้องกันอันตรายโดยใช้ฟิวส์ เป็นไปตามข้อกำหนดทางด้านความปลอดภัยมาตรฐานอุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม

4.3 สมรรถนะทางด้านกายภาพ เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าสามารถถอดแยกชิ้นส่วนได้ และมีโครงสร้างที่คงทนแข็งแรงต่อการใช้งาน และเคลื่อนย้ายได้ง่ายสอดคล้องกับงานวิจัยของนายเฉลิมพล ศรีอนันท์ ได้ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถถอดแยกชิ้นส่วนได้

4.4 สมรรถนะทางการใช้งาน ในการใช้งานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ใช้งานได้สะดวก สามารถอ่านค่าได้เป็นตัวอักษร เพราะแสดงผลบนจอแอลซีดี โดยสอดคล้องกับงาน

วิจัยของนายขงยุทธ วิฑูรย์ธรรณต์ ได้ทำการออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือวัดทรานซิสเตอร์สามารถใช้งานได้สะดวกต่อการอ่านค่า

4.5 สมรรถนะทางการบำรุงรักษา เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า มีจุดที่ต้องบำรุงรักษาน้อยและอุปกรณ์สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดราคาถูก สอดคล้องกับงานวิจัยของนาย สมชาย สุขพันธ์ ได้ออกแบบและสร้างเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์อุปกรณ์การซ่อมบำรุงหาซื้อได้ง่าย

ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การศึกษาค้นคว้านี้สมบูรณ์ผู้วิจัยจึงได้เสนอแนะเพื่อให้เกิดแนวคิดใหม่ๆ ในการศึกษาค้นคว้าในอนาคตดังนี้

1. การออกแบบหม้อแปลงแรงดันสูงควรออกแบบให้สามารถปรับค่าได้เพื่อการทดสอบอุปกรณ์ได้มากกว่าที่กำหนด
2. ชุดตรวจสอบกระแสไหลควรใช้อุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานกว่านี้ โดยใช้อุปกรณ์เฉพาะด้านที่ใช้สำหรับเครื่องวัดในงานอุตสาหกรรม
3. ชุดแสดงผลควรมีขนาดตัวอักษรที่ใหญ่กว่านี้ซึ่งทำให้การมองเห็นชัดเจน และควรเพิ่มระบบเสียงเข้าไปด้วยในกรณีที่เครื่องไฟฟ้าทดสอบแล้วไม่ผ่าน
4. โครงสร้างควรมีขนาดเล็กกระทัดรัดและแข็งแรงกว่านี้

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัย

1. ในการสร้างอุปกรณ์เปรียบเทียบมาตรฐานควรทำให้อยู่ภายในตัวเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าเดียวกัน
2. ควรออกแบบให้มีค่าที่กำหนดมากกว่านี้ เช่น กระแสรั่วไหล ควรออกแบบให้สามารถวัดได้ตั้งแต่ค่า 0.1 - 10.0 มิลลิแอมป์ แรงดันทดสอบ 1,000 - 2,000 โวลต์

บรรณานุกรม

- การเงินธนาคาร. (2543). สถานะประเทศ วารสาร ปีที่19 ฉบับ 224
- โคทม อารียา. (5230). วงจรอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม2. กรุงเทพฯ : เอส-เอ็นการพิมพ์
- เฉลิมพล ศรีอนันต์. (2531). เครื่องทดสอบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ. คอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ เวิลด์. 114 :120-122
- ทรงวุฒิ พานิช. (2542). การสร้างชุดการสอนวิชาทฤษฎีช่างกลทั่วไป เรื่องเครื่องมือวัดตามหลักสูตร ประกาศนียบัตรวิชาชีพ พุทธศักราช 2538 กรมอาชีวศึกษา. ปรินูญานิพนธ์ กศ.ม. (วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร. ถ่ายเอกสาร
- นานา พวงปทุมมานนท์, ไพรยา บุญนำศิริกิจ และ เอกลักษณ์ ชัยธีระยานนท์. (2540). เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบรากกำลังสองเฉลี่ยจำนวนจริง. ปรินูญานิพนธ์ วศบ. (วิศวกรรมไฟฟ้า). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ชนบุรี. ถ่ายเอกสาร
- ธนพล วีราสา. (2544). นโยบายวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- รัชชัย สุมิตร. (2527). รีเลย์ป้องกันระบบพลังไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่3. กรุงเทพฯ : โครงการสนับสนุนเทคนิค อุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- นิยม สังขวิเชียร. (2542). การออกแบบและสร้างเครื่องมัลติเพล็กซ์ในระบบสื่อสารของโทรศัพท์ขนาด 32 ช่องสัญญาณ. ปรินูญานิพนธ์ กศ.ม. (วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร. ถ่ายเอกสาร.
- บัญชา ศิลปสกุลสุข. (ม.ป.ป.). เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟส. 444 อิเล็กทรอนิกส์1. (ม.ป.ท.)
- มงคล ทองสงคราม. (2534). ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า1. กรุงเทพฯ : รามการพิมพ์
- ยีน ภูววรรณ. (2521). ทฤษฎีและการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม1. กรุงเทพฯ : นำอักษรการพิมพ์
- ยงยุทธ วิสุทธิธาดา. (2541). การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือทรานซิสเตอร์. ปรินูญานิพนธ์ กศ.ม. (วิชาเอก อุตสาหกรรมศึกษา). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร. ถ่ายเอกสาร.
- สมชาย สุขพันธุ์. (2531). เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์. กรุงเทพฯ : เซมิคอนดักเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์.
- สัมพันธ์ หาญชล. (2528). เครื่องกลไฟฟ้า1 หม้อแปลงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 6 กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ชนบุรี.
- สำรวย สังข์สะอาด. (2528). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุขุมวิทย์ ภูมิวิมลสารและคณะ. (2525). อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานสำหรับช่างเทคนิค. พิมพ์ครั้งที่2. กรุงเทพฯ : นำอักษรการพิมพ์

บรรณานุกรม(ต่อ)

เอก ไชยสวัสดิ์. (2541). การวัดและเครื่องวัดไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).

ส.เอเซียการพิมพ์

Howard, H. Gerrish.(1996).*Transistor electronics*.The Good heart-Willcox Co.,Inc.

Stephen, r. Fleeman.(1990)*Electronic Devices*.Prentice-Hall International,Inc.

Robert, F.ierret.(1996)*Semiconductor Device Fundamentals*. Addison-Wesley.

Boylestad, Robert. And Lous. Nashelsky, *Electronice Devices and Circuit Theory*. 5 th ed.

New Jersey : Prentice-Hall.Inc,1992

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
หนังสือขอความร่วมมือเพื่อการวิจัย

ที่ ทม 1012/ ๑๕๖๖



บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

พฤษภาคม 2544

เรื่อง ขอความร่วมมือเพื่อการวิจัย

เรียน ผู้จัดการโรงงาน บริษัท วนวิทย์ แมนูแฟกเจอร์ริง จำกัด

เนื่องด้วย พ.อ.อ.ประสงค์ สืบชาติ นิสิตระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปริญญานิพนธ์เรื่อง “ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า” โดยมี อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ในการนี้ นิสิตมีความจำเป็นต้องเก็บข้อมูลเพื่อพัฒนาเครื่องมือการวิจัย โดยขออนุญาตใช้สถานที่ และขอใช้เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เพื่อทดสอบการใช้งานจริง ในระหว่างเดือนพฤษภาคม 2544 - มกราคม 2545

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาให้ พ.อ.อ.ประสงค์ สืบชาติ ได้ใช้เครื่องมือดังกล่าว ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.เสริมศักดิ์ วิศาลาภรณ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

สำนักงานคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 664-1000 ต่อ 5726, 5644

โทรสาร. 258-4119

ที่ PS08003-292/2544

11 ธันวาคม 2544

เรื่อง อนุญาตให้ใช้สถานที่และเครื่องมือ

เรียน คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

อ้างถึง หนังสือสำนักงานคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เลขที่ ทม1012/4491ลงวันที่ 28 พฤศจิกายน 2544

ตามที่ ท่านได้มีหนังสือถึงบริษัทฯ เพื่อขออนุญาตให้ พ.อ.อ. ประสงค์ สืบชาติ ได้
ใช้สถานที่และเครื่องมือของบริษัทฯ เพื่อดำเนินการทำปริญญานิพนธ์เรื่อง “การออกแบบและสร้าง
เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า” ในระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2544 ถึง
มกราคม 2545

บริษัทฯ มีความยินดีที่ได้มีโอกาสร่วมมือกับมหาวิทยาลัยในครั้งนี้ โดยบริษัทฯ อนุ
ญาติให้ พ.อ.อ. ประสงค์ สืบชาติ ได้ใช้สถานที่และเครื่องมือของบริษัทฯ เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว

ขอแสดงความนับถือ



(นายวิทยา พานิชตระกูล)

กรรมการผู้อำนวยการ

บริษัททวนวิทย์แมนูแฟคเจอร์ จำกัด

โทร. 0-2896-2390



ภาคผนวก ข.

หนังสือรับรองผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัย

ที่ ทม 1012/ ๒๐๕๒



บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

๑๑ มีนาคม ๒๕๔๕

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญ

เรียน กรรมการอำนวยการ บริษัท ฮาตาริ อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด

สิ่งที่ส่งมาด้วย แบบประเมิน

เนื่องด้วย นายประสงค์ สืบชาติ นิสิตระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง “ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า” โดยมี อาจารย์ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ในการนี้ บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญท่านเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบแบบประเมินออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาเป็นผู้เชี่ยวชาญให้ นายประสงค์ สืบชาติ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์นภาพร หะวานนท์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

สำนักงานคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 664-1000 ต่อ 5726, 5644

โทรสาร. 258-4119

ที่ ทม 1012/ ๙๐๕๐



บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

// มีนาคม 2545

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญ

เรียน ประจํากรมอิเล็กทรอนิกส์ กองทัพอากาศ

สิ่งที่ส่งมาด้วย แบบประเมิน

เนื่องด้วย นายประสงค์ สืบชาติ นิสิตระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง “ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า” โดยมี อาจารย์ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ในการนี้ บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญท่านเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบแบบประเมินออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาเป็นผู้เชี่ยวชาญให้ นายประสงค์ สืบชาติ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์นภกรณ์ หะวานนท์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

สำนักงานคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 664-1000 ต่อ 5726, 5644

โทรสาร. 258-4119

ที่ ทม 1012/2051



บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

// มีนาคม 2545

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญ

เรียน ผู้จัดการ บริษัท วนวิทย์ อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด

สิ่งที่ส่งมาด้วย แบบประเมิน

เนื่องด้วย นายประสงค์ สืบชาติ นิสิตระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง “ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า” โดยมี อาจารย์ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ในการนี้ บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญท่านเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจแบบประเมินออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาเป็นผู้เชี่ยวชาญให้ นายประสงค์ สืบชาติ
จึงจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์นภาพร หะวานนท์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

สำนักงานคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 664-1000 ต่อ 5726, 5644

โทรสาร. 258-4119

ภาคผนวก ค.
รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์

LM2902, LM324/LM324A, LM224/ LM224A

Quad Operational Amplifier

Features

- Internally frequency compensated for unity gain
- Large DC voltage gain: 100dB
- Wide power supply range:
LM224/LM224A, LM324/LM324A : 3V~32V (or $\pm 1.5 \sim 15$ V)
- LM2902: 3V~26V (or $\pm 1.5 \sim 13$ V)
- Input common mode voltage range includes ground
- Large output voltage swing: 0V to $V_{CC} - 1.5$ V
- Power drain suitable for battery operation

Description

The LM324/LM324A, LM2902, LM224/LM224A consist of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide voltage range. Operation from split power supplies is also possible so long as the difference between the two supplies is 3 volts to 32 volts. Application areas include transducer amplifier, DC gain blocks and all the conventional OP amp circuits which now can be easily implemented in single power supply systems.

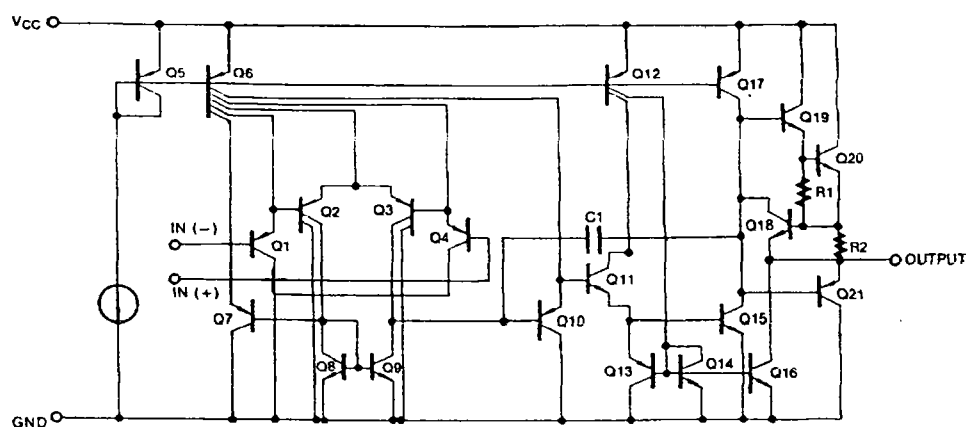
14-DIP

14-SOP

Internal Block Diagram

Schematic Diagram

(One Section Only)



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	LM224/LM224A	LM324/LM324A	LM2902	Unit
Power Supply Voltage	VCC	±16 or 32	±16 or 32	±13 or 26	V
Differential Input Voltage	V _{I(DIFF)}	32	32	26	V
Input Voltage	V _I	-0.3 to +32	-0.3 to +32	-0.3 to +26	V
Output Short Circuit to GND VCC ≤ 15V, TA = 25°C (one Amp)	-	Continuous	Continuous	Continuous	-
Power Dissipation	P _D	570	570	570	mW
Operating Temperature Range	TOPR	-25 ~ +85	0 ~ +70	-40 ~ +85	°C
Storage Temperature Range	TSTG	-65 ~ +150	-65 ~ +150	-65 ~ +150	°C

Electrical Characteristics

$V_{CC}=5.0V$, $V_{EE}=GND$, $T_A=25^\circ C$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	LM224			LM324			LM2902			Unit
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Input Offset Voltage	V_{IO}	$V_{CM} = 0V$ to $V_{CC} - 1.5V$ $V_{O(P)} = 1.4V$, $R_S = 0\Omega$	-	1.5	5.0	-	1.5	7.0	-	1.5	7.0	mV
Input Offset Current	I_{IO}	-	-	2.0	30	-	3.0	50	-	3.0	50	nA
Input Bias Current	I_{BIAS}	-	-	40	150	-	40	250	-	40	250	nA
Common-Mode Input Voltage Range	$V_{I(R)}$	Note1	0	-	$V_{CC} - 1.5$	0	$V_{CC} - 1.5$	-	0	-	$V_{CC} - 1.5$	V
Supply Current	I_{CC}	$R_L = \infty$, $V_{CC} = 30V$ (all Amps)	-	1.0	3	-	1.0	3	-	1.0	3	mA
		$R_L = \infty$, $V_{CC} = 5V$ (all Amps) ($V_{CC} = 26V$ for LM2902)	-	0.7	1.2	-	0.7	1.2	-	0.7	1.2	mA
Large Signal Voltage Gain	G_V	$V_{CC} = 15V$, $R_L \geq 2K\Omega$ $V_{O(P)} = 1V$ to $11V$	50	100	-	25	100	-	-	100	-	V/ mV
Output Voltage Swing	$V_{O(H)}$	Note1 $R_L = 2K\Omega$	26	-	-	26	-	-	22	-	-	V
			27	28	-	27	28	-	23	24	-	V
	$V_{O(L)}$	$V_{CC} = 5V$, $R_L \geq 10K\Omega$	-	5	20	-	5	20	-	5	100	mV
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	-	70	85	-	65	75	-	50	75	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	-	65	100	-	65	100	-	50	100	-	dB
Channel Separation	CS	$f = 1KHz$ to $20KHz$	-	120	-	-	120	-	-	120	-	dB
Short Circuit to GND	I_{SC}	-	-	40	60	-	40	60	-	40	60	mA
Output Current	I_{SOURCE}	$V_{I(+)} = 1V$, $V_{I(-)} = 0V$ $V_{CC} = 15V$, $V_{O(P)} = 2V$	20	40	-	20	40	-	20	40	-	mA
	I_{SINK}	$V_{I(+)} = 0V$, $V_{I(-)} = 1V$ $V_{CC} = 15V$, $V_{O(P)} = 2V$	10	13	-	10	13	-	10	13	-	mA
		$V_{I(+)} = 0V$, $V_{I(-)} = 1V$ $V_{CC} = 15V$, $V_{O(R)} = 200mV$	12	45	-	12	45	-	-	-	-	μA
Differential Input Voltage	$V_{I(DIFF)}$		-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	V

Notes:

$V_{CC}=30V$ for LM224 and LM324, $V_{CC} = 26V$ for LM2902

Electrical Characteristics

$V_{CC} = 5.0V$, $V_{EE} = GND$, unless otherwise specified)

The following specification apply over the range of $-25^{\circ}C \leq T_A \leq +85^{\circ}C$ for the LM224; and the $0^{\circ}C \leq T_A \leq +70^{\circ}C$ for the LM324 ; and the $-40^{\circ}C \leq T_A \leq +85^{\circ}C$ for the LM2902

Parameter	Symbol	Conditions		LM224			LM324			LM2902			Unit
				Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Input Offset Voltage	V _{IO}	V _{ICM} = 0V to V _{CC} -1.5V V _{O(P)} = 1.4V, R _S = 0Ω		-	-	7.0	-	-	9.0	-	-	10.0	mV
Input Offset Voltage Drift	ΔV _{IO} /ΔT	-		-	7.0	-	-	7.0	-	-	7.0	-	μV/°C
Input Offset Current	I _{IO}	-		-	-	100	-	-	150	-	-	200	nA
Input Offset Current Drift	ΔI _{IO} /ΔT	-		-	10	-	-	10	-	-	10	-	pA/°C
Input Bias Current	I _{BIAS}	-		-	-	300	-	-	500	-	-	500	nA
Common-Mode Input Voltage Range	V _{I(R)}	Note1		0	-	V _{CC} -2.0	0	-	V _{CC} -2.0	0	-	V _{CC} -2.0	V
Large Signal Voltage Gain	G _V	V _{CC} = 15V, R _L ≥ 2.0KΩ V _{O(P)} = 1V to 11V		25	-	-	15	-	-	15	-	-	V/mV
Output Voltage Swing	V _{O(H)}	Note1	R _L = 2KΩ	26	-	-	26	-	-	22	-	-	V
			R _L = 10KΩ	27	28	-	27	28	-	23	24	-	V
	V _{O(L)}	V _{CC} = 5V, R _L ≥ 10KΩ		-	5	20	-	5	20	-	5	100	mV
Output Current	I _{SOURCE}	V _{I(+)} = 1V, V _{I(-)} = 0V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V		10	20	-	10	20	-	10	20	-	mA
	I _{SINK}	V _{I(+)} = 0V, V _{I(-)} = 1V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V		10	13	-	5	8	-	5	8	-	mA
Differential Input Voltage	V _{I(DIFF)}	-		-	-	V _{CC}	-	-	V _{CC}	-	-	V _{CC}	V

Note:

$V_{CC} = 30V$ for LM224 and LM324 , $V_{CC} = 26V$ for LM2902

Electrical Characteristics

V_{CC}=5.0V, V_{EE} = GND, T_A=25 °C, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	LM224A			LM324A			Unit
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Input Offset Voltage	V _{IO}	V _{CM} = 0V to V _{CC} -1.5V V _{O(P)} = 1.4V, R _S = 0 Ω	-	1.0	3.0	-	1.5	3.0	mV
Input Offset Current	I _{IO}	-	-	2	15	-	3.0	30	nA
Input Bias Current	I _{BIAS}	-	-	40	80	-	40	100	nA
Input Common-Mode Voltage Range	V _{I(R)}	V _{CC} = 30V	0	-	V _{CC} -1.5	0	-	V _{CC} -1.5	V
Supply Current (All Amps)	I _{CC}	V _{CC} = 30V	-	1.5	3	-	1.5	3	mA
		V _{CC} = 5V	-	0.7	1.2	-	0.7	1.2	mA
Large Signal Voltage Gain	G _V	V _{CC} = 15V, R _L ≥ 2 KΩ V _{O(P)} = 1V to 11V	50	100	-	25	100	-	V/mV
Output Voltage Swing	V _{O(H)}	Note1 R _L = 2 KΩ	26	-	-	26	-	-	V
		R _L = 10 KΩ	27	28	-	27	28	-	V
	V _{O(L)}	V _{CC} = 5V, R _L ≥ 10 KΩ	-	5	20	-	5	20	mV
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	-	70	85	-	65	85	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	-	65	100	-	65	100	-	dB
Channel Separation	CS	f = 1KHz to 20KHz	-	120	-	-	120	-	dB
Short Circuit to GND	I _{SC}	-	-	40	60	-	40	60	mA
Output Current	I _{SOURCE}	V _{I(+)} = 1V, V _{I(-)} = 0V V _{CC} = 15V	20	40	-	20	40	-	mA
	I _{SINK}	V _{I(+)} = 0V, V _{I(-)} = 1V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V	10	20	-	10	20	-	mA
		V _{I(+)} = 0V, V _{I(-)} = 1V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 200mV	12	50	-	12	50	-	μA
Differential Input Voltage	V _{I(DIFF)}	-	-	-	V _{CC}	-	-	V _{CC}	V

Note:

1. V_{CC}=30V for LM224A, LM324A

Electrical Characteristics

($V_{CC} = 5.0V$, $V_{EE} = GND$, unless otherwise specified)

The following specifications apply over the range of $-25^{\circ}C \leq T_A \leq +85^{\circ}C$ for the LM224A; and the $0^{\circ}C \leq T_A \leq +70^{\circ}C$ for the LM324A

Parameter	Symbol	Conditions	LM224A			LM324A			Unit
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Input Offset Voltage	V_{IO}	$V_{CM} = 0V$ to $V_{CC} - 1.5V$ $V_{O(P)} = 1.4V$, $R_S = 0\Omega$	-	-	4.0	-	-	5.0	mV
Input Offset Voltage Drift	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	-	-	7.0	20	-	7.0	30	$\mu V/^{\circ}C$
Input Offset Current	I_{IO}	-	-	-	30	-	-	75	nA
Input Offset Current Drift	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	-	-	10	200	-	10	300	pA/ $^{\circ}C$
Input Bias Current	I_{BIAS}	-	-	40	100	-	40	200	nA
Common-Mode Input Voltage Range	$V_{I(R)}$	$V_{CC} = 30V$	0	-	$V_{CC} - 2.0$	0	-	$V_{CC} - 2.0$	V
Large Signal Voltage Gain	G_V	$V_{CC} = 15V$, $R_L \geq 2.0K\Omega$	25	-	-	15	-	-	V/mV
Output Voltage Swing	$V_{O(H)}$	$V_{CC} = 30V$, $R_L = 2K\Omega$	26	-	-	26	-	-	V
		$R_L = 10K\Omega$	27	28	-	27	28	-	
	$V_{O(L)}$	$V_{CC} = 5V$, $R_L \geq 10K\Omega$	-	5	20	-	5	20	mV
Output Current	I_{SOURCE}	$V_{I(+)} = 1V$, $V_{I(-)} = 0V$ $V_{CC} = 15V$	10	20	-	10	20	-	mA
	I_{SINK}	$V_{I(+)} = 0V$, $V_{I(-)} = 1V$ $V_{CC} = 15V$	5	8	-	5	8	-	mA
Differential Input Voltage	$V_{I(DIFF)}$	-	-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	V

Typical Performance Characteristics

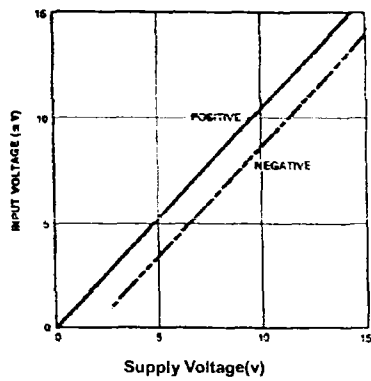


Figure 1. Input Voltage Range vs Supply Voltage

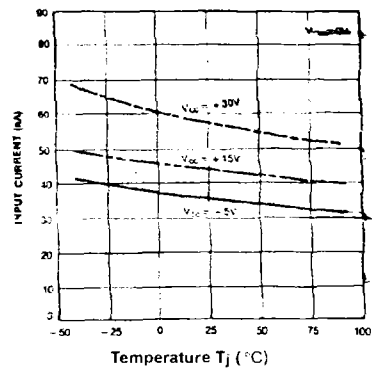


Figure 2. Input Current vs Temperature

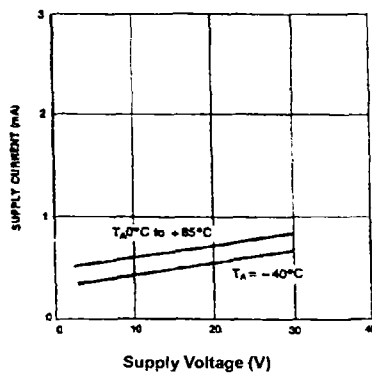


Figure 3. Supply Current vs Supply Voltage

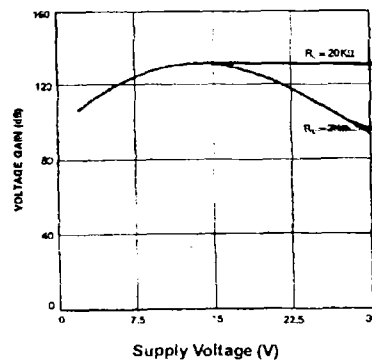


Figure 4. Voltage Gain vs Supply Voltage

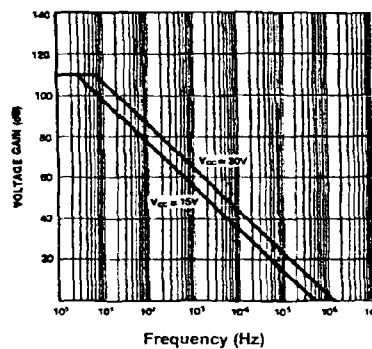


Figure 5. Open Loop Frequency Response

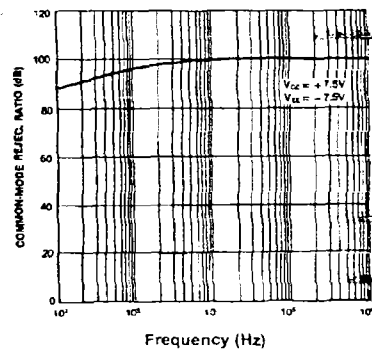


Figure 6. Common mode Rejection Ratio

Typical Performance Characteristics (continued)

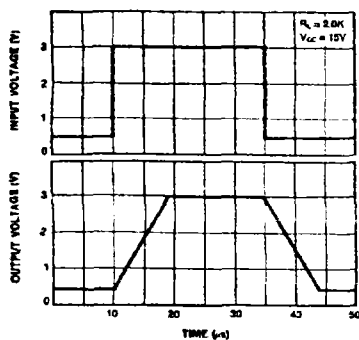


Figure 7. Slew Rate

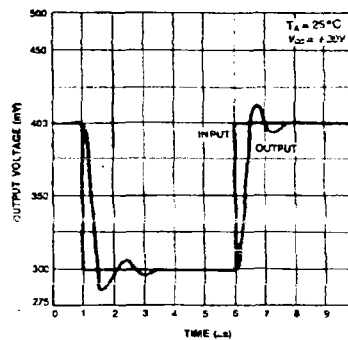


Figure 8. Voltage Follower Pulse Response

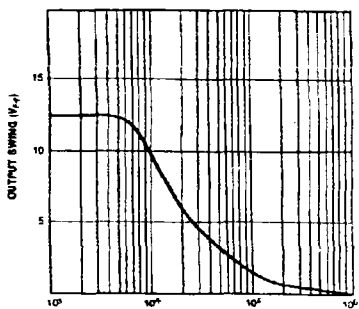


Figure 9. Large Signal Frequency Response

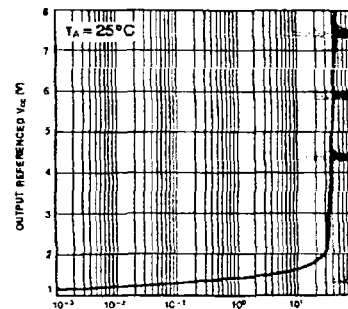


Figure 10. Output Characteristics vs Current Sourcing

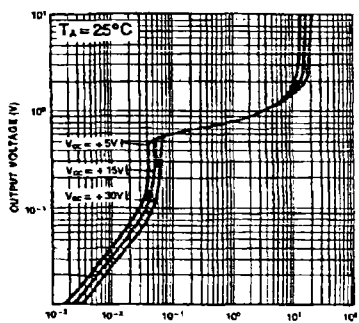


Figure 11. Output Characteristics vs Current Sinking

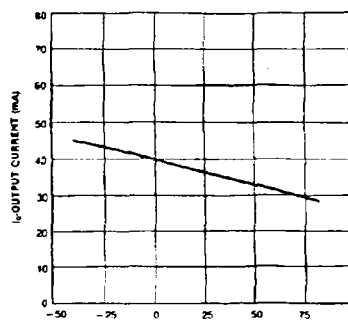


Figure 12. Current Limiting vs Temperature

Ordering Information

Product Number	Package	Operating Temperature
LM324N	14-DIP	0 ~ + 70 °C
LM324AN		
LM324M	14-SOP	
LM324AM		
LM2902N	14-DIP	-40 ~ + 85 °C
LM2902M	14-SOP	
LM224N	14-DIP	-25 ~ +85 °C.
LM224AN		
LM224M	14-SOP	
LM224AM		

FEATURES

- **Low Noise:** 0.3 μV p-p 0.1 Hz to 10 Hz
- **Low Nonlinearity:** 0.003% ($G = 1$)
- **High CMRR:** 120 dB ($G = 1000$)
- **Low Offset Voltage:** 50 μV
- **Low Offset Voltage Drift:** 0.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- **High Gain Bandwidth Product:** 25 MHz
- **Programmable Gains of 1, 10, 100, 1000**
- **Input Protection, Power On–Power Off**
- **No External Components Required**
- **Internally Compensated**
- **16-L-STD-883B and Chips Available**
- **Lead Ceramic DIP and SOIC Packages and 20-Terminal Leadless Chip Carriers Available**
- **Available in Tape and Reel in Accordance with EIA-481A Standard**
- **Standard Military Drawing Also Available**

PRODUCT DESCRIPTION

The AD524 is a precision monolithic instrumentation amplifier designed for data acquisition applications requiring high accuracy under worst-case operating conditions. An outstanding combination of high linearity, high common mode rejection, low voltage drift and low noise makes the AD524 suitable for many data acquisition systems.

The AD524 has an output offset voltage drift of less than 25 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, offset voltage drift of less than 0.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, CMR above 120 dB at unity gain ($G = 1000$) and maximum nonlinearity of 0.003% at $G = 1$. In addition to the outstanding dc characteristics, the AD524 also has a 25 kHz gain bandwidth product ($G = 1000$). To make it suitable for high speed data acquisition systems the AD524 has an output slew rate of 5 V/ μs and settles in 15 μs to 0.01% for gains of 1 to 100.

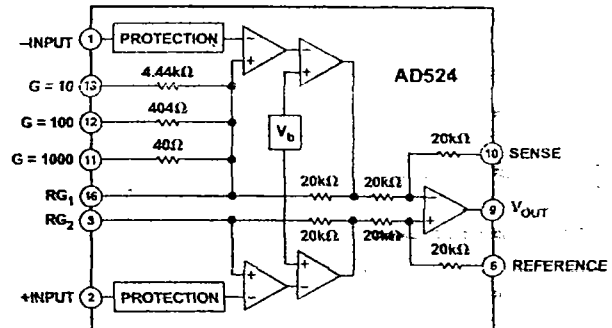
As a complete amplifier the AD524 does not require any external components for fixed gains of 1, 10, 100 and 1000. For gain settings between 1 and 1000 only a single resistor is needed. The AD524 input is fully protected for both power-on and power-off fault conditions.

The AD524 IC instrumentation amplifier is available in four different versions of accuracy and operating temperature range. Economical "A" grade, the low drift "B" grade and lower higher linearity "C" grade are specified from -25°C to $+125^\circ\text{C}$. The "S" grade guarantees performance to specification over the extended temperature range -55°C to $+125^\circ\text{C}$. Devices are available in 16-lead ceramic DIP and SOIC packages and a minimal leadless chip carrier.

NOTES

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, or for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD524 has guaranteed low offset voltage, offset voltage drift and low noise for precision high gain applications.
2. The AD524 is functionally complete with pin programmable gains of 1, 10, 100 and 1000, and single resistor programmable for any gain.
3. Input and output offset nulling terminals are provided for very high precision applications and to minimize offset voltage changes in gain ranging applications.
4. The AD524 is input protected for both power-on and power-off fault conditions.
5. The AD524 offers superior dynamic performance with a gain bandwidth product of 25 MHz, full power response of 75 kHz and a settling time of 15 μs to 0.01% of a 20 V step ($G = 100$).

4—SPECIFICATIONS (@ $V_S = \pm 15\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$ and $T_A = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

	AD524A			AD524B			AD524C			AD524S			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
ation													
al Resistor Gain													
ramming)													
ge (Pin Programmable)													
or)													
)													
00													
000													
ity													
) , 100													
000													
Temperature													
)													
00													
000													
OFFSET (May be Nulled)													
set Voltage			250			100			50			100	μV
emperature			2			0.75			0.5			2.0	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
ffset Voltage			5			3			2.0			3.0	μV
emperature			100			50			25			50	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
ferred to the													
vs. Supply													
: 1	70			75			80			75			dB
: 10	85			95			100			95			dB
: 100	95			105			110			105			dB
: 1000	100			110			115			110			dB
RRENT													
s Current			± 50			± 25			± 15			± 50	nA
emperature		± 100			± 100			± 100			± 100		pA/ $^\circ\text{C}$
set Current			± 35			± 15			± 10			± 35	nA
emperature		± 100			± 100			± 100			± 100		pA/ $^\circ\text{C}$
pedance													
ntial Resistance		10^9			10^9			10^9			10^9		Ω
ntial Capacitance		10			10			10			10		pF
ion-Mode Resistance		10^9			10^9			10^9			10^9		Ω
ion-Mode Capacitance		10			10			10			10		pF
ltage Range													
iffer. Input Linear (V_{DI})	± 10			± 10			± 10			± 10			V
ommon-Mode Linear (V_{CM})	$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			V
-Mode Rejection dc to													
th 1 k Ω Source Imbalance													
0	70			75			80			70			dB
00	90			95			100			90			dB
000	100			105			110			100			dB
000	110			115			120			110			dB
LATING													
= 2 k Ω	± 10			± 10			± 10			± 10			V
RESPONSE													
nal - 3 dB													
0	1			1			1			1			MHz
00	400			400			400			400			kHz
000	150			150			150			150			kHz
000	25			25			25			25			kHz
000	5.0			5.0			5.0			5.0			V/ps
Time to 0.01%, 20 V Step													
to 100	15			15			15			15			μs
000	75			75			75			75			μs
Noise, 1 kHz													
0	7			7			7			7			nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
0	90			90			90			90			nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
0.1 Hz to 10 Hz													
0	15			15			15			15			$\mu\text{V p-p}$
00, 1000	2			2			2			2			$\mu\text{V p-p}$
Noise	0.3			0.3			0.3			0.3			$\mu\text{V p-p}$
to 10 Hz													
000	60			60			60			60			pA p-p

AD524

Model	Min	AD524A Typ	Max	Min	AD524B Typ	Max	Min	AD524C Typ	Max	Min	AD524S Typ	Max	Units
INSE INPUT													
R_{IN}		20			20			20			20		$\pm 20\%$
I_{IN}		15			15			15			15		μA
Voltage Range	± 10			± 10			± 10			± 10			V
Gain to Output		1			1			1			1		%
REFERENCE INPUT													
R_{IN}		40			40			40			40		$\pm 20\%$
I_{IN}		15			15			15			15		μA
Voltage Range	± 10			± 10			10			10			V
Gain to Output		1			1			1			1		%
TEMPERATURE RANGE													
Specified Performance	-25		+85	-25		+85	-25		+85	-55		+125	$^{\circ}C$
Storage	-65		+150	-65		+150	-65		+150	-65		+150	$^{\circ}C$
POWER SUPPLY													
Power Supply Range	± 6	± 15	± 18	± 6	± 15	± 18	± 6	± 15	± 18	± 6	± 15	± 18	V
Quiescent Current		3.5	5.0		3.5	5.0		3.5	5.0		3.5	5.0	mA

NOTES

1. Does not include effects of external resistor R_G .

2. V_{IN} is the maximum differential input voltage at $G = 1$ for specified nonlinearity.

3. V_{IN} at the maximum = 10 V/G.

4. V_{IN} = Actual differential input voltage.

Example: $G = 10$, $V_D = 0.50$.

$V_{IN} = 12 \text{ V} - (10/2 \times 0.50 \text{ V}) = 9.5 \text{ V}$.

5. Specification subject to change without notice.

6. Min and max specifications are guaranteed. Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to correlate outgoing quality levels.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS¹

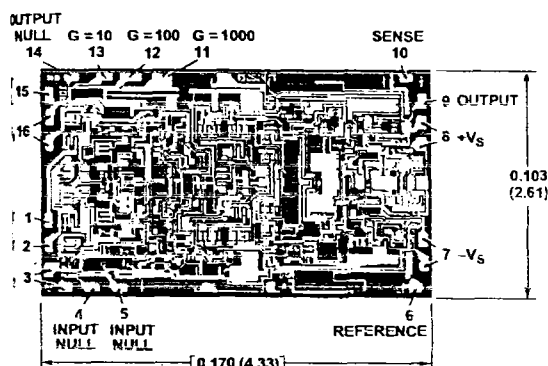
Voltage	±18 V
Power Dissipation	450 mW
Input Voltage ²	
per Input Simultaneously $ V_{IN} + V_S $	<36 V
Short Circuit Duration	Indefinite
Temperature Range	
Operating Temperature	-65°C to +125°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering 60 secs)	+300°C

Conditions above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at any other conditions above those indicated in the operational section of this data sheet is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

A voltage specification refers to maximum voltage to which either input may be raised with or without device power applied. For example, with ±18 V max V_{IN} is ±18 volts, with zero supply voltage max V_{IN} is ±36 volts.

METALIZATION PHOTOGRAPH

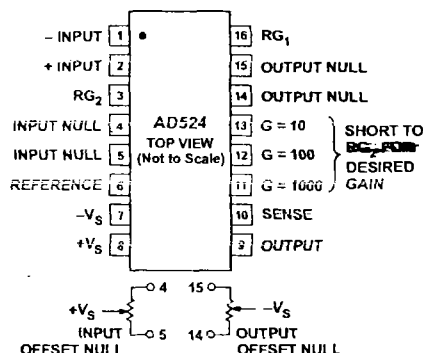
Contact factory for latest dimensions.
Dimensions shown in inches and (mm).



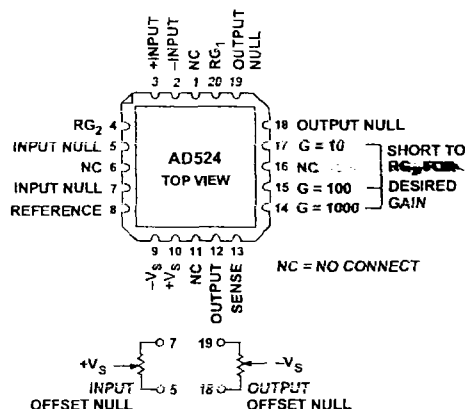
PAD NUMBERS CORRESPOND TO PIN NUMBERS FOR THE D-16 AND R-16 16-PIN CERAMIC PACKAGES.

CONNECTION DIAGRAMS

Ceramic (D) and SOIC (R) Packages



Leadless Chip Carrier



ORDERING GUIDE

	Temperature Ranges	Package Descriptions	Package Options
D	-40°C to +85°C	16-Lead Ceramic DIP	D-16
E	-40°C to +85°C	20-Terminal Leadless Chip Carrier	E-20A
R-16	-40°C to +85°C	16-Lead Gull-Wing SOIC	R-16
R-16-REEL	-40°C to +85°C	Tape & Reel Packaging 13"	
R-16-REEL7	-40°C to +85°C	Tape & Reel Packaging 7"	
D	-40°C to +85°C	16-Lead Ceramic DIP	D-16
E	-40°C to +85°C	20-Terminal Leadless Chip Carrier	E-20A
D	-40°C to +85°C	16-Lead Ceramic DIP	D-16
D	-55°C to +125°C	16-Lead Ceramic DIP	D-16
D/883B	-55°C to +125°C	16-Lead Ceramic DIP	D-16
3901EA*	-55°C to +125°C	16-Lead Ceramic DIP	D-16
E883B	-55°C to +125°C	20-Terminal Leadless Chip Carrier	E-20A
CHIPS	-55°C to +125°C	Die	

*Official DESC drawing for tested specifications.

IN

Electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. The AD524 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur if devices are subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



AD524—Typical Characteristics

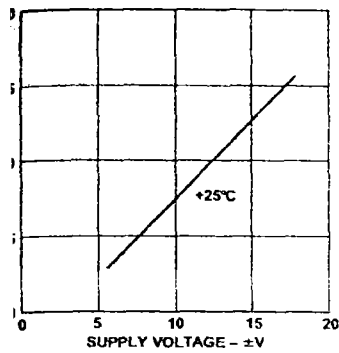


Figure 1. Input Voltage Range vs. Supply Voltage, $G = 1$

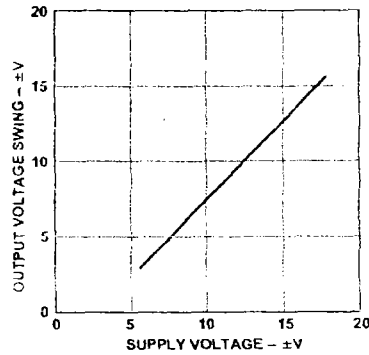


Figure 2. Output Voltage Swing vs. Supply Voltage

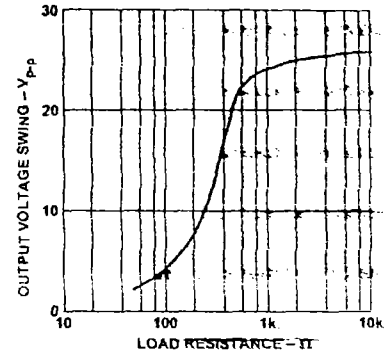


Figure 3. Output Voltage Swing vs. Load Resistance

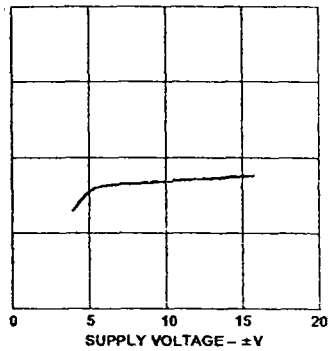


Figure 4. Quiescent Current vs. Supply Voltage

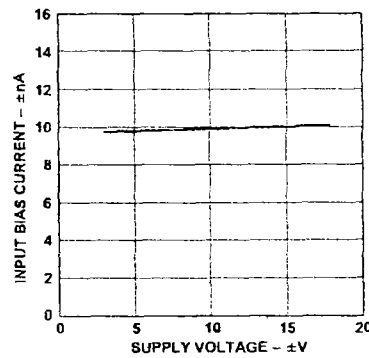


Figure 5. Input Bias Current vs. Supply Voltage

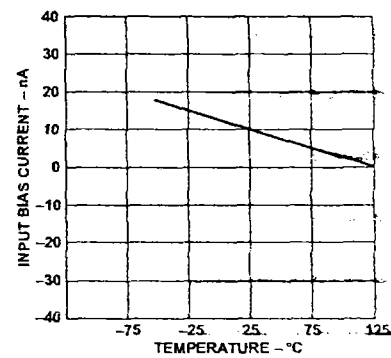


Figure 6. Input Bias Current vs. Temperature

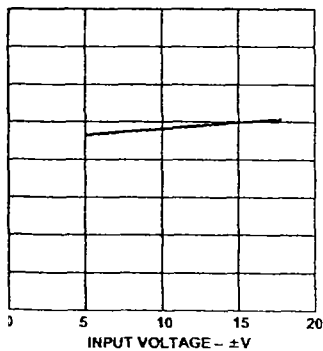


Figure 7. Input Bias Current vs. Input Voltage

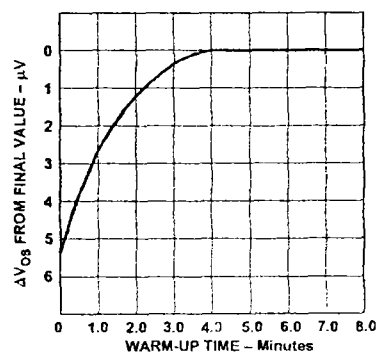


Figure 8. Offset Voltage, RTI, Turn On Drift

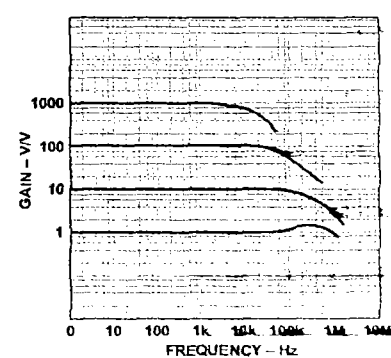


Figure 9. Gain vs. Frequency

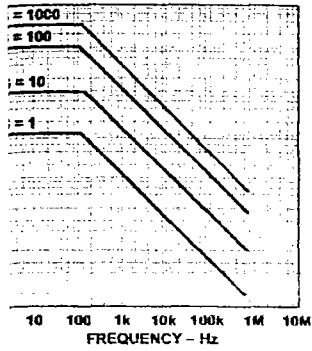


Figure 10. CMRR vs. Frequency RTI, 1k Source Imbalance

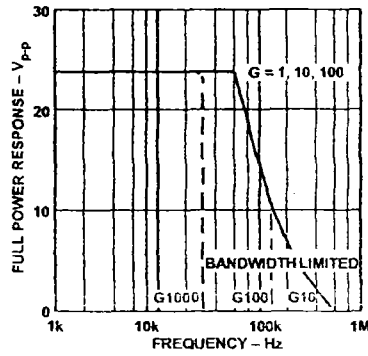


Figure 11. Large Signal Frequency Response

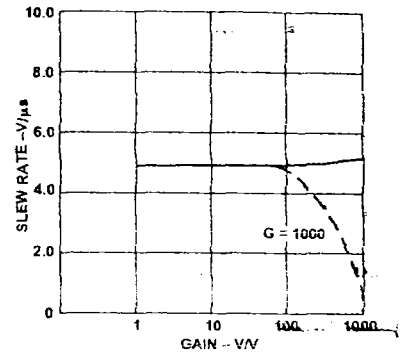


Figure 12. Slew Rate vs. Gain

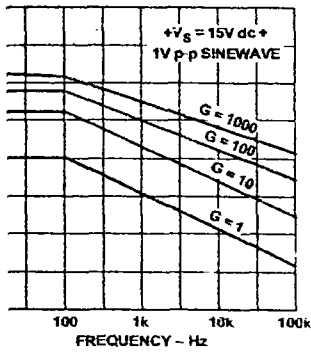


Figure 13. Positive PSRR vs. Frequency

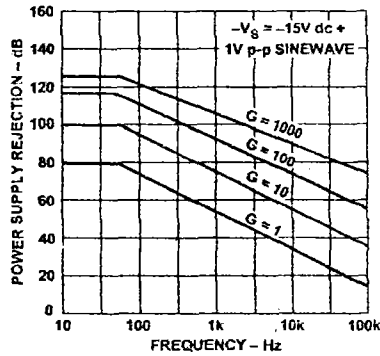


Figure 14. Negative PSRR vs. Frequency

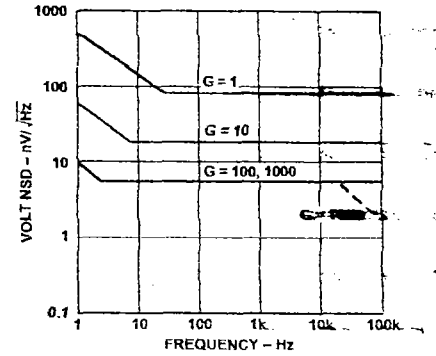


Figure 15. RTI Noise Spectral Density vs. Gain

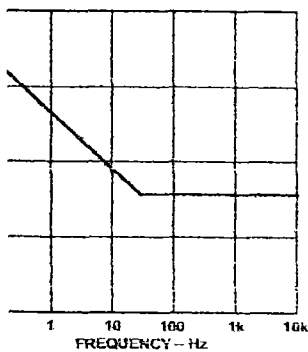


Figure 16. Input Current Noise vs. Frequency

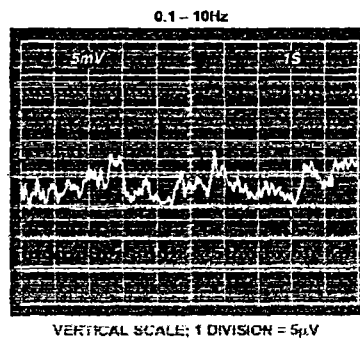


Figure 17. Low Frequency Noise - $G = 1$ (System Gain = 1000)

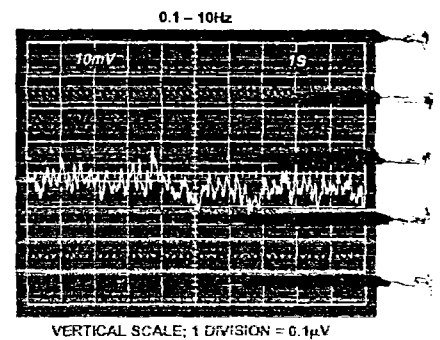


Figure 18. Low Frequency Noise - $G = 1000$ (System Gain = 100,000)

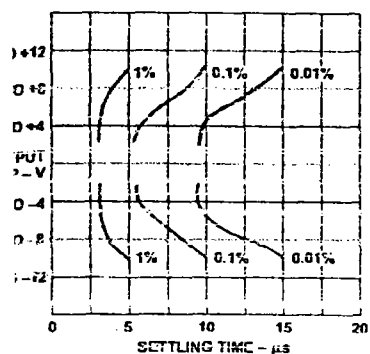


Figure 19. Settling Time Gain = 1

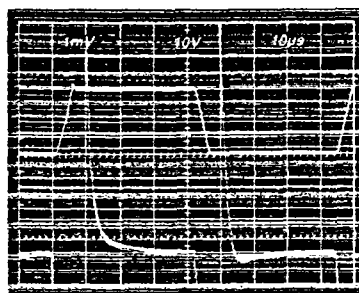
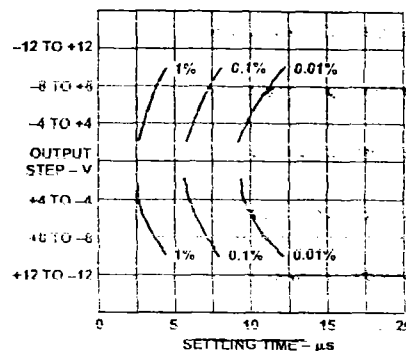

Figure 20. Large Signal Pulse Response and Settling Time - $G = 1$


Figure 21. Settling Time Gain = 10

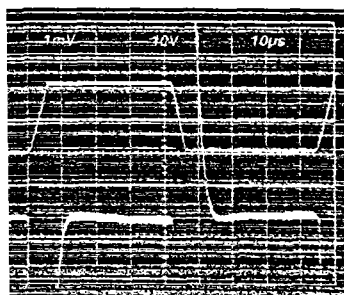
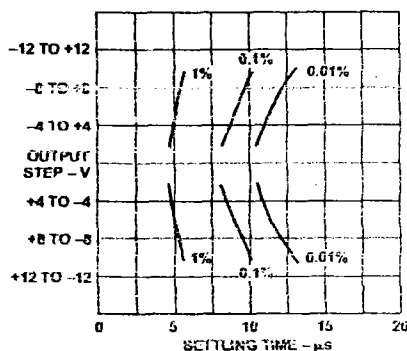

Figure 22. Large Signal Pulse Response and Settling Time $G = 10$


Figure 23. Settling Time Gain = 100

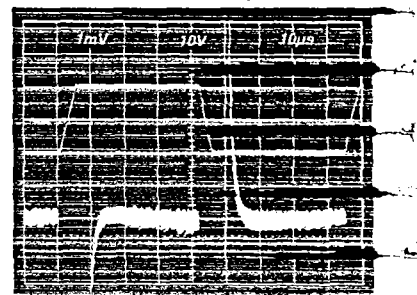
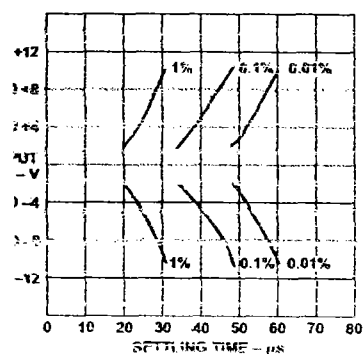
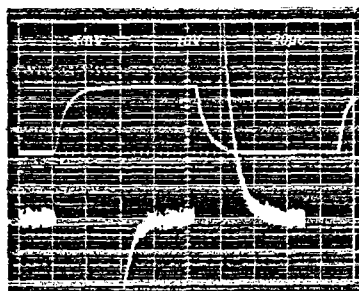

Figure 24. Large Signal Pulse Response and Settling Time $G = 100$


Figure 25. Settling Time Gain = 1000


Figure 26. Large Signal Pulse Response and Settling Time $G = 1000$

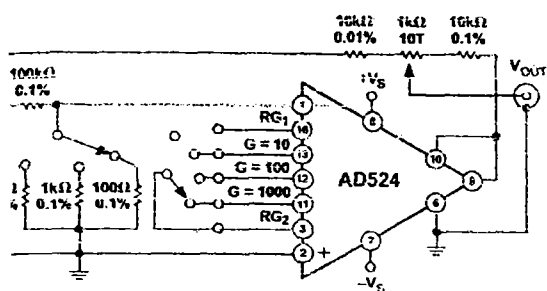


Figure 27. Settling Time Test Circuit

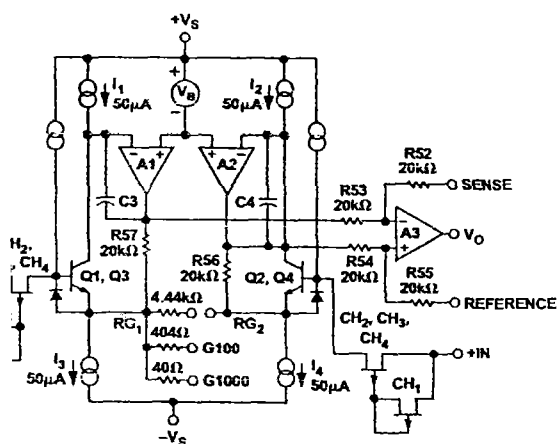


Figure 28. Simplified Circuit of Amplifier; Gain Is Defined as $(57)/(R_G) + 1$. For a Gain of 1, R_G Is an Open Circuit

Mode of Operation

The AD524 is a monolithic instrumentation amplifier based on a three op amp circuit. The advantage of monolithic construction is the closely matched components that enhance the accuracy of the input preamp. The preamp section develops a high initial gain by the use of feedback concepts. The final gain is developed by varying the value of R_G (smaller values increase the gain) while the feedback forces the collector currents of Q1, Q2, Q3 and Q4 to be constant, which impresses the voltage across R_G .

As R_G is reduced to increase the programmed gain, the transconductance of the input preamp increases to the transconductance of the input transistors. This has three important advantages. First, this approach allows the circuit to achieve a very high open loop gain of 3×10^6 at a programmed gain of 1000, thus reducing gain-related errors to a negligible 30 ppm. Second, the gain bandwidth product, which is determined by C3 or C4 and the input transconductance, reaches 25 MHz. Third, the input voltage noise reduces to a value determined by the collector current of the input transistors for an RTI noise of 7 nV/√Hz at $G = 1000$.

INPUT PROTECTION

As interface amplifiers for data acquisition systems, instrumentation amplifiers are often subjected to input overloads, i.e., voltage levels in excess of the full scale for the selected gain range. At low gains, 10 or less, the gain resistor acts as a current limiting element in series with the inputs. At high gains the lower value of R_G will not adequately protect the inputs from excessive currents. Standard practice would be to place series limiting resistors in each input, but to limit input current to below 5 mA with a full differential overload (36 V) would require over 7k of resistance which would add 10 nV/√Hz of noise. To provide both input protection and low noise a special series protect FET was used.

A unique FET design was used to provide a bidirectional current limit, thereby, protecting against both positive and negative overloads. Under nonoverload conditions, three channels CH₂, CH₃, CH₄, act as a resistance (1 kΩ) in series with the input as before. During an overload in the positive direction, a fourth channel, CH₁, acts as a small resistance (3 kΩ) in series with the gate, which draws only the leakage current, and the FET limits I_{DSS} . When the FET enhances under a negative overload, the gate current must go through the small FET formed by CH₁ and when this FET goes into saturation, the gate current is limited and the main FET will go into controlled enhancement. The bidirectional limiting holds the maximum input current to 3 mA over the 36 V range.

INPUT OFFSET AND OUTPUT OFFSET

Voltage offset specifications are often considered a figure of merit for instrumentation amplifiers. While initial offset may be adjusted to zero, shifts in offset voltage due to temperature variations will cause errors. Intelligent systems can often correct for this factor with an autozero cycle, but there are many small-signal high-gain applications that don't have this capability.

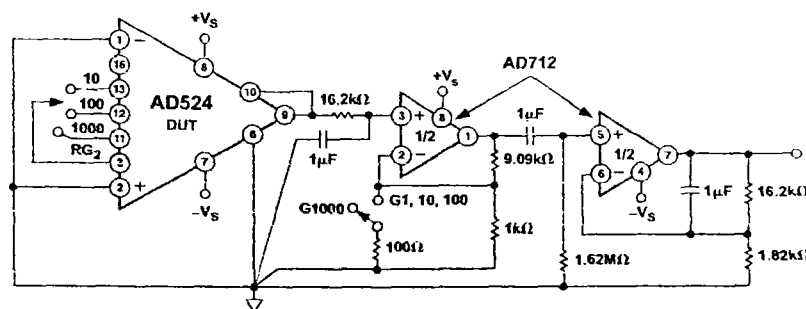


Figure 29. Noise Test Circuit

Voltage offset and drift comprise two components each; input offset and output offset and offset drift. Input offset is that component of offset that is directly proportional to gain i.e., input offset as measured at the output at $G = 100$ is 100 times greater than at $G = 1$. Output offset is independent of gain. At low gains, output offset drift is dominant, while at high gains input offset drift dominates. Therefore, the output offset voltage drift is normally specified as drift at $G = 1$ (where input effects are insignificant), while input offset voltage drift is given by drift specification at a high gain (where output offset effects are negligible). All input-related numbers are referred to the input (RTI) which is to say that the effect on the output is "G" times larger. Voltage offset power supply is also specified at one or more gain settings and is also RTI.

By separating these errors, one can evaluate the total error independent of the gain setting used. In a given gain configuration both errors can be combined to give a total error referred to the input (R.T.I.) or output (R.T.O.) by the following formula:

Total Error R.T.I. = input error + (output error/gain)

Total Error R.T.O. = (Gain $\times$ input error) + output error

As an illustration, a typical AD524 might have a $+250 \mu\text{V}$ output offset and a $-50 \mu\text{V}$ input offset. In a unity gain configuration, the total output offset would be $200 \mu\text{V}$ or the sum of the two. At a gain of 100, the output offset would be -4.75 mV or: $250 \mu\text{V} + 100(-50 \mu\text{V}) = -4.75 \text{ mV}$.

The AD524 provides for both input and output offset adjustment. This simplifies very high precision applications and minimizes offset voltage changes in switched gain applications. In such applications the input offset is adjusted first at the highest programmed gain, then the output offset is adjusted at $G = 1$.

AIN

The AD524 has internal high accuracy pretrimmed resistors for programmable gain of 1, 10, 100 and 1000. One of the preset gains can be selected by pin strapping the appropriate gain terminal and R_{G2} together (for $G = 1$ R_{G2} is not connected).

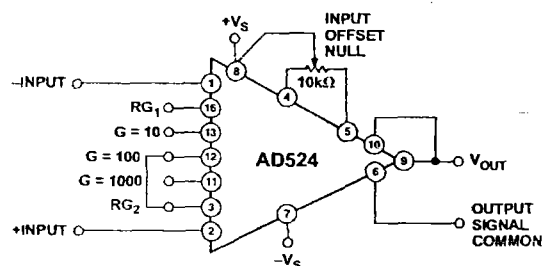


Figure 30. Operating Connections for $G = 100$

The AD524 can be configured for gains other than those that are internally preset; there are two methods to do this. The first method uses just an external resistor connected between pins 3 and 16, which programs the gain according to the formula

$$R_G \approx \frac{40k}{G - 1}$$

(See Figure 31).

For best results R_G should be a precision resistor with a low temperature coefficient. An external R_G affects both gain accuracy and gain drift due to the mismatch between it and the internal thin-film resistors. Gain accuracy is determined by the tolerance of the external R_G and the absolute accuracy of the internal resistors ($\pm 20\%$). Gain drift is determined by the mismatch of the temperature coefficient of R_G and the temperature coefficient of the internal resistors ($\sim 50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ typ).

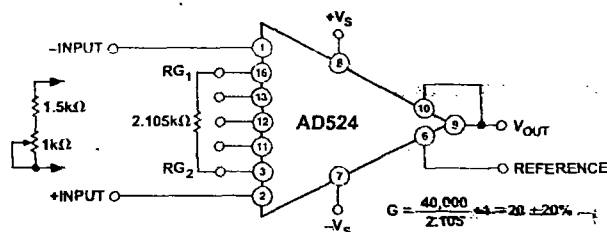


Figure 31. Operating Connections for $G = 20$

The second technique uses the internal resistors in parallel with an external resistor (Figure 32). This technique increases the gain adjustment range and reduces the effects of temperature coefficient sensitivity.

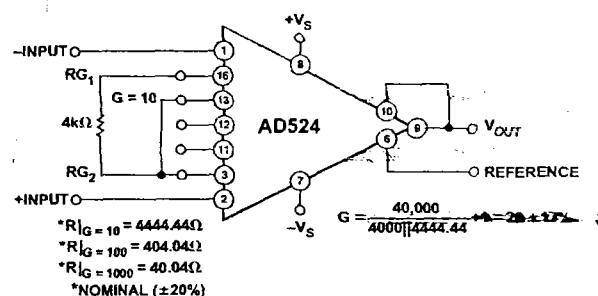


Figure 32. Operating Connections for $G = 20$, Low Gain T.C. Technique

The AD524 may also be configured to provide gain in the output stage. Figure 33 shows an H pad attenuator connected to the reference and sense lines of the AD524. R_1 , R_2 and R_3 should be made as low as possible to minimize the gain variation and reduction of CMRR. Varying R_2 will precisely set the gain without affecting CMRR. CMRR is determined by the match of R_1 and R_3 .

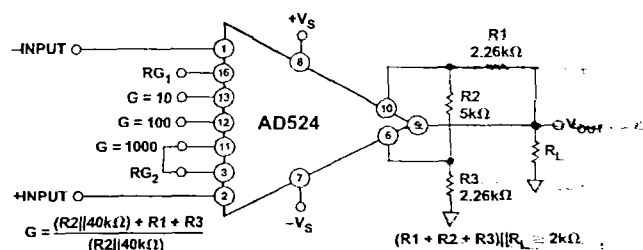


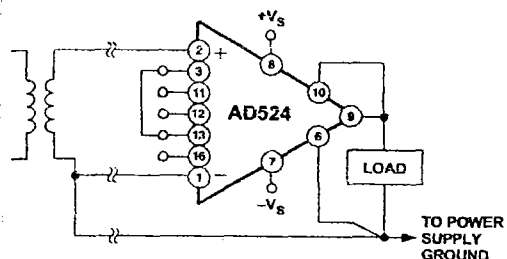
Figure 33. Gain of 2000

Table I. Output Gain Resistor Values

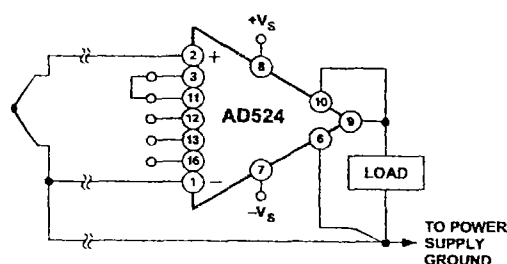
Output Gain	R2	R1, R3	Nominal Gain
2	5 k Ω	2.26 k Ω	2.02
5	1.05 k Ω	2.05 k Ω	5.01
10	1 k Ω	4.42 k Ω	10.1

BIAS CURRENTS

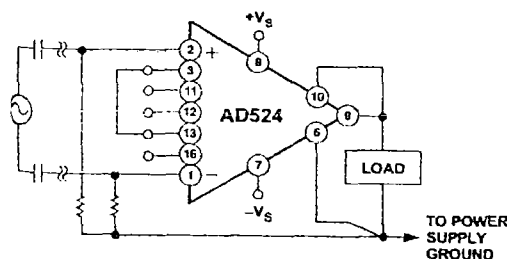
BIAS CURRENTS are those currents necessary to bias the input stages of a dc amplifier. Bias currents are an additional source of input error and must be considered in a total error budget. The bias currents, when multiplied by the source resistance, appear as an offset voltage. What is of concern in calculating current errors is the change in bias current with respect to voltage and temperature. Input offset current is the difference between the two input bias currents. The effect of offset current is an input offset voltage whose magnitude is the offset current times the source impedance imbalance.



a. Transformer Coupled



b. Thermocouple



c. AC Coupled

Figure 34. Indirect Ground Returns for Bias Currents

Although instrumentation amplifiers have differential inputs, there must be a return path for the bias currents. If this is not provided, those currents will charge stray capacitances, causing the output to drift uncontrollably or to saturate. Therefore, when amplifying "floating" input sources such as transformers and thermocouples, as well as ac-coupled sources, there must still be a dc path from each input to ground.

COMMON-MODE REJECTION

Common-mode rejection is a measure of the change in output voltage when both inputs are changed equal amounts. These specifications are usually given for a full-range input voltage change and a specified source imbalance. "Common-Mode Rejection Ratio" (CMRR) is a ratio expression while "Common-Mode Rejection" (CMR) is the logarithm of that ratio. For example, a CMRR of 10,000 corresponds to a CMR of 80 dB.

In an instrumentation amplifier, ac common-mode rejection is only as good as the differential phase shift. Degradation of ac common-mode rejection is caused by unequal drops across differing track resistances and a differential phase shift due to varied stray capacitances or cable capacitances. In many applications shielded cables are used to minimize noise. This technique can create common mode rejection errors unless the shield is properly driven. Figures 35 and 36 show active data guards that are configured to improve ac common-mode rejection by "bootstrapping" the capacitances of the input cabling, thus minimizing differential phase shift.

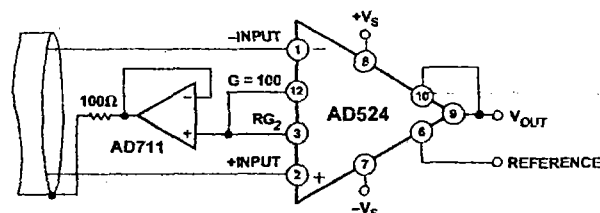
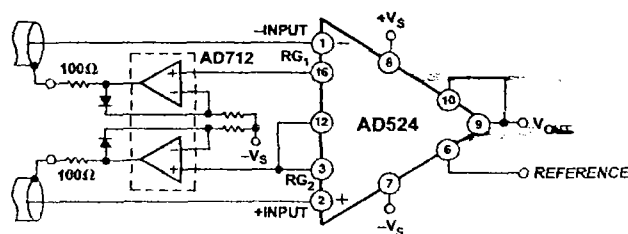
Figure 35. Shield Driver, $G = 100$ 

Figure 36. Differential Shield Driver

GROUNDING

Many data acquisition components have two or more ground pins that are not connected together within the device. These grounds must be tied together at one point, usually at the system power-supply ground. Ideally, a single solid ground would be desirable. However, since current flows through the ground wires and etch stripes of the circuit cards, and since these paths have resistance and inductance, hundreds of millivolts can be generated between the system ground point and the data.

acquisition components. Separate ground returns should be provided to minimize the current flow in the path from the sense points to the system ground point. In this way supply currents and logic-gate return currents are not summed into the same return path as analog signals where they would cause measurement errors.

Since the output voltage is developed with respect to the potential on the reference terminal, an instrumentation amplifier can have many grounding problems.

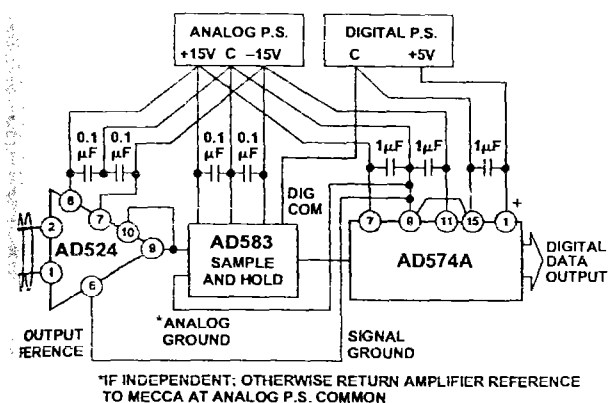


Figure 37. Basic Grounding Practice

REFERENCE TERMINAL

The sense terminal is the feedback point for the instrumentation amplifier's output amplifier. Normally it is connected to the instrumentation amplifier output. If heavy load currents are to be drawn through long leads, voltage drops due to current flowing through high lead resistance can cause errors. The sense terminal can be wired to the instrumentation amplifier at the load, thus putting the voltage drops "inside the loop" and virtually eliminating this error source.

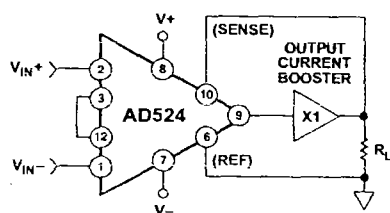


Figure 38. AD524 Instrumentation Amplifier with Output Current Booster

Typically, IC instrumentation amplifiers are rated for a full ± 10 V output swing into $2\text{ k}\Omega$. In some applications, however, the need exists to drive more current into heavier loads. Figure 38 shows how a high-current booster may be connected "inside the loop" of an instrumentation amplifier to provide the required current boost without significantly degrading overall performance. Nonlinearities, offset and gain inaccuracies of the buffer are minimized by the loop gain of the IA output amplifier. Offset drift of the buffer is similarly reduced.

REFERENCE TERMINAL

The reference terminal may be used to offset the output by up to ± 10 V. This is useful when the load is "floating" or does not share a ground with the rest of the system. It also provides a direct means of injecting a precise offset. It must be remembered that the total output swing is ± 10 volts to be shared between signal and reference offset.

When the IA is of the three-amplifier configuration it is necessary that nearly zero impedance be presented to the reference terminal.

Any significant resistance from the reference terminal to ground increases the gain of the noninverting signal path, thereby upsetting the common-mode rejection of the IA.

In the AD524 a reference source resistance will unbalance the CMR trim by the ratio of $20\text{ k}\Omega / R_{\text{REF}}$. For example, if the reference source impedance is $1\text{ k}\Omega$, CMR will be reduced to 86 dB ($20\text{ k}\Omega / 1\text{ k}\Omega = 86\text{ dB}$). An operational amplifier may be used to provide that low impedance reference point as shown in Figure 39. The input offset voltage characteristics of that amplifier will add directly to the output offset voltage performance of the instrumentation amplifier.

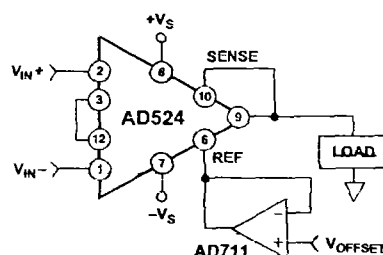


Figure 39. Use of Reference Terminal to Provide Output Offset

An instrumentation amplifier can be turned into a voltage-to-current converter by taking advantage of the sense and reference terminals as shown in Figure 40.

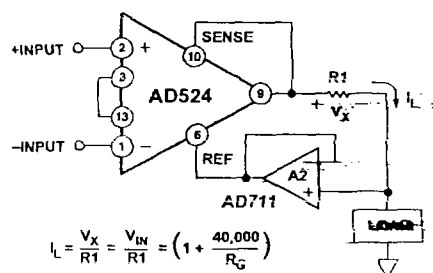


Figure 40. Voltage-to-Current Converter

By establishing a reference at the "low" side of a current setting resistor, an output current may be defined as a function of input voltage, gain and the value of that resistor. Since only a small current is demanded at the input of the buffer amplifier A_2 , the forced current I_L will largely flow through the load. Offset and drift specifications of A_2 must be added to the output offset and drift specifications of the IA.

$$I_L = \frac{V_X}{R_1} = \frac{V_{IN}}{R_1} \left(1 + \frac{40,000}{R_G} \right)$$

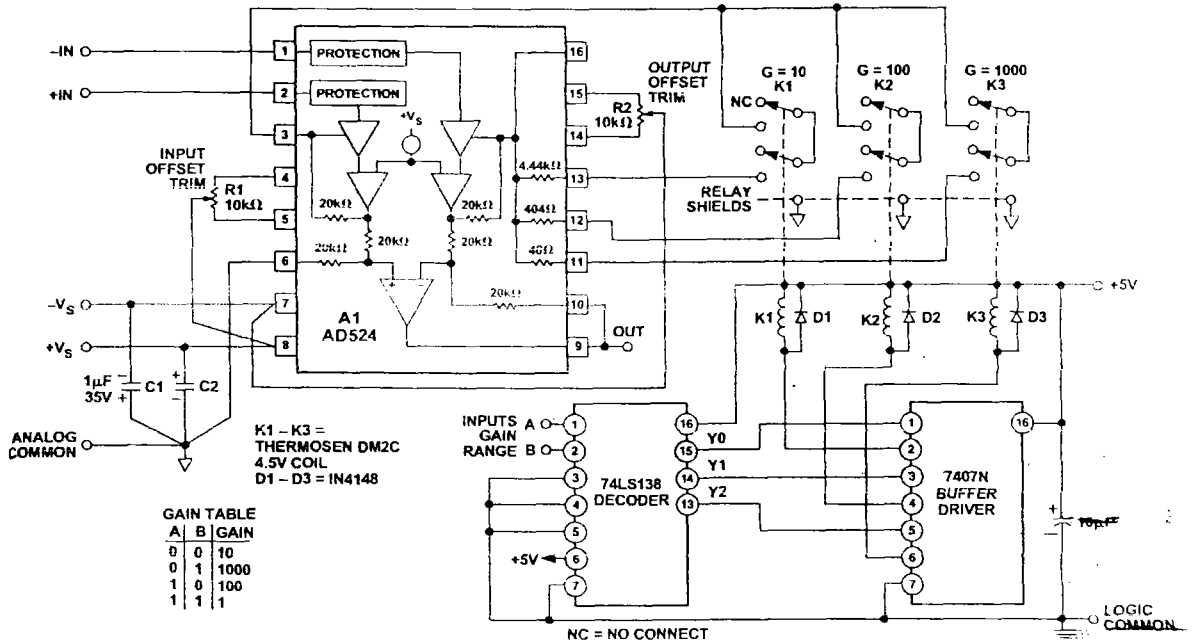


Figure 41. Three Decade Gain Programmable Amplifier

RAMMABLE GAIN

41 shows the AD524 being used as a software program-gain amplifier. Gain switching can be accomplished with ical switches such as DIP switches or reed relays. It be noted that the "on" resistance of the switch in series e internal gain resistor becomes part of the gain equation l have an effect on gain accuracy.

524 can also be connected for gain in the output stage. 42 shows an AD711 used as an active attenuator in the amplifier's feedback loop. The active attenuation pre-very low impedance to the feedback resistors, therefore zing the common-mode rejection ratio degradation.

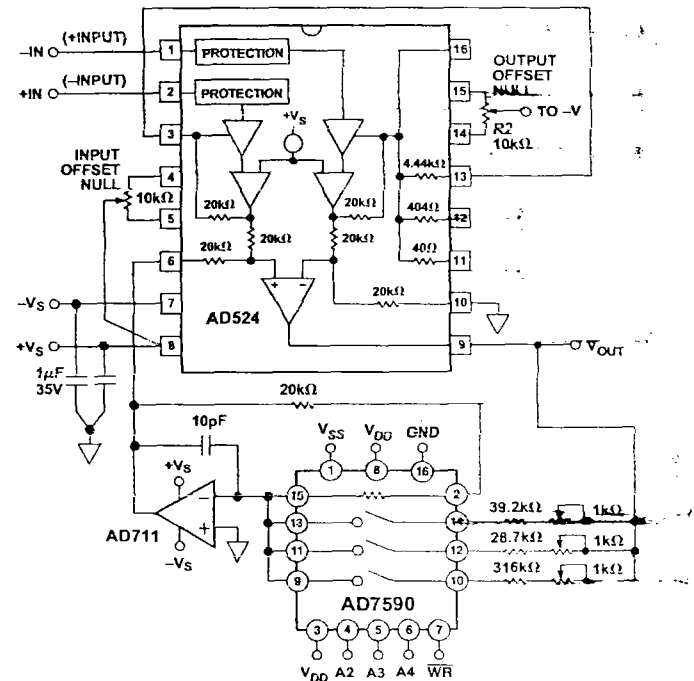


Figure 42. Programmable Output Gain

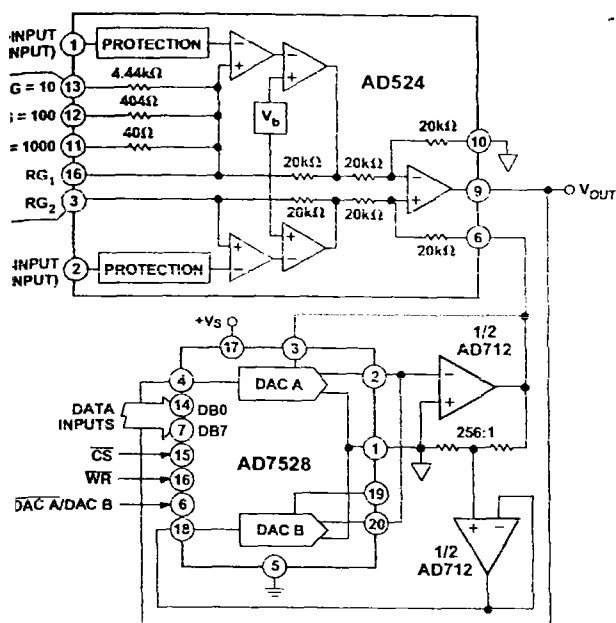


Figure 43. Programmable Output Gain Using a DAC

Another method for developing the switching scheme is to use a DAC. The AD7528 dual DAC, which acts essentially as a pair of switched resistive attenuators having high analog linearity and symmetrical bipolar transmission, is ideal in this application. The multiplying DAC's advantage is that it can handle inputs of either polarity or zero without affecting the programmed gain. The circuit shown uses an AD7528 to set the gain (DAC A) and perform a fine adjustment (DAC B).

TOZERO CIRCUITS

In many applications it is necessary to provide very accurate offsets in high gain configurations. At room temperature the offsets can be nulled by the use of offset trim pots. Over the operating temperature range, however, offset nulling becomes a problem. The circuit of Figure 44 shows a CMOS DAC operating in the bipolar mode and connected to the reference terminal to provide software controllable offset adjustments.

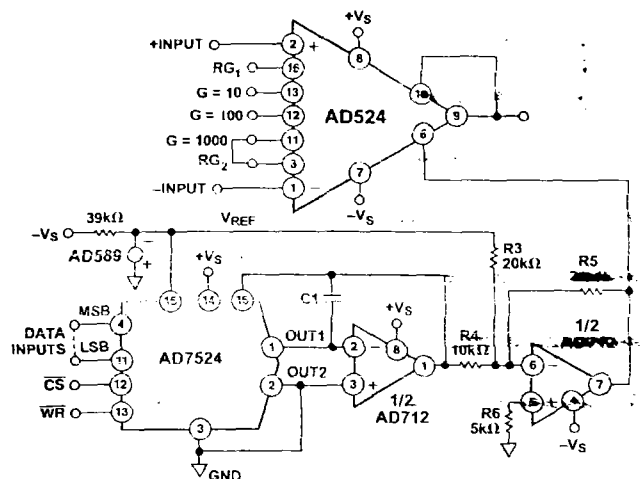


Figure 44. Software Controllable Offset

In many applications complex software algorithms for autozero applications are not available. For those applications Figure 45 provides a hardware solution.

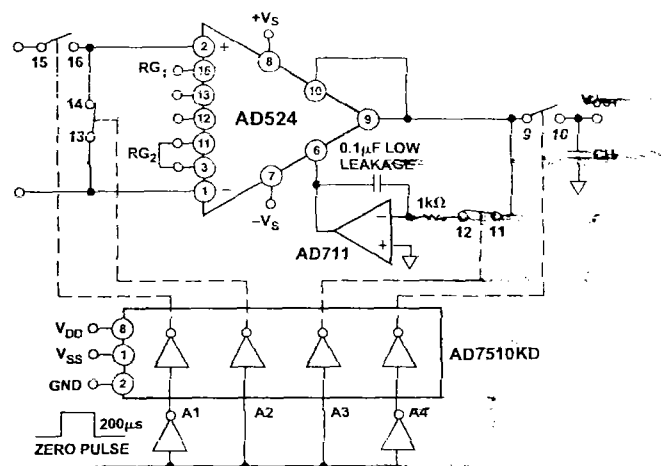


Figure 45. Autozero Circuit

ERROR BUDGET ANALYSIS

Illustrate how instrumentation amplifier specifications are used, we will now examine a typical case where an AD524 is used to amplify the output of an unbalanced transducer. Figure 46 shows a differential transducer, unbalanced by 100 μ , producing a 0 to 20 mV signal to an AD524C. The output of the AD524C is a 14-bit A-to-D converter with a 0 to 2 volt input voltage. The operating temperature range is -25°C to $+85^{\circ}\text{C}$. Therefore, the largest change in temperature ΔT within the operating range is from ambient to $+85^{\circ}\text{C}$ ($85^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 60^{\circ}\text{C}$).

In many applications, differential linearity and resolution are of prime importance. This would be so in cases where the absolute value of a variable is less important than changes in value. In these applications, only the irreducible errors (45 ppm = 0.004%) are significant. Furthermore, if a system has an intelligent processor monitoring the A-to-D output, the addition of an auto-gain/autozero cycle will remove all reducible errors and may eliminate the requirement for initial calibration. This will also reduce errors to 0.004%.

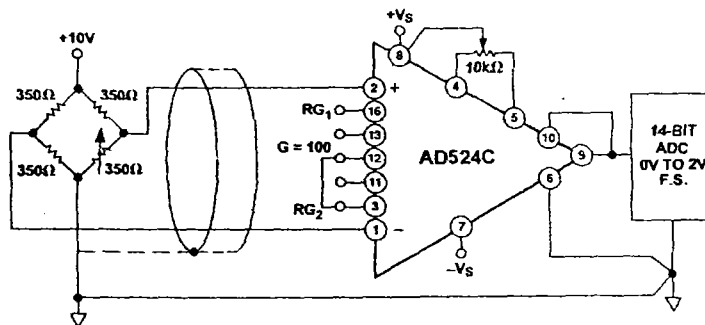


Figure 46. Typical Bridge Application

Table II. Error Budget Analysis of AD524CD in Bridge Application

Source	AD524C Specifications	Calculation	Effect on Absolute Accuracy at $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	Effect on Absolute Accuracy at $T_A = +85^{\circ}\text{C}$	Effect on Resolution
Error	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.25\% = 2500 \text{ ppm}$	2500 ppm	2500 ppm	—
stability	25 ppm	$(25 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C})(60^{\circ}\text{C}) = 1500 \text{ ppm}$	—	1500 ppm	—
nonlinearity	$\pm 0.003\%$	$\pm 0.003\% = 30 \text{ ppm}$	—	—	30 ppm
Offset Voltage	$\pm 50 \mu\text{V}$, RTI	$\pm 50 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = \pm 2500 \text{ ppm}$	2500 ppm	2500 ppm	—
Offset Voltage Drift	$\pm 0.5 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	$(\pm 0.5 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C})(60^{\circ}\text{C}) = 30 \mu\text{V}$ $30 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 1500 \text{ ppm}$	—	1500 ppm	—
Offset Voltage*	$\pm 2.0 \text{ mV}$	$\pm 2.0 \text{ mV}/20 \text{ mV} = 1000 \text{ ppm}$	1000 ppm	1000 ppm	—
Offset Voltage Drift*	$\pm 25 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	$(\pm 25 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C})(60^{\circ}\text{C}) = 1500 \mu\text{V}$ $1500 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 750 \text{ ppm}$	—	750 ppm	—
Current-Source	$\pm 15 \text{ nA}$	$(\pm 15 \text{ nA})(100 \mu) = 1.5 \mu\text{V}$ $1.5 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 75 \text{ ppm}$	75 ppm	75 ppm	—
Current-Source	$\pm 100 \text{ pA}/^{\circ}\text{C}$	$(\pm 100 \text{ pA}/^{\circ}\text{C})(100 \mu)(60^{\circ}\text{C}) = 0.6 \mu\text{V}$ $0.6 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 30 \text{ ppm}$	—	30 ppm	—
Current-Source	$\pm 10 \text{ nA}$	$(\pm 10 \text{ nA})(100 \mu) = 1 \mu\text{V}$ $1 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 50 \text{ ppm}$	50 ppm	50 ppm	—
Current-Source	$\pm 100 \text{ pA}/^{\circ}\text{C}$	$(100 \text{ pA}/^{\circ}\text{C})(100 \mu)(60^{\circ}\text{C}) = 0.6 \mu\text{V}$ $0.6 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 30 \text{ ppm}$	—	30 ppm	—
Current-Source	$\pm 10 \text{ nA}$	$(10 \text{ nA})(175 \mu) = 3.5 \mu\text{V}$ $3.5 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 87.5 \text{ ppm}$	87.5 ppm	87.5 ppm	—
Current-Source	$\pm 100 \text{ pA}/^{\circ}\text{C}$	$(100 \text{ pA}/^{\circ}\text{C})(175 \mu)(60^{\circ}\text{C}) = 1 \mu\text{V}$ $1 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 50 \text{ ppm}$	—	50 ppm	—
Common Mode Rejection	115 dB	$115 \text{ dB} = 1.8 \text{ ppm} \times 5 \text{ V} = 8.8 \mu\text{V}$ $8.8 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 444 \text{ ppm}$	444 ppm	444 ppm	—
TI	($\sim 10 \text{ Hz}$)	$0.3 \mu\text{V p-p}/20 \text{ mV} = 15 \text{ ppm}$	—	—	15 ppm
Total Error			6656.5 ppm	10516.5 ppm	45 ppm

*Offset voltage and output offset voltage drift are given as RTI figures.

ure 47 shows a simple application, in which the variation of cold-junction voltage of a Type J thermocouple-iron(+)-stantan-is compensated for by a voltage developed in series he temperature-sensitive output current of an AD590 semi-uctor temperature sensor.

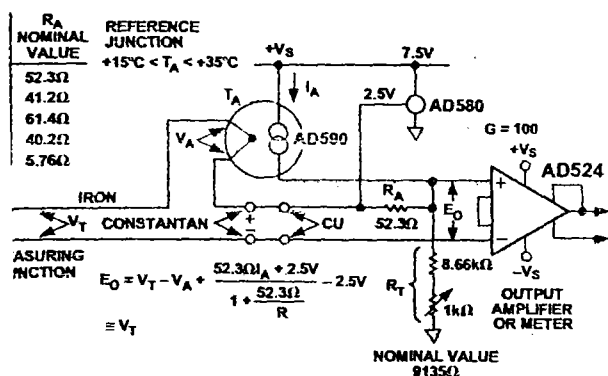


Figure 47. Cold-Junction Compensation

circuit is calibrated by adjusting R_T for proper output voltage the measuring junction at a known reference temperature

and the circuit near 25°C. If resistors with low tempcos are used, compensation accuracy will be to within ±0.5°C, for temperatures between +15°C and +35°C. Other thermocouple types may be accommodated with the standard resistance values shown in the table. For other ranges of ambient temperature, the equation in the figure may be solved for the optimum values of R_T and R_A .

The microprocessor controlled data acquisition system shown in Figure 48 includes both autozero and autogain capability. By dedicating two of the differential inputs, one to ground and one to the A/D reference, the proper program calibration cycles can eliminate both initial accuracy errors and accuracy errors over temperature. The autozero cycle, in this application, converts a number that appears to be ground and then writes that same number (8-bit) to the AD7524, which eliminates the zero error since its output has an inverted scale. The autogain cycle converts the A/D reference and compares it with full scale. A multiplicative correction factor is then computed and applied to subsequent readings.

For a comprehensive study of instrumentation amplifier design and applications, refer to the *Instrumentation Amplifier Application Guide*, available free from Analog Devices.

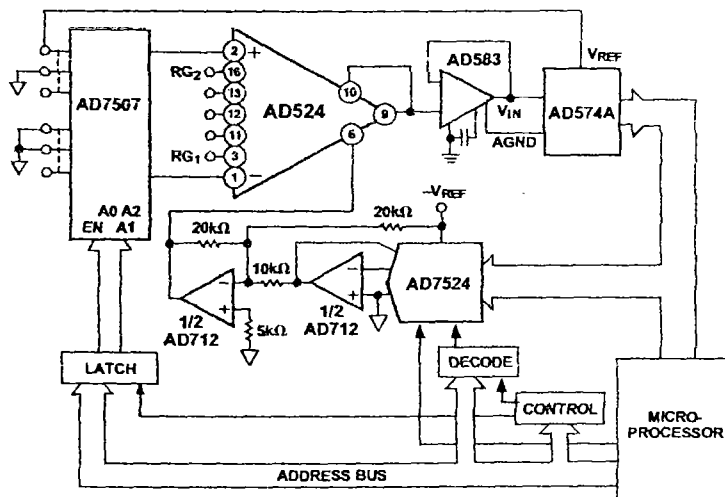


Figure 48. Microprocessor Controlled Data Acquisition System

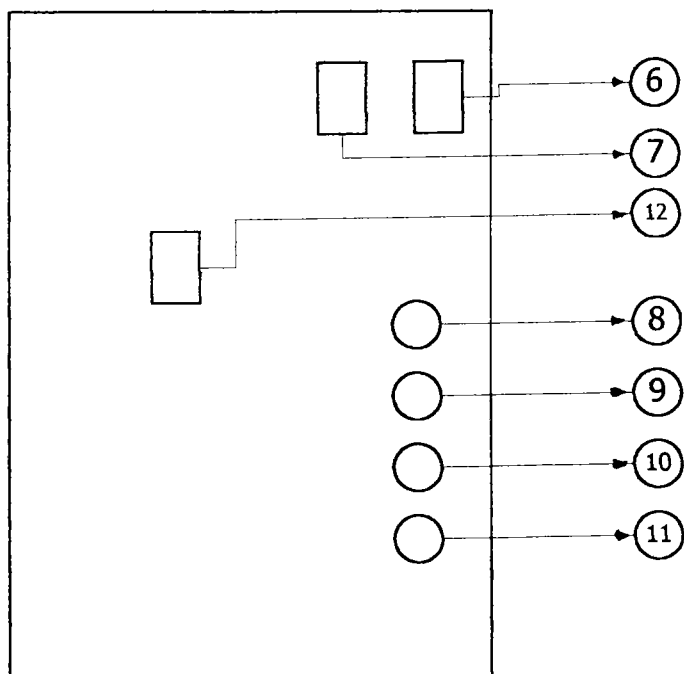
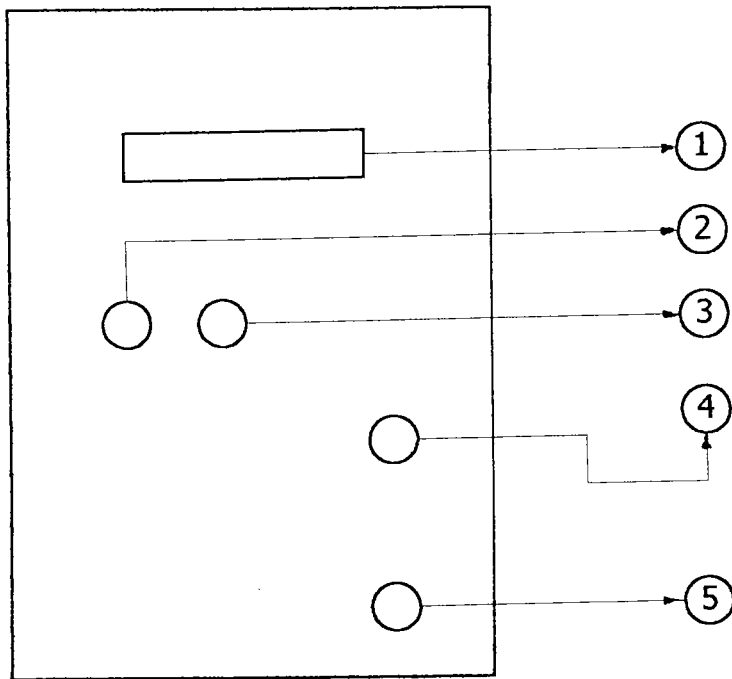
ภาคผนวก ง

คู่มือการใช้และภาพประกอบเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของ
เครื่องใช้ไฟฟ้า

คู่มือการใช้เครื่องวัดความเป็นฉนวนของเครื่องมือใช้ไฟฟ้า

เป็นเครื่องวัดความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าเพื่อตรวจว่าเครื่องใช้ไฟฟ้ายังอยู่ในสภาพที่ปลอดภัยหรือไม่ โดยผู้ใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าไม่ต้องหาตระเวนเกี่ยวกับการสัมผัสเครื่องใช้ไฟฟ้าและจะถูกไฟฟ้าดูดทำให้เกิดอันตราย

ส่วนประกอบ



- 1) จอแสดงผลเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษ
- 2) ปุ่ม Mode เลื่อนสถานะการใช้งาน
- 3) ปุ่ม Select เลือกสถานะการใช้งาน
- 4) ปุ่ม Test ทดสอบ
- 5) ปุ่ม Power กำลังไฟฟ้า
- 6) ขั้วสายไฟ AC 220 V 50 Hz
- 7) ตัวต่อสายไฟออก 220 V 50 Hz
- 8) ฟิวส์ ทางด้านแรงดันต่ำ
- 9) ขั้วทดสอบแรงดันสูง 1500 V
- 10) ขั้วทดสอบแรงดันสูง 1500 V
- 11) ฟิวส์ ทางด้านแรงดันสูง
- 12) ขั้วต่อทดสอบแรงดันสูง

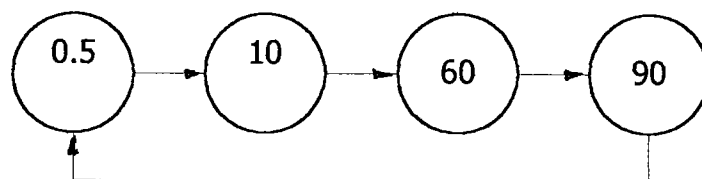
การใช้งาน

- 1) เมื่อปล่อยแรงดัน 220 V 50Hz เข้าที่สายตำแหน่ง 6 เสียบปลั๊ก และต่อสายทดสอบดังรูป
- 2) เปิดปุ่ม Power ON
- 3) จอภาพจะแสดง ISULATER TESTING VERSION

T = 05 S. I ma

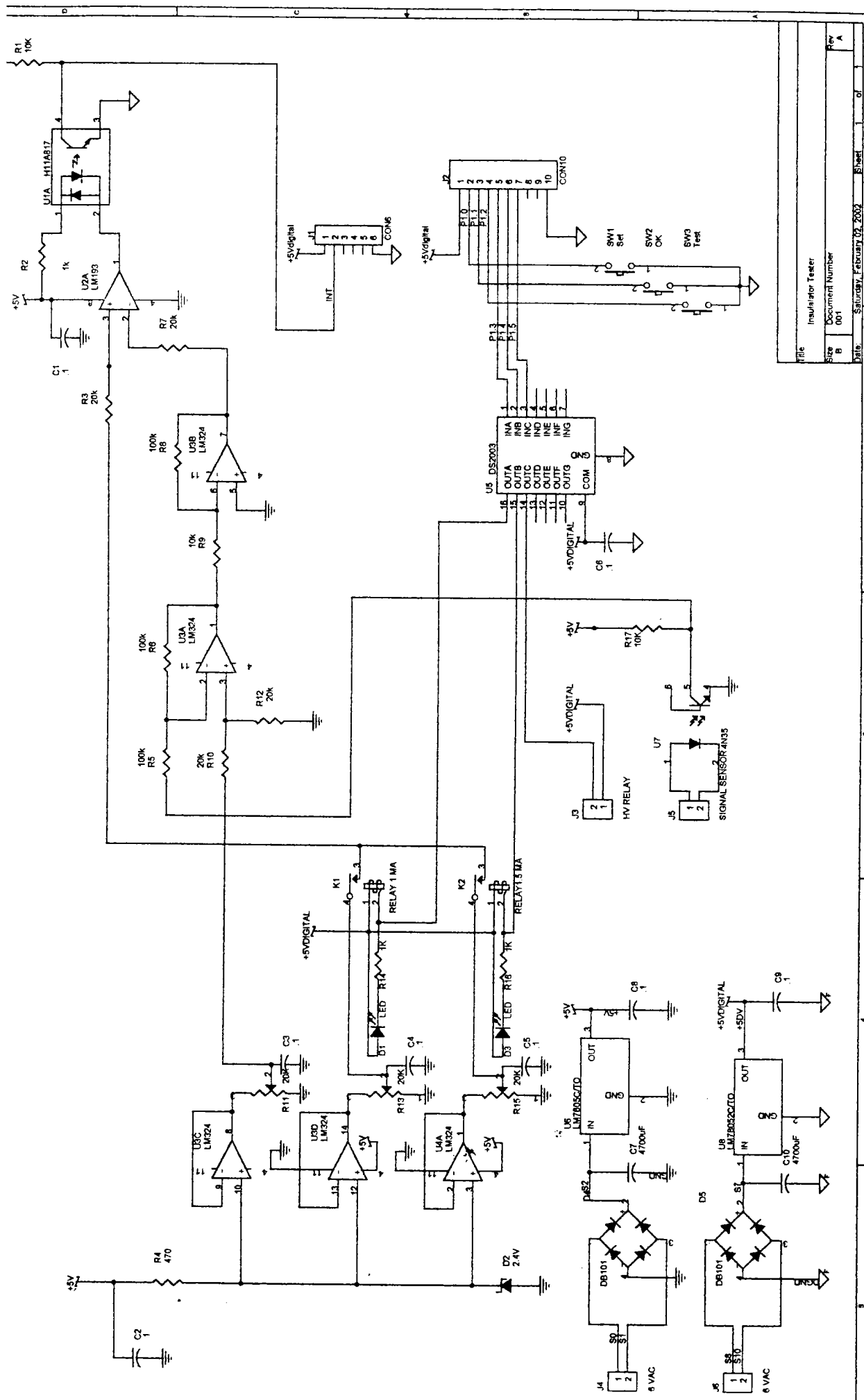
[SET UP]

เรากดปุ่ม Mode 2 สัญญาณจะกระพริบที่ T จะเลื่อนเป็นวงรอบ (Cycle) ดังนี้ 05,10,60,90

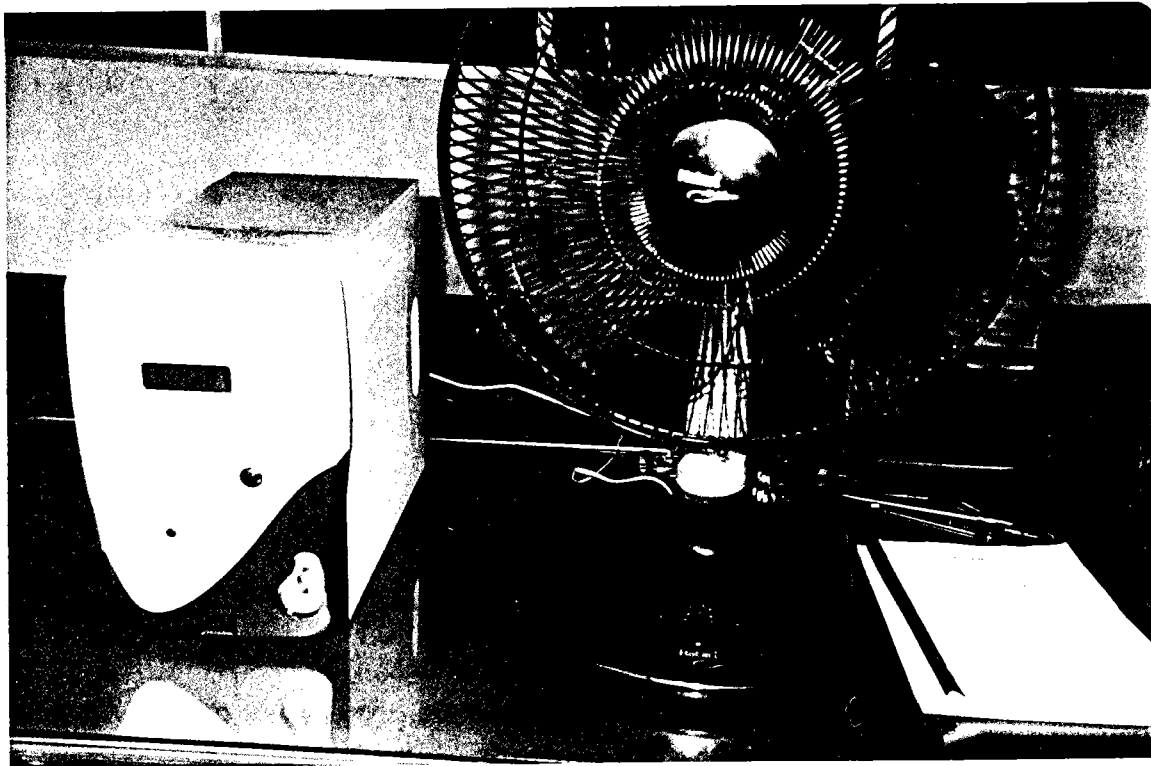
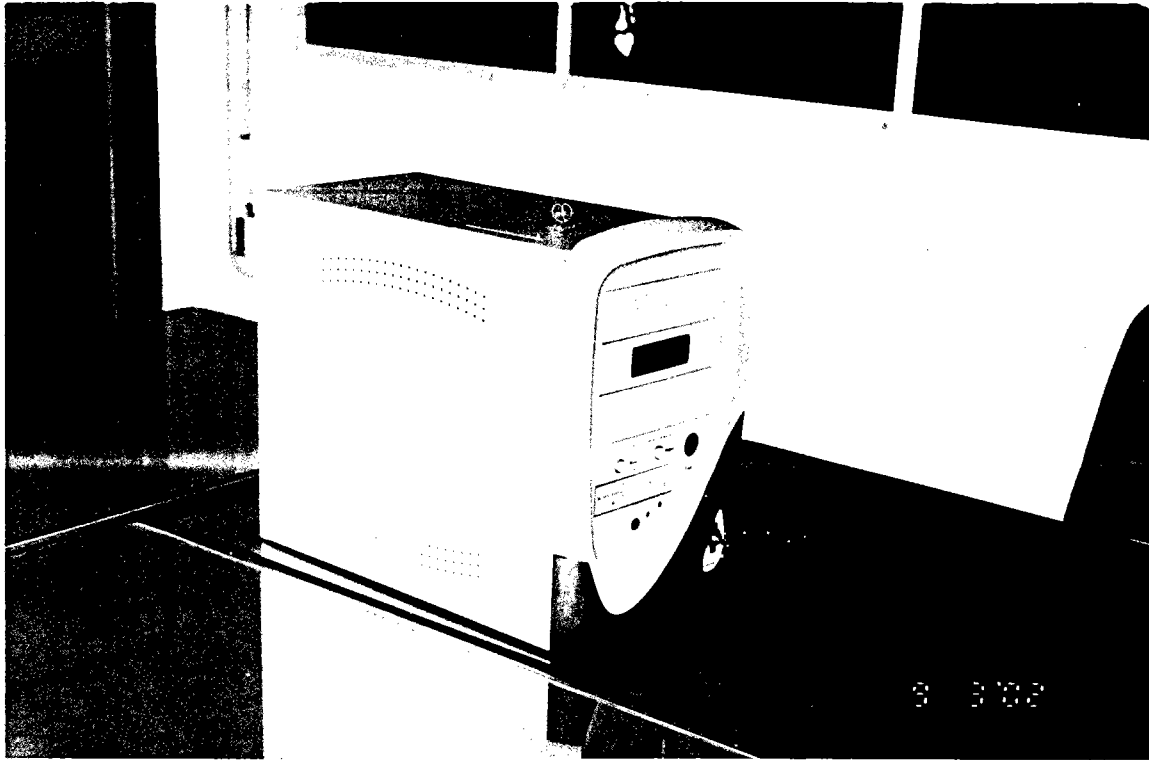


เราต้องการทดสอบที่เวลาเท่าไรก็กด Select 3

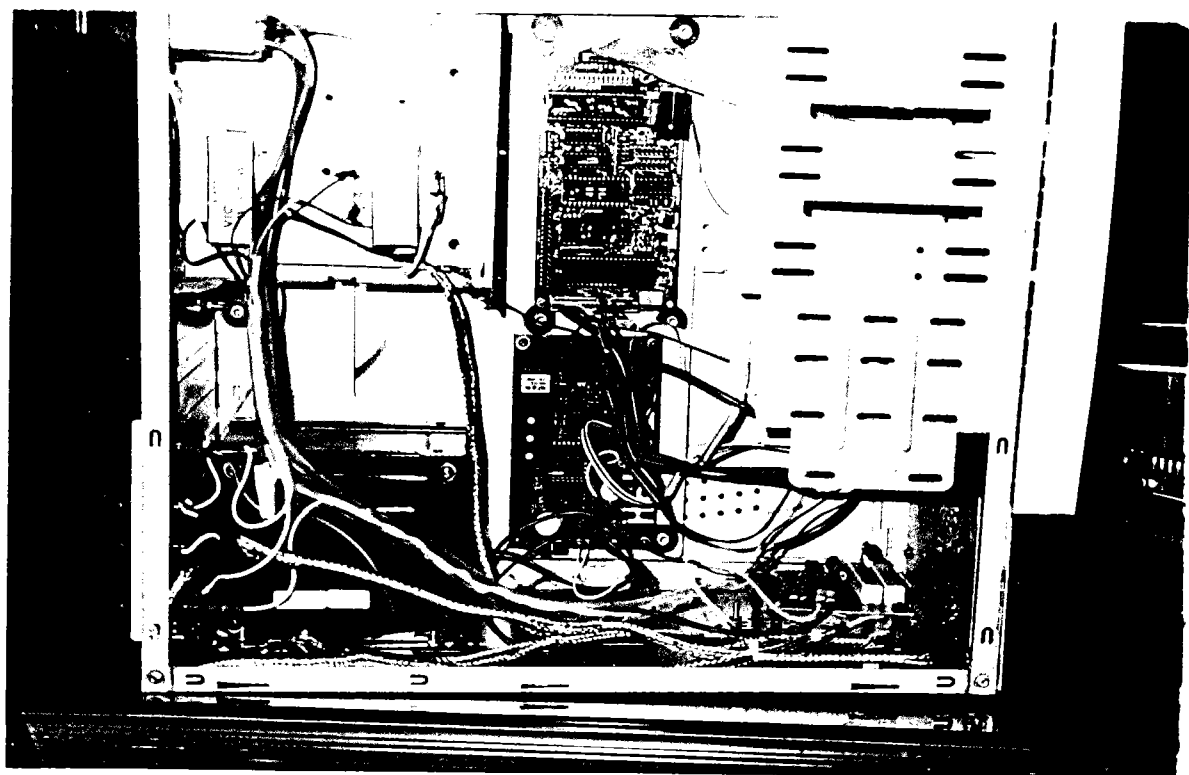
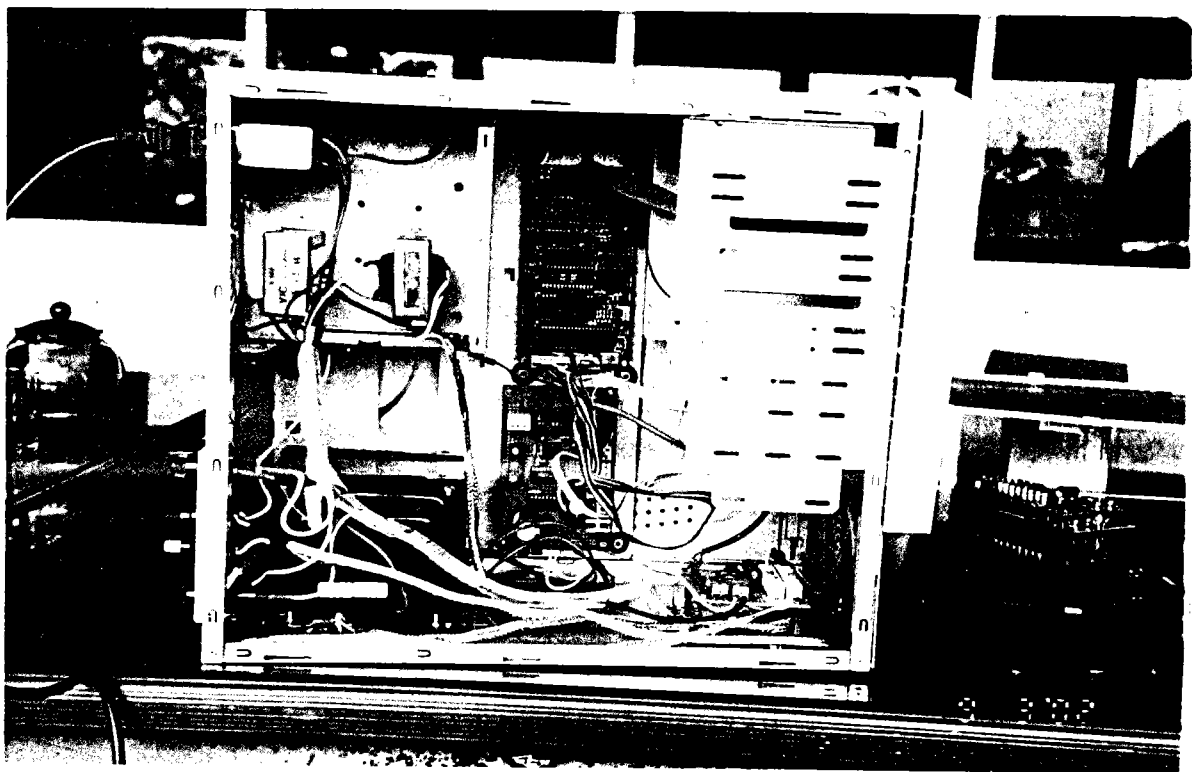
- 4) จอภาพจะเลื่อนไปกระพริบที่ I = 1.0 ma แล้วจะเลื่อนไปเป็นวงรอบ { Cycle } เมื่อกดปุ่ม Mode 2 ดังนี้ 1.0 1.5
- เราต้องการกระแสรั่วไหลในการทดสอบเท่าไรก็กดเลือก
- 5) บรรทัดที่ 2 ของจอภาพ READY แสดงว่าพร้อมที่จะทดสอบให้กดปุ่ม TEST 4 จอภาพจะแสดงผลว่าผ่านหรือไม่ (Fault / Good) ถ้าต้องการทดสอบที่สภาพเงื่อนไขเดิมก็สามารถกด TEST 4 เข้าได้เลย ถ้าต้องการเปลี่ยนสภาพเงื่อนไขก็ให้เริ่มที่ข้อ 3 อีกครั้ง



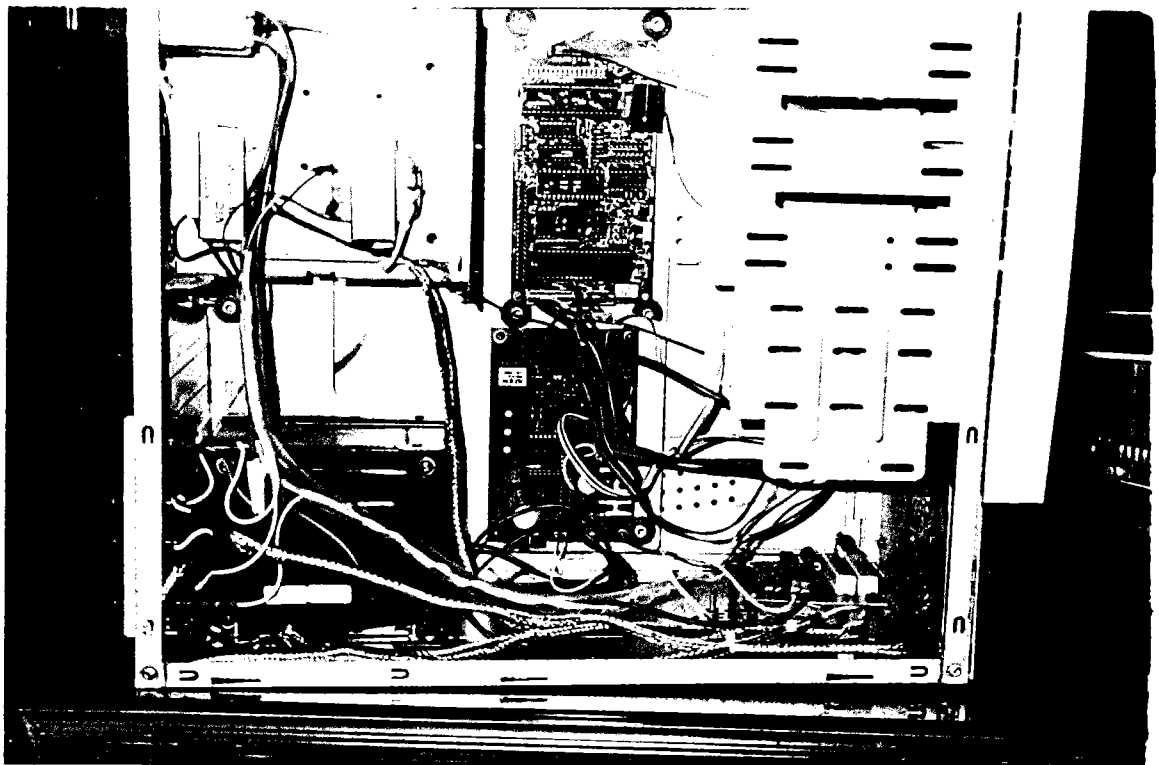
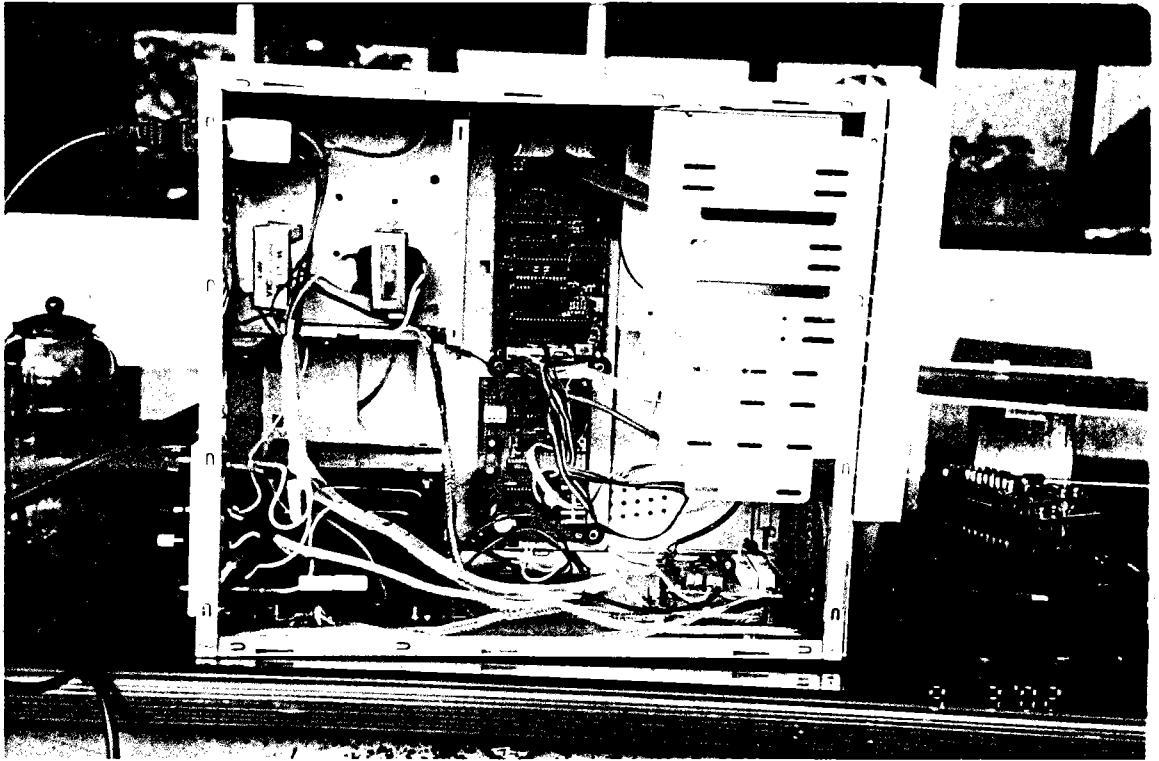
File	Insulator Tester
Size	B
Document Number	001
Rev	A
Date	January, February 02, 2002
Sheet	1



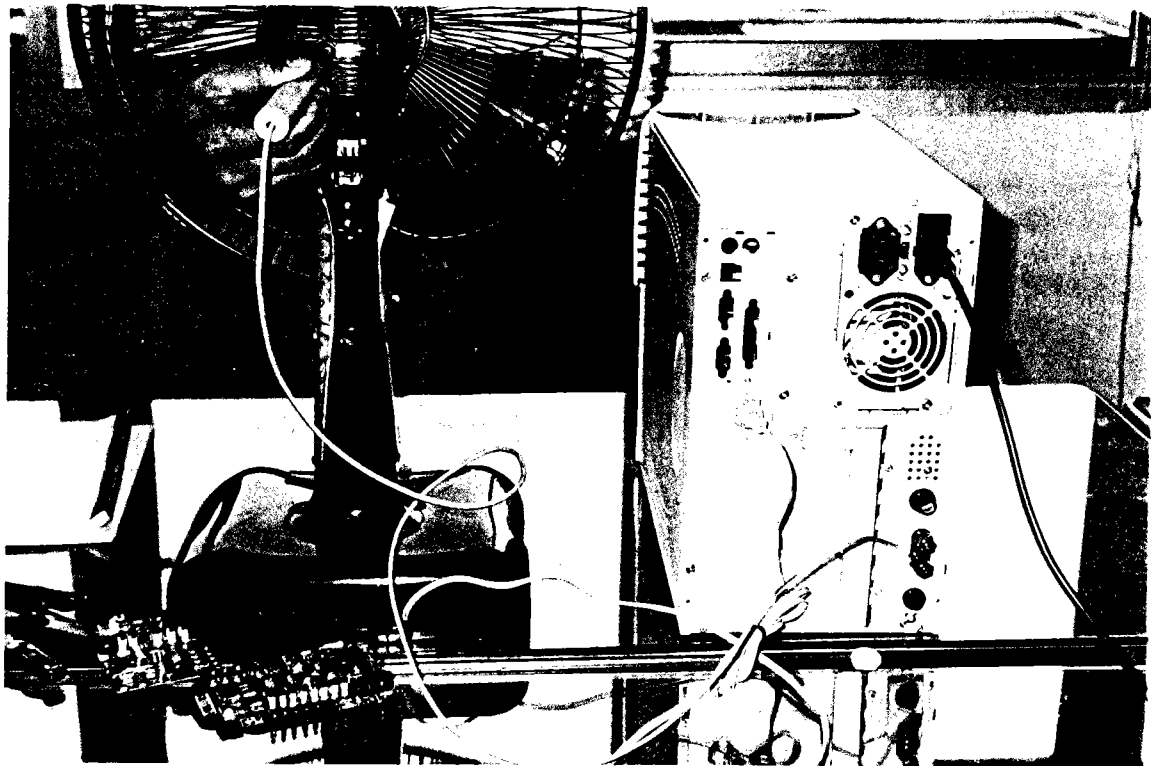
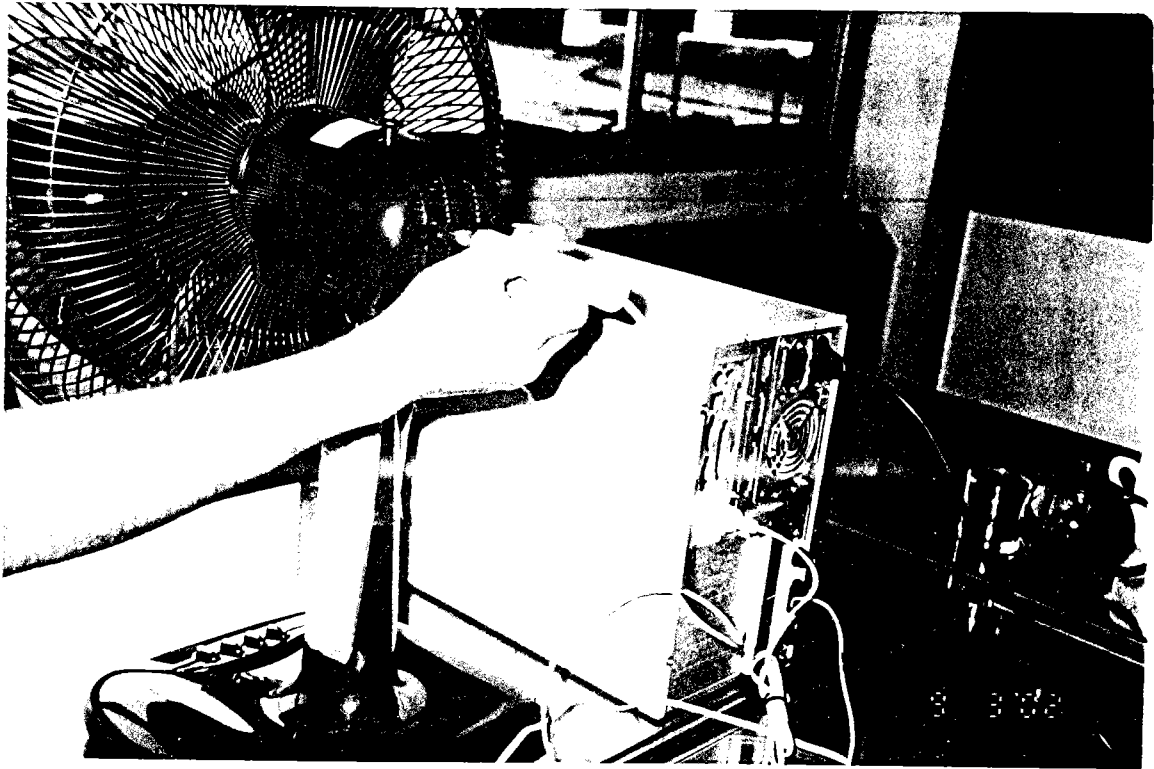
ภาพประกอบของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวน
ของเครื่องใช้ไฟฟ้า



ภาพประกอบภายในของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวน
ของเครื่องใช้ไฟฟ้า



ภาพประกอบภายในของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวน
ของเครื่องใช้ไฟฟ้า



ภาพประกอบของการใช้งานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวน
ของเครื่องใช้ไฟฟ้าตรวจสอบพัดลมไฟฟ้า

ภาคผนวก จ.

คู่มือการใช้อุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐาน
เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า

อุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐาน เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า (Calibrator Box)

บทนำ

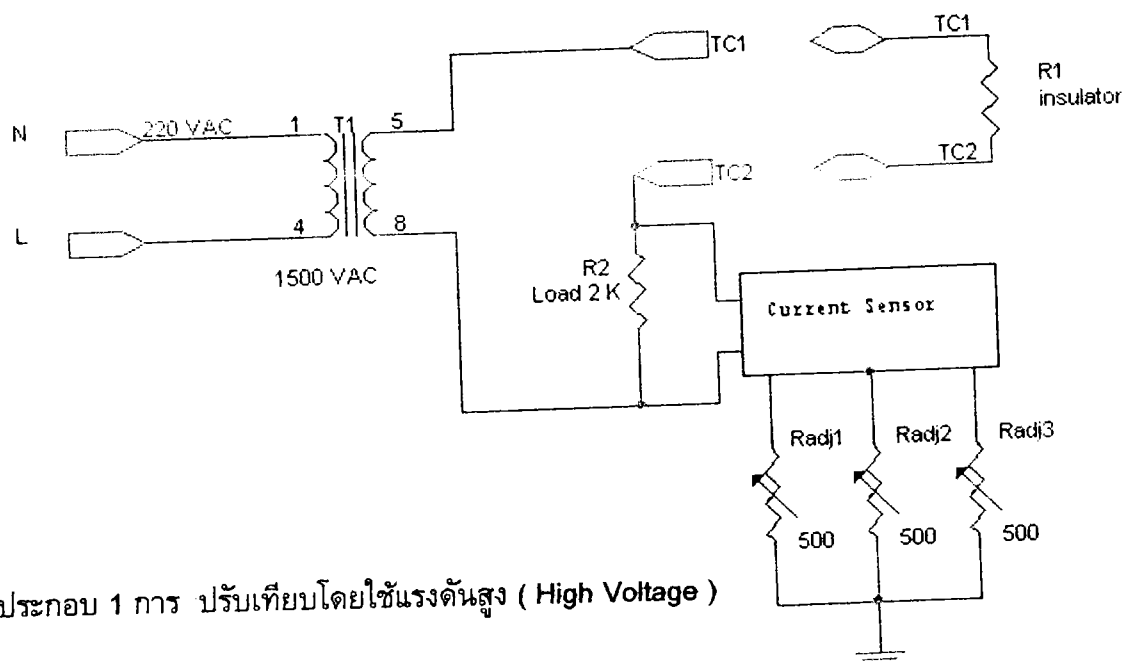
อุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า (Calibrator Box) นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับเทียบตั้งค่ากระแส และทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยที่ผู้ปรับเทียบมาตรฐานไม่ต้องเสี่ยงอันตรายกับการปรับเทียบมาตรฐานโดยใช้แรงดันสูง

วัตถุประสงค์

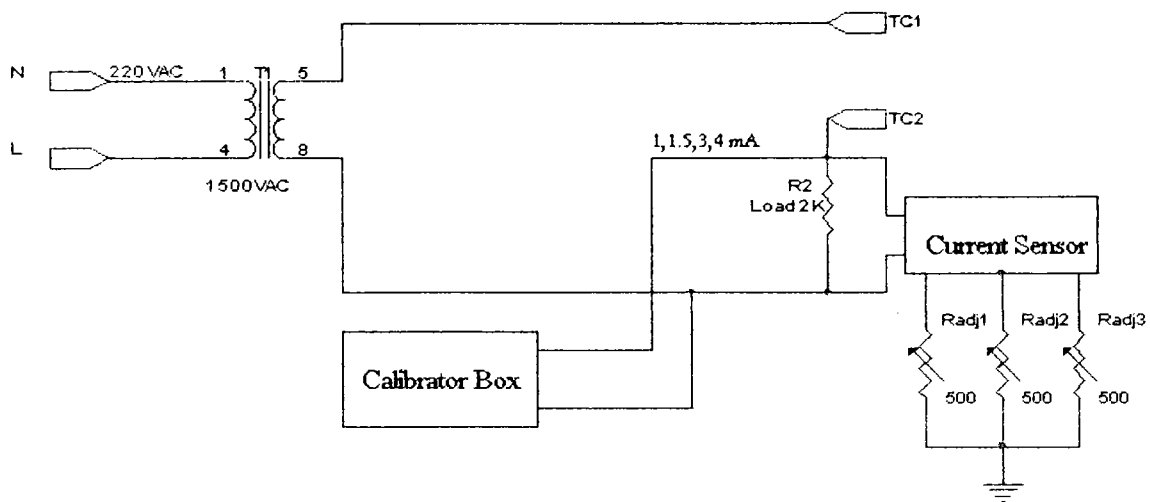
1. เพื่อความสะดวกในการปรับเทียบมาตรฐานเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าโดยไม่ต้องนำเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้ามาทำการปรับเทียบได้
2. สามารถใช้อ้างอิงการปรับเทียบมาตรฐานของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าซึ่งเป็นงานวิจัยของผู้ทำ

หลักการทำงาน

หลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับเทียบ ใช้การสร้างกระแสทดสอบที่ไหลผ่าน Load (Resistor 2K) เหมือนการทดสอบฉนวน ด้วยการป้อนแรงดันขนาดต่างๆ กัน เพื่อให้วงจร เปรียบเทียบ (Comparator) ในภาค ตรวจสอบกระแส (Current Sensor) ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าทำงานในย่านกระแสทดสอบต่างๆ กัน โดยชุดแรงดันสูง (High Voltage) ของเครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อลดอันตรายอันเกิดจากการปรับเทียบโดยใช้แรงดันสูง



ภาพประกอบ 1 การ ปรับเทียบโดยใช้แรงดันสูง (High Voltage)



ภาพประกอบ 2 การปรับเทียบโดยใช้ Low Volt.

จากภาพประกอบ 2 การตั้งค่ากระแสให้ผ่าน Load สามารถทำได้โดยการปรับค่า Variable Resistor ของ Calibrator Box จนได้ค่ากระแสตามต้องการ

การทำงานของ Calibrator Box ใช้ Transformer 9 Vac เป็นตัวสร้างแรงดัน และใช้ Trim Pot เป็นตัวจำกัดกระแสให้ได้ตามต้องการ โดยมี R 2K ขนานกับ Current sensor circuit เป็น Load ดังแสดง ตามภาพประกอบ 3

ก. การปรับเทียบอุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐาน

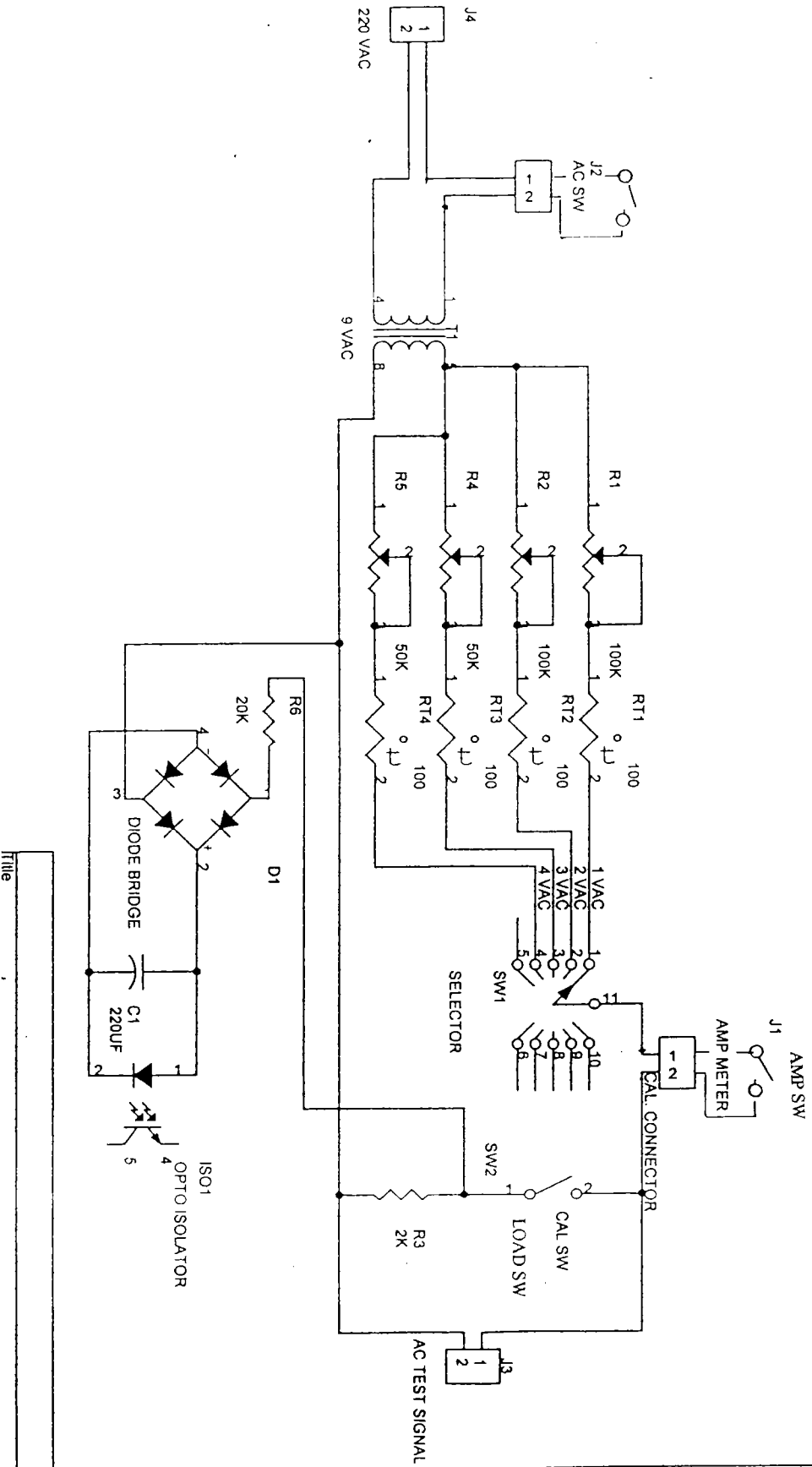
ความต้องการของอุปกรณ์ปรับเทียบเครื่องทดสอบจนวนนั้น คือสร้างแรงดันให้กับ Load 2K เพื่อให้ได้กระแส 1 mA, 1.5mA, 3mA, 4mA โดยการปรับค่า R1, R2, R4, R5 ดังตาราง

Range	Resister	Min	Type	Max
1mA	R1	0.95	1mA	1.05
1.5mA	R2	1.575	1.5mA	1.425
3mA	R3	2.85	3mA	3.15
4mA	R4	3.8	4mA	4.2

ขั้นตอน การปรับเทียบมาตรฐานอุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐานเครื่องทดสอบจนวน

ว.๑. Range 1 mA

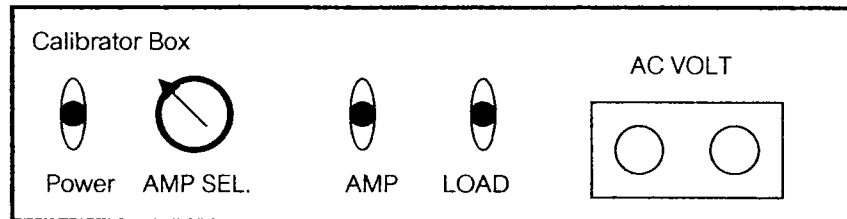
- ๓.๑.๑ สวิตช์ Load อยู่ตำแหน่ง ON สวิตช์ Amp อยู่ตำแหน่ง ON
- ๓.๑.๒ สวิตช์ Selector อยู่ตำแหน่ง 1mA
- ๓.๑.๓ ปิดสวิตช์ Power มาตำแหน่ง ON
- ๓.๑.๔ วัดกระแสไหลผ่าน Amp. Meter Connector
- ๓.๑.๕ ปรับค่า R 1 mA ด้านหลัง Calibrator Box จนได้ค่าได้ $1\text{mA} \pm 5\%$



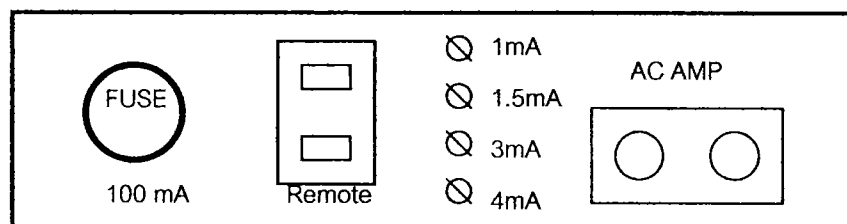
Title

๓.๒. Range 1.5 ,3,4 mA

ทำขั้นตอนเหมือนข้อ ๓.๑ เพียงแต่ปรับ Switch Selector ไปตำแหน่ง 1.5,3,4 mA ตามลำดับ
 ๕ ภาพแสดงตำแหน่งต่าง ๆ ของ Switch และ Connector



รูปที่ 3ก ภาพด้านหน้าของอุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐาน



รูปที่ 3ข ภาพด้านหลังของอุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐาน

๕. การปรับเทียบมาตรฐานโดยใช้ Calibrator Box

- ๕.๑ สวิตช์ Power ของ Calibrator Box และเครื่องทดสอบจนวนอยู่ตำแหน่ง OFF
- ๕.๒ ต่อสาย AC REMOTE จาก Calibrator Box ไป HV SW. Connector ของ เครื่องทดสอบจนวน
- ๕.๓ ถอด Fuse HV ของเครื่องทดสอบจนวน
- ๕.๔ สวิตช์ Power เครื่องทดสอบจนวน ON
- ๕.๕ ตั้งกระแสทดสอบ 1 mA เวลาทดสอบ 60 S
- ๕.๖ กดปุ่ม TEST
- ๕.๗ ปรับ R15 จน เครื่องทดสอบจนวนแสดงผล FAIL
- ๕.๘ ตั้งกระแสทดสอบ 1.5 mA เวลาทดสอบ 60 S
- ๕.๖ กดปุ่ม TEST
- ๕.๗ ปรับ R13 จน เครื่องทดสอบจนวนแสดงผล FAIL
- ๕.๘ OFF สวิตช์ POWER ปลดสาย Remote ออก เป็นอันเสร็จสิ้นการปรับเทียบเครื่องวัดค่าจนวน

ภาคผนวก จ

ใบประกาศนียบัตรรับรองอุปกรณ์เปรียบเทียบมาตรฐาน
เครื่องตรวจสอบความเป็นฉนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้า
จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ



National Institute of Metrology (Thailand)

75/7 Rama VI Road, Thungphyathai, Rajthevi, Bangkok 10400 Tel. 248-2181 Fax. 248-4484

Certificate of Calibration

Issued by : Electrical Laboratory, Department of Electrical Metrology

Date of Issue : 27 March 2002

Serial Number : EL-0014/02

Page : 1 of 3 Pages

For : Srinakharinwirot University

Description : CALIBRATOR BOX (for insulator testing)

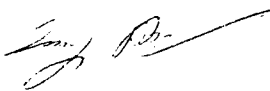
Model : -

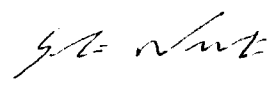
Serial No. : 001

Manufacturer : -

The reported uncertainty is based upon a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k = 2$, providing a level of confidence of approximately 95%

Reference : CSR No. 0105/02

Checked by : 

Signed :  (Authorised Signatory)

Name : Somchai Nuamsettee for the Director

This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the Director of National Institute of Metrology (Thailand).



For : Srinakharinwirot University
Description : CALIBRATOR BOX (for insulator testing)
Model : -
Serial No. : 001
Manufacturer : -
Date of Received : 12 March 2002
Measurement date : 18 March 2002

ENVIRONMENTAL CONDITIONS :

The measurement was carried out in an ambient temperature of $(23,0 \pm 2,0)$ °C and relative humidity of $(50 \pm 15)\%$.

MEASUREMENT METHOD :

The CALIBRATOR BOX (for insulator testing) was calibrated by direct measurement with high accuracy digital Multimeter

TABULATION OF RESULTS :

The measurement was made on function and ranges requested. The table in the following page gives the measured values and associated measurement uncertainties.

UNCERTAINTIES :

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standards uncertainty by the coverage factor $k=2$. It has been determined in accordance with EA publication EA-4/02 "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration" and "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)". The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

TRACEABILITY :

The measurement is traceable to :

- National Institute of Standards and Technology (NIST), U.S.A through Fluke Primary Standards Laboratory Report of Calibration Certificate No. 2D4549.



MEASUREMENT RESULTS

C Current Source Accuracy Test

Range	Setting Output	Measured Value	Uncertainty
1 mA	1 mA @ 50 Hz	1,000 mA	0,1 %
1,5 mA	1,5 mA @ 50 Hz	1,500 mA	0,1 %
3 mA	3 mA @ 50 Hz	3,001 mA	0,1 %
4 mA	4 mA @ 50 Hz	3,998 mA	0,1 %

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ – ชื่อสกุล	พ.อ.อ. ประสงค์ สืบชาติ
วัน เดือน ปีเกิด	11 พฤษภาคม 2509
สถานที่เกิด	บ้านเลขที่ 166 ถนนศรีบุญชู อำเภอพนัสนิคม จังหวัดชลบุรี 20140 โทร. 038 – 462994 , 01 – 6434428
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัทฮาดารี อิเล็กทริก จำกัด เลขที่ 66/13 ถนนพระราม 2 ซอย 94 แสมดำ บางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150 โทร. 02-8962390 ต่อ 630
ตำแหน่งหน้าที่การงานในปัจจุบัน	ผู้บริหารระดับแผนก
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2526	มัธยมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนพนัสพิทยาคาร อำเภอพนัสนิคม จังหวัดชลบุรี
พ.ศ. 2529	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาไฟฟ้ากำลัง โรงเรียนช่างฝีมือทหาร กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2536	ปริญญาตรี คณะศึกษาศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ – ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางเขน กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2537	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2545	ปริญญาโท คณะศึกษาศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร กรุงเทพฯ