



เครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

ELECTRIC CURRENT SYMMETRICAL COMPONENTS

MEASUREMENT DIVICE

1/



โดย

นาย กฤษณา

กวดานนท์ ณ มหาสารคาม

นาย คมสัน

ศรีแก้ววรรณ

นาย วีระพันธุ์

มานันตพงศ์

วัน เดือน ปี.....	30.04.2541
เลขทะเบียน.....	038185
เลขเรียกหนังสือ.....	T 39205 ฐ. ๒๙๑

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่สู่สาธารณะ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038185

**เครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า**  
**ELECTRIC CURRENT SYMMETRICAL COMPONENTS**  
**MEASUREMENT DEVICE**



**อาจารย์ที่ปรึกษา**

**ศศ. ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

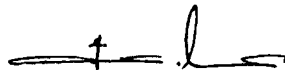
ปริญญาโทปีการศึกษา 2539

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เรื่อง เครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย กฤษณา ภวภูตานนท์ ณ มหาสารคาม
  2. นาย คมสัน ศรีแก้ววรรณ
  3. นาย วีระพันธุ์ มานันตพงศ์



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

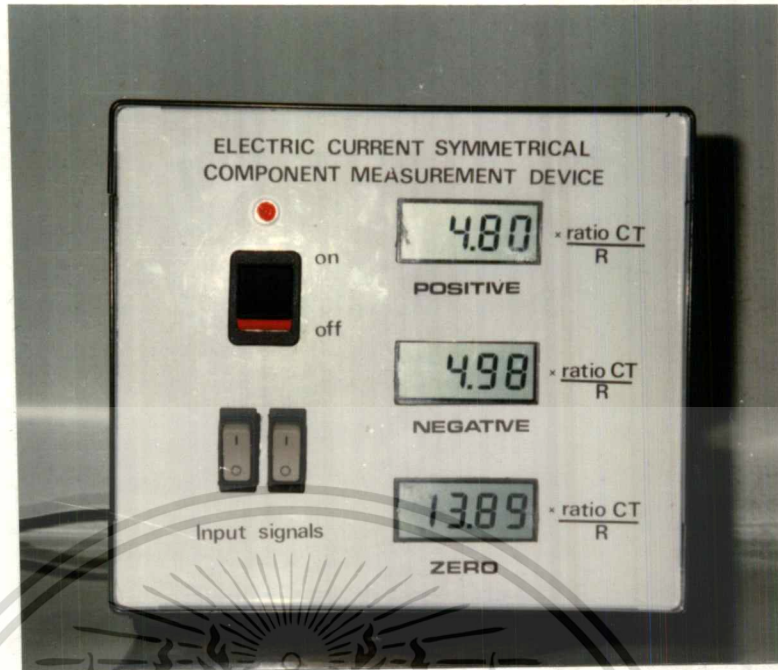
	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 หลักการขององค์ประกอบสมมาตร	3
2.2 โครงสร้างของเฟสเซอร์ไม่สมมาตรจากองค์ประกอบสมมาตร	8
2.3 โอเปอเรเตอร์	9
2.3.1 ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ไม่สมมาตร	11
2.4 การวัดองค์ประกอบสมมาตร	17
2.4.1 การวัดปริมาณ โวลต์เดจ	17
2.4.1.1 การวัด โวลต์เดจลำดับศูนย์	17
2.4.1.2 การวัด โวลต์เดจลำดับบวกและ โวลต์เดจลำดับลบ	18
2.4.2 การวัดปริมาณกระแส	20
2.4.2.1 การวัดกระแสลำดับศูนย์	20
2.4.2.2 การวัดกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับลบ	21
2.5 แนวทางในการสร้างเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า	25
2.5.1 บล็อกหม้อแปลงกระแส	26
2.5.2 บล็อกวงจรสำหรับการวัด	26
2.5.3 บล็อกเลื่อนมุมเฟส	28
2.5.4 บล็อกการรวมสัญญาณ	29
2.5.5 ส่วนแสดงผลปริมาณองค์ประกอบสมมาตร	29
2.6 ส่วนประกอบที่ใช้ในเครื่องวัดองค์ประกอบสมมาตรทางไฟฟ้า	29
2.6.1 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า	29
2.6.1.1 โครงสร้างและวงจรการต่อหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า	29
2.6.1.2 หลักการทำงาน	30
2.6.1.3 ผลของการเบี่ยงจรขอลวดทุกขุมิ	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

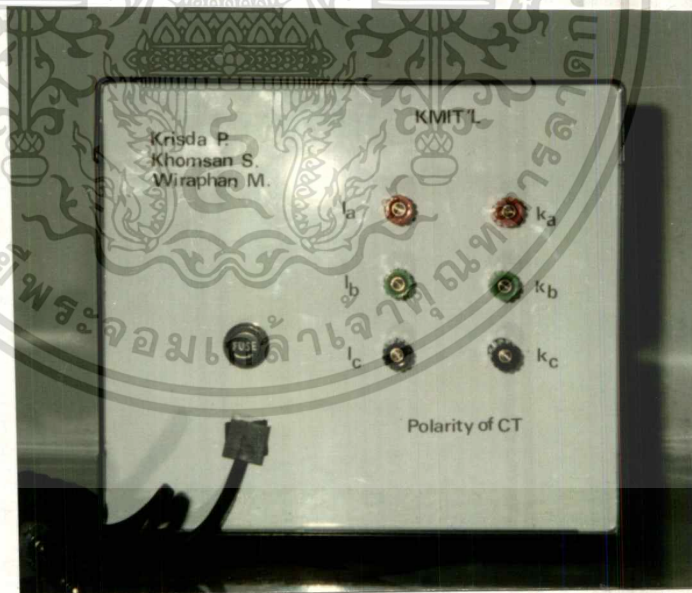
	หน้า
2.6.1.4 เบอร์เคน	34
2.6.2 วงจรตามแรงดัน	35
2.6.3 วงจรเลื่อนเฟส	36
2.6.4 วงจรขยายแบบกลับเฟส	38
2.6.4.1 เมื่อป้อนแรงดันบวกเข้าที่ขาอินเวอร์ต	38
2.6.4.2 โหลดและกระแสเอาต์พุต	40
2.6.4.3 เมื่อป้อนแรงดันลบเข้าที่ขาอินเวอร์ต	40
2.6.4.4 เมื่อป้อน AC ให้กับขาอินเวอร์ต	41
2.6.4.5 หลักรในการออกแบบวงจร	42
2.6.4.6 สรุปวิธีการวิเคราะห์วงจร	43
2.6.5 วงจรรวมสัญญาณแบบอินเวอร์ต	43
2.6.6 วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง	45
2.6.6.1 รีคตีไฟเออร์ชนิดต่อกราวด์เข้ากับอินพุตบวก	46
2.6.6.2 วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง	47
<b>บทที่ 3 การสร้างและส่วนประกอบ</b>	<b>48</b>
3.1 หลักการในการวัดปริมาณกระแสในรูปองค์ประกอบสมมาตร	48
3.2 การคำนวณและการสร้าง	49
3.2.1 หม้อแปลงกระแส	49
3.2.2 วงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดัน	53
3.2.3 วงจรเลื่อนเฟส	54
3.2.4 วงจรรวมสัญญาณ	58
3.2.5 วงจรเปลี่ยนแรงดันเอซีให้เป็นดีซี	60
3.2.6 ส่วนแสดงผล	62
<b>บทที่ 4 การทดลอง</b>	<b>69</b>
4.1 การทดลองที่ 1 เมื่อแรงดันในแต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน	71
4.1.1 การทดลองที่ 1.1 เมื่อเป็น Unity Power Factor Load	71
4.1.2 การทดลองที่ 1.2. เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load	76
4.1.2.1 การทดลองที่ 1.2.1 เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load 1 phase	76
4.1.2.2 การทดลองที่ 1.2.2 เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load 2 phase	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
4.2 การทดลองที่ 2 เมื่อแรงดันในเฟสมีค่าไม่เท่ากัน	86
4.2.1 การทดลองที่ 2.1 เมื่อเป็น Unity Power Factor Load	86
4.2.2 การทดลองที่ 2.2. เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load	87
4.2.2.1 การทดลองที่ 2.2.1 เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load 1 phase	87
4.2.2.2 การทดลองที่ 2.2.2 เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load 2 phase	88
4.3 การทดลองที่ 3 เมื่อแรงดันในเฟสเกิดเฟสหาย	89
4.3.1 การทดลองที่ 3.1 เมื่อเป็น Unity Power Factor Load	89
4.3.2 การทดลองที่ 3.2. เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load	90
4.3.2.1 การทดลองที่ 3.2.1 เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load 1 phase	90
4.3.2.2 การทดลองที่ 3.2.2 เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load 2 phase	91
4.4 สรุปผลการทดลอง	92
บทที่ 5 สรุปผลของโครงการและข้อเสนอแนะ	93
ภาคผนวก	96
ก. รูปถ่ายและวิธีการวัดเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้น	
ข. DATASHEET	



รูปภาพ ด้านหน้าของเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า



รูปภาพ ด้านหลังของเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรทางไฟฟ้า

นาย กฤษณา ภวภูตานนท์ ณ มหาสารคาม  
 นาย कमสัน ศรีแก้ววรรณ  
 นาย วีระพันธุ์ มานันตพงศ์  
 ผศ. ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2539

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการทดลองสร้างเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า เพื่อที่จะให้ทราบถึงปริมาณทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส ทั้งในระบบที่สมคูลย์ และไม่สมคูลย์ ซึ่งจะกระจายให้อยู่ในรูปองค์ประกอบสมมาตร 3 องค์ประกอบ คือ องค์ประกอบลำดับบวก องค์ประกอบลำดับลบ และองค์ประกอบลำดับศูนย์โดยใช้ตัวต้านทานเป็นตัวตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสมาเข้าเครื่องมือวัดเพื่อที่จะกระจายในแต่ละเฟสออกมาเป็นกระแสลำดับบวก ลบ และศูนย์ ซึ่งโครงการนี้เป็นเพียงการทดลองสร้าง โดยอาศัยสมการความสัมพันธ์และวิธีการขององค์ประกอบสมมาตรเป็นปัจจัยหลักในการสร้าง และใช้วงจรทางค่านิเลคทรอนิกส์เข้ามาเป็นส่วนประกอบของเครื่องมือวัด โดยค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณ ซึ่งอาจจะผิดพลาดบ้างเล็กน้อยอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือวัด เช่น ตัวต้านทาน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาเป็นส่วนประกอบของเครื่องมือวัด ยังไม่เหมาะสมมากนัก ซึ่งในการใช้งานจริงจึงจำเป็นต้องปรับปรุงในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องมือวัดก่อนเพื่อให้แต่ละส่วนมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เพื่อให้เครื่องมือวัดนี้อ่านค่าได้เที่ยงตรง และมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

**ELECTRIC CURRENT SYMMETRICAL COMPONENTS**  
**MEASUREMENT DEVICE**

Krisda Pawaputanonth na mahasaracam

Khomsan Srikaewnawan

Wiraphan Manantaphong

Asst.Prof. Siriwat Potivejkul Advisor

1996

**ABSTRACT**

This project is a study of experiment to make the electric current symmetrical components measurement device. That used to measure current in balance or unbalance 3 phase power system which separate to 3 components. That is positive component, negative component and zero component. In this experiment will use resistor to detect current in each phase. Then use measurement instrument classified current in each phase to be positive sequence, negative sequence and zero sequence. For this idea method used the relative equation and symmetrical components are main idea to study this project and also used electronic circuit to make this method be success. If we compare between the value from experiment and value from calculation must be flexible because the measurement instrument and devices such as resistor is not perfectly. At last if we would like to approve this method to good efficiency the accurate instruments and devices necessary to provide for this experiment.

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบไฟฟ้าเกิดลัดวงจรเฟส - ดิน	4
รูปที่ 2.2 หลักการขององค์ประกอบสมมาตรในการคำนวณกระแสลัดวงจร	6
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแสดงหลักการการใช้องค์ประกอบสมมาตรในการคำนวณกระแสลัดวงจร	7
รูปที่ 2.4 เฟสเซอร์ส่วนประกอบสมมาตรของสามเฟสเซอร์ไม่สมดุล	8
รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของโอเปอร์เรเตอร์ $a$ และ $j$	9
รูปที่ 2.6 $a - a^2$ เป็น $j$ โอเปอร์เรเตอร์มีค่า $j\sqrt{3}$	10
รูปที่ 2.7 $1 - a^2$ เป็น $j$ โอเปอร์เรเตอร์มีค่า $j\sqrt{3}a^2$	11
รูปที่ 2.8 $a^2 - a$ เป็น $j$ โอเปอร์เรเตอร์มีค่า $j\sqrt{3}a$	12
รูปที่ 2.9 การรวมเฟสเซอร์ขององค์ประกอบสมมาตร	16
รูปที่ 2.10 วิธีการวัดโวลต์เตงลำดับศูนย์	18
รูปที่ 2.11 วิธีการวัดโวลต์เตงลำดับบวกและลบสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย	19
รูปที่ 2.12 วิธีการวัดโวลต์เตงลำดับบวกและลบสำหรับระบบ 3 เฟส 3 สาย	20
รูปที่ 2.13 วิธีการวัดกระแสลำดับศูนย์	21
รูปที่ 2.14 วิธีการวัดกระแสลำดับบวกและลบสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย	22
รูปที่ 2.15 วิธีการวัดกระแสลำดับบวกและลบสำหรับระบบ 3 เฟส 3 สาย	23
รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการวัดกระแสไฟฟ้าขององค์ประกอบสมมาตร	25
รูปที่ 2.17 บล็อกแสดงกระแสไหลเข้าและออกของซีที	26
รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมสำหรับวัดกระแสลำดับบวก	27
รูปที่ 2.19 บล็อกไดอะแกรมสำหรับวัดกระแสลำดับลบ	27
รูปที่ 2.20 บล็อกไดอะแกรมสำหรับวัดกระแสลำดับศูนย์	28
รูปที่ 2.21 บล็อกไดอะแกรมการเลื่อนมุมเฟส	28
รูปที่ 2.22 บล็อกไดอะแกรมการรวมสัญญาณ	29
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของหม้อแปลงกระแส	31
รูปที่ 2.24 สภาพขั้วของหม้อแปลงกระแส	32
รูปที่ 2.25 การต่อขั้วทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส	33
รูปที่ 2.26 แสดงขอบเขตแมกเนไตซิงเคิร์ฟ	34

	หน้า
รูปที่ 2.27 วงจรตามแรงดัน	35
รูปที่ 2.28 วงจรเลื่อนเฟส	37
รูปที่ 2.29 วงจรขยายแบบกลับเฟส	38
รูปที่ 2.30 การไหลของกระแสเมื่อแรงป้อนเข้าเป็นลบถูกป้อนเข้าขาลบ	41
รูปที่ 2.31 วงจรแบบอินเวอร์ตติ้ง	42
รูปที่ 2.32 วงจรรวมสัญญาณแบบอินเวอร์ตติ้ง	43
รูปที่ 2.33 ค่า MAV ที่ได้จากรูปคลื่นแต่ละชนิด	45
รูปที่ 2.34 วงจรค่าสมบรูณ์ชนิดต่อลงกราวด์เข้ากับอินพุทบวกของออปแอมป์	46
รูปที่ 2.35 วงจรแปลงไฟสลับให้เป็นไฟตรงโดยใส่ตัวเก็บประจุ	47
รูปที่ 3.1 การวัดปริมาณกระแสในรูปองค์ประกอบสมมาตร	49
รูปที่ 3.2 Wave from ของ Ipri กับ Isec ของซีทีตัวที่ 1	51
รูปที่ 3.3 Wave from ของ Ipri กับ Isec ของซีทีตัวที่ 2	52
รูปที่ 3.4 Wave from ของ Ipri กับ Isec ของซีทีตัวที่ 3	52
รูปที่ 3.5 วงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน	53
รูปที่ 3.6 สัญญาณอินพุทเทียบกับเอาต์พุทของวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน	54
รูปที่ 3.7 วงจรเลื่อนเฟส 120 องศา	55
รูปที่ 3.8 วงจรเลื่อนเฟส 240 องศา	56
รูปที่ 3.9 สัญญาณอินพุทเทียบกับเอาต์พุทของวงจรเลื่อนเฟส 120 องศา	57
รูปที่ 3.10 สัญญาณอินพุทเทียบกับเอาต์พุทของวงจรเลื่อนเฟส 240 องศา	57
รูปที่ 3.11 วงจรรวมสัญญาณ	58
รูปที่ 3.12 สัญญาณอินพุทเทียบกับเอาต์พุทของวงจรรวมสัญญาณ	59
รูปที่ 3.13 วงจรเปลี่ยนแรงดันเอซีเป็นดีซี	60
รูปที่ 3.14 สัญญาณอินพุทเทียบกับเอาต์พุทของวงจรเปลี่ยนแรงดันเอซีเป็นดีซี	62
รูปที่ 3.15 วงจรดีซีคิจิตอลมิเตอร์	62
รูปที่ 3.16 สัญญาณอินพุทของส่วนแสดงผล	63
รูปที่ 3.17 สัญญาณเอาต์พุทของส่วนแสดงผล	63
รูปที่ 3.18 วงจรใช้งานจริงสำหรับวัดกระแสลำดับบวก	66
รูปที่ 3.19 วงจรใช้งานจริงสำหรับวัดกระแสลำดับลบ	67

	หน้า	
รูปที่ 3.20	วงจรถูกใช้งานจริงสำหรับวัดกระแสลำดับศูนย์	68
รูปที่ 4.1	วงจรถูกการทดลอง	70
รูปที่ 4.2	เมื่อเป็น Unity Power Factor Load	71
รูปที่ 4.3	เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load 1 phase	77
รูปที่ 4.4	เฟสเซอร์การหากระแสในเฟส	80
รูปที่ 4.5	เฟสเซอร์การหา Symmetrical component of current	82
รูปที่ 4.6	เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load 2 phase	84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 การทดลองซีทีคิวที่ 1	50
ตารางที่ 3.2 การทดลองซีทีคิวที่ 2	50
ตารางที่ 3.3 การทดลองซีทีคิวที่ 3	51
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่ 1.1	72
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองที่ 1.2.1	78
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองที่ 1.2.2	85
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองที่ 2.1	86
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองที่ 2.2.1	87
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองที่ 2.2.2	88
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองที่ 3.1	89
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองที่ 3.2.1	90
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองที่ 3.3.2	91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปที่ใช้งานอยู่อาจมีการเปลี่ยนของโหลดตลอดเวลาและบางครั้งระบบส่งจ่ายของการไฟฟ้าเกิดขัดข้อง เช่น แรงดันแต่ละเฟสไม่เท่ากัน เฟสหายไป 1 เฟสหรือ 2 เฟส ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลทางไฟฟ้า เกิดขึ้นกับระบบ ซึ่งระบบที่ไม่สมดุลนี้จะก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่ใช้งานอยู่ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรสั้นลงไป ซึ่งจากผลกระทบจากระบบไม่สมดุลทางไฟฟ้าต่าง ๆ นี้ จึงได้มีการค้นคว้าและคิดที่จะพยายามแก้ปัญหาจากการที่ระบบไฟฟ้าไม่สมดุลนี้ขึ้นมา

ในปี ค.ศ. 1918 C.L. Fortescue ได้ศึกษาถึงวิธีการขององค์ประกอบสมมาตร ซึ่งมีความสำคัญและเป็นหัวข้อสำคัญที่กล่าวถึงอย่างแพร่หลาย มาศึกษาฟอลท์ (faults) ไม่สมมาตรในสายส่งในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่อาจประกอบด้วยการลัดวงจรของระบบสายส่งเฟสใดเฟสหนึ่ง ลัดวงจรจากเฟสลงดิน หรือเฟสใดเฟสหนึ่งขาดหายไป เป็นต้น ปี ค.ศ. 1933 ก็มีการเขียนหลักการในการวัดองค์ประกอบสมมาตรโดย C.F. WAGNER และ R.D. EVANS และก็มีการสร้างเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรสำหรับวิเคราะห์แรงดันและกระแสที่ไม่สมดุลขึ้นในปี ค.ศ. 1938 ในบทความของ T.A. Rich ซึ่งสร้างโดยอาศัยหลักการเลื่อนเฟส (Phase shift) และการรวมพลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้ามาเหนี่ยวนำกับลวดแอนิมิตอร์ ตามสมการและทฤษฎีของการกระจายองค์ประกอบสมมาตร

ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้คิดสร้างเครื่องมือวัดตามสมการและทฤษฎีการแยกองค์ประกอบสมมาตรทางไฟฟ้าโดยมุ่งเน้นในเรื่องการปริมาณกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มาใช้เป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งเป็นการประยุกต์และพัฒนาให้เข้ากับยุคสมัยในปัจจุบัน ซึ่งหลักการเดิมจะเน้นโครงสร้างและอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยอาศัยการเหนี่ยวนำของพลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งค่าที่อ่านได้อาจจะผิดพลาดได้ง่าย เนื่องจากพลังงานส่วนหนึ่งอาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน (Hysteresis loss) และเพื่อลดปัญหาเหล่านี้จึงได้ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในการเลื่อนเฟสและการรวมสัญญาณแทน

ขอบเขตของโครงการนี้ จะเป็นการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเครื่องมือวัดศึกษาหาแนวทางตลอดจนออกแบบวงจรและทดลองสร้างเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าให้สามารถวัดและอ่านค่าได้เที่ยงตรงและมีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะทำได้

ส่วนวัตถุประสงค์ของโครงการนี้ ก็เพื่อสร้างเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า ให้วัดและอ่านค่าได้จริง เที่ยงตรง และมีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่สามารถทำได้

และในการประยุกต์ใช้งานในอนาคต เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโหลดประเภทมอเตอร์ต่าง ๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และโหลดมีแรงดัน และกระแสในแต่ละเฟสไม่เท่ากันเป็นผลให้อุปกรณ์ต่าง ๆ และโหลดมีอายุการใช้งานสั้นลง และเกิดความเสียหายในที่สุดซึ่งการประยุกต์ใช้งานอาจจะตั้งค่าสักค่าหนึ่งขององค์ประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ของเครื่องวัด ส่งสัญญาณให้อุปกรณ์ตัดต่อวงจรของระบบทำการตัดวงจรของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าออก หรืออาจจะส่งสัญญาณให้อุปกรณ์ที่สามารถชดเชยของค์ประกอบต่าง ๆ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าเกิดความสมดุลและมีเสถียรภาพมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

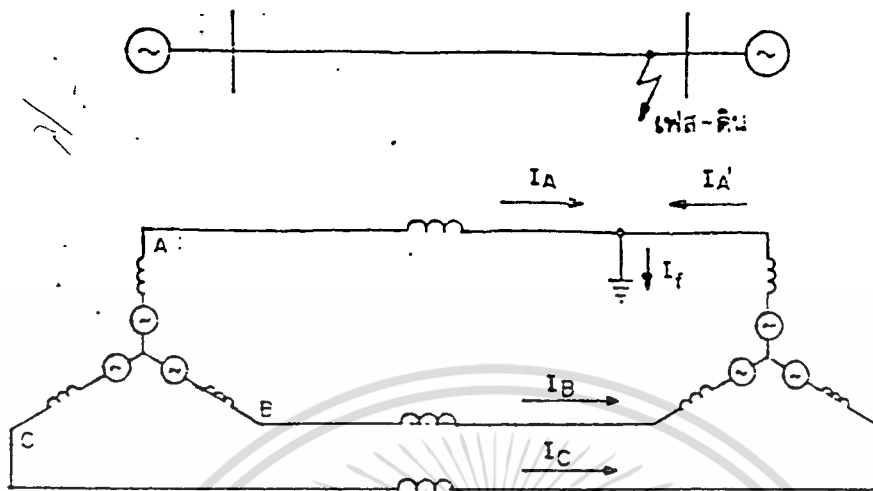
## บทที่ 2

### ทฤษฎี

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งแรงดันและกระแสไฟฟ้า อยู่ในสภาพสมมูลย์ (ขนาดแต่ละเฟสเท่ากัน และมุมแต่ละเฟสห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า) จะวิเคราะห์เหมือนวงจรไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยเขียนเป็นวงจรสมมูลย์หนึ่งเฟส (Single phase equivalent circuit) และใช้กฎของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ Kirchoff (Kirchoff current's law and voltage's law) และเมื่อวงจรสามเฟสไม่สมมาตร อันเนื่องมาจากภาวะ (Loads) ไม่สมมูลย์, ฟอลท์ (faults) ไม่สมมูลย์หรือเกิดลัดวงจร จะไม่สามารถวิเคราะห์จากวงจรสมมูลย์หนึ่งเฟสได้ จึงต้องใช้ วิธีการขององค์ประกอบสมมาตรดังกล่าวให้เป็นวงจรสมมาตร จึงสามารถคำนวณโดยใช้วงจรสมมูลย์หนึ่งเฟสได้

#### 2.1 หลักการขององค์ประกอบสมมาตร

ก่อนพิจารณาหลักการขององค์ประกอบสมมาตร เรามาพิจารณาถึงความยากลำบากในการคำนวณกระแสในระบบไม่สมมาตรก่อน พิจารณาระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.1 ก) กรณีที่เกิดลัดวงจรจากเฟส A วงจรของรูป 2.1 ก. แสดงไว้ในรูป 2.1 ข. การหาขนาดกระแสลัดวงจร ( $I_f$ ) และกระแสลัดวงจร  $I_a, I_a', I_b, I_c$  ดังในรูปไม่ใช่เรื่องง่ายการแก้ปัญหาที่ทำได้คือ ใช้กฎของ Kirchoff และถ้าระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่ ๆ การแก้ปัญหาด้วยวิธีการดังกล่าวจึงเป็นเรื่องที่ยากลำบากมาก สาเหตุสำคัญที่ทำให้แก้ปัญหาได้ยาก ก็คือ ไม่สามารถแทนระบบไฟฟ้าด้วยวงจรสมมูลย์หนึ่งเฟสได้ ดังนั้นวิธีการขององค์ประกอบสมมาตรมีประโยชน์มากและทำให้การคำนวณกระแสลัดวงจรสามารถทำได้ง่ายก็คือ สามารถแปลงระบบไฟฟ้าเดิมให้เป็นระบบไฟฟ้าใหม่สามรูป เรียกว่า เน็ตเวิร์คบวก เน็ตเวิร์คลบ และเน็ตเวิร์คศูนย์ (Positive, Negative and Zero networks) ซึ่งเน็ตเวิร์คแต่ละแบบสามารถเขียนวงจรสมมูลย์หนึ่งเฟสได้ การลัดวงจรแบบไม่สมมาตรต่าง ๆ กัน เช่น การลัดวงจรเฟส-ดิน เฟส-เฟส และเฟส-เฟส-ดิน จะมีการต่อของเน็ตเวิร์คสามแบบต่างกัน เมื่อคำนวณกระแสลัดวงจรในเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์ ได้แล้วก็แปลงโดยวิธีการขององค์ประกอบสมมาตรกลับมาเป็นระบบไฟฟ้าเดิมเฟส A, B, C ก็จะได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ



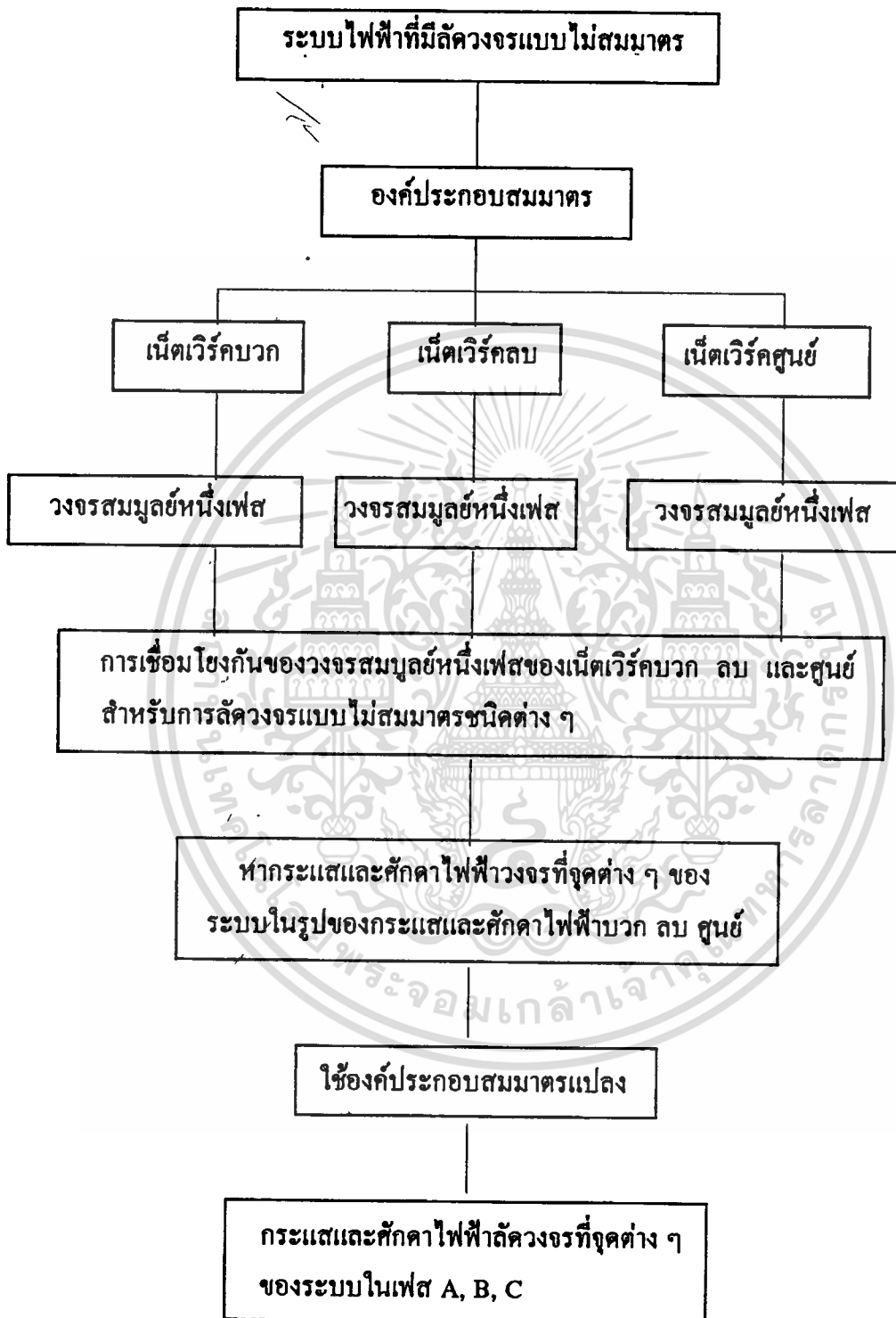
รูปที่ 2.1 ระบบไฟฟ้าเกิดลัดวงจรเฟส-ดิน

ก) โคอะแกรมเส้นเดียว (One line diagram)

ข) วงจรสมมูล (Equivalent circuit)

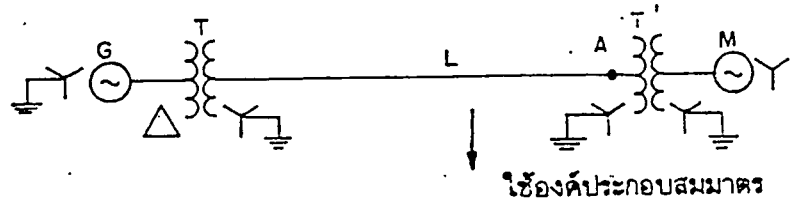
- บล็อก 1** ระบบไฟฟ้าโคอะแกรมเส้นเดียวแสดงจุดเกิดลัดวงจรแบบไม่สมมาตร
- บล็อก 2** แสดงบล็อกขององค์ประกอบสมมาตรซึ่งจะแปลงระบบไฟฟ้าเดิมออกมาเป็นระบบไฟฟ้าใหม่ 3 ระบบ คือ เน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์
- บล็อก 3** เน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์ เหล่านี้ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์อุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบเดิม แต่อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้เน็ตเวิร์คบวกได้แก่อิมพีแดนซ์บวก (positive sequence impedance) ส่วนอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในเน็ตเวิร์คลบก็ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ (negative sequence impedance) และเน็ตเวิร์คศูนย์ก็ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ศูนย์ (zero sequence impedance) มาต่อกันเป็นเน็ตเวิร์ค
- บล็อก 4** เน็ตเวิร์คในบล็อก 3 นี้ ทั้งเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์ต่างก็เป็นเน็ตเวิร์คที่มีกระแสและศักดาไฟฟ้าในแต่ละเฟสขนาดเท่ากัน และมุมห่างเท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ดังในบล็อก 4

- บล็อก 5** การเกิดลัดวงจรแบบไม่สมมาตรแต่ละชนิด เช่นการลัดวงจรเฟส-ดิน ก็มีการเชื่อมโยงกันของเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์อย่างหนึ่ง การลัดวงจรเฟส-เฟส ก็มีการเชื่อมโยงกันของเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์อีกแบบหนึ่ง ดังนั้นเมื่อต้องการหา และกระแสและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรแบบใดก็นำเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์มาเชื่อมโยงกันเพื่อแทนการเกิดลัดวงจรแบบนั้น
- บล็อก 6** เมื่อได้รูปการเชื่อมโยงของเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์เพื่อแทนการเกิดลัดวงจรแบบที่ต้องการพิจารณาแล้วก็คำนวณหากระแส และศักดาไฟฟ้าลัดวงจรในเน็ตเวิร์คทั้งสามนั้น
- บล็อก 7** ใช้องค์ประกอบสมมาตรแปลงกระแสและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรที่หาได้ในบล็อก 6 ของเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์ ให้เป็นกระแสและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรกลับไปเป็นของระบบไฟฟ้าเดิม A, B, C
- บล็อก 8** ผลลัพธ์กระแสและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรที่ได้ออกมาจากบล็อกที่ 7

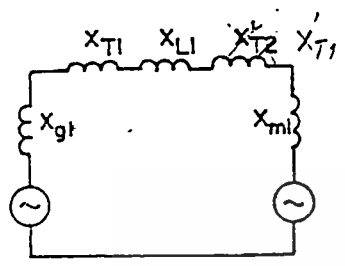


**รูปที่ 2.2** หลักการขององค์ประกอบสมมาตรในการคำนวณกระแสลัดวงจร

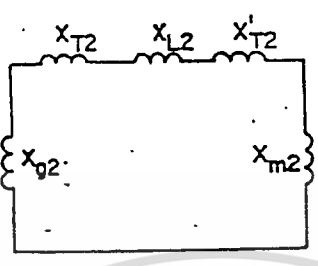
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



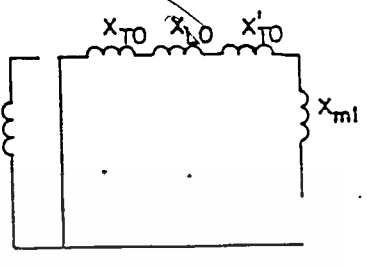
ใช้องค์ประกอบสมมาตร



เบ็ดเวิร์คบวก

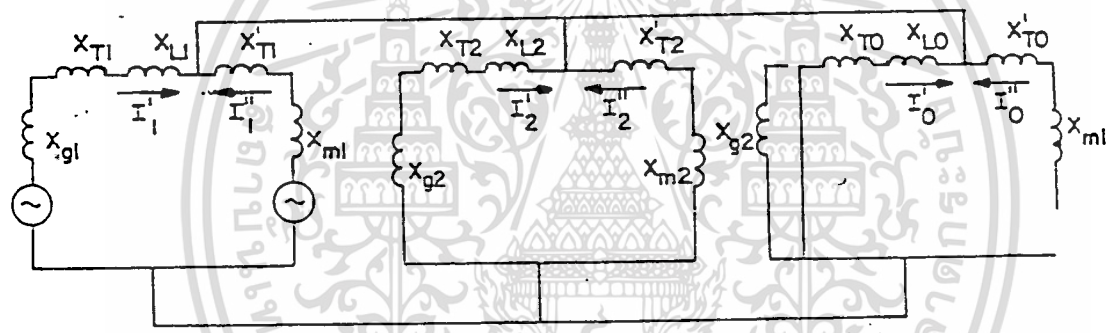


เบ็ดเวิร์คลบ



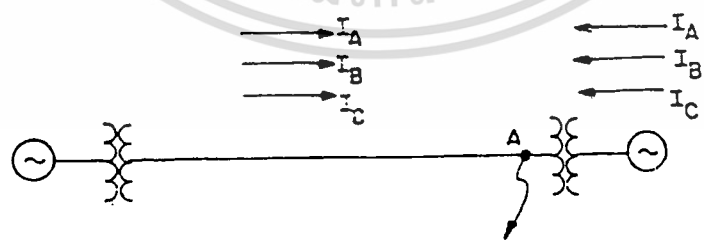
เบ็ดเวิร์คศูนย์

สมมติเกิดลัดวงจร เฟส-เฟส-ดิน ที่จุด A



การต่อเบ็ดเวิร์คแทนการเกิดลัดวงจรแบบเฟส-เฟส-ดิน ที่จุด A และคำนวณหากระแสและศักย์ไฟฟ้าลัดวงจรที่จุดต่างๆ ของเบ็ดเวิร์คทั้งสาม

ใช้องค์ประกอบสมมาตรแปลงกระแส และศักย์ไฟฟ้าลัดวงจรที่จุดต่างๆ



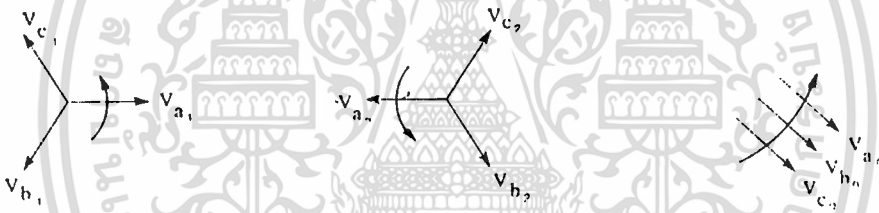
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแสดงหลักการการใช้องค์ประกอบสมมาตรในการคำนวณกระแสลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 โครงสร้างของเฟสเซอร์ไม่สมมาตรจากองค์ประกอบสมมาตร

งานวิจัยของ Fortescue พิสูจน์ให้เห็นว่าระบบไม่สมมูลย์ของเฟสเซอร์สัมพันธ์  $n$  สามารถแก้ปัญหาให้ระบบเฟสเซอร์สมมูลย์  $n$  ที่เรียกว่า องค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์เริ่มต้น (the symmetrical components of the original phasors) ได้โดยที่เฟสเซอร์  $n$  ของชุดองค์ประกอบแต่ละชุดมีขนาดและมุมระหว่างเฟสเซอร์แต่ละชุดเท่ากัน แม้ว่าวิธีการนำมาใช้กับระบบโพลีเฟสไม่สมมูลย์ (Unbalanced polyphase system) ได้ แต่เราจะอธิบายถึงระบบสามเฟสเท่านั้น

ตามทฤษฎีของ Fortescue เฟสเซอร์ไม่สมมูลย์ 3 เฟสเซอร์ ของระบบ 3 เฟส สามารถแก้ปัญหาให้ระบบเฟสเซอร์สมมูลย์ 3 ระบบได้ โดยที่เฟสเซอร์ไม่สมมูลย์ในระบบ 3 เฟส สามารถแยกเป็นระบบเฟสเซอร์สมมูลย์ออกได้ เป็นองค์ประกอบลำดับบวก, องค์ประกอบลำดับลบ และองค์ประกอบลำดับศูนย์ ดังรูปที่ 2.4



(ก) ส่วนประกอบลำดับบวก (ข) ส่วนประกอบลำดับลบ (ค) ส่วนประกอบลำดับศูนย์

รูปที่ 2.4 เฟสเซอร์ส่วนประกอบสมมาตรของสามเฟสเซอร์ไม่สมมูลย์

1. ส่วนประกอบลำดับบวก (positive-sequence component) ดังรูปที่ 2.4 (ก) เลขห้อยท้าย 1 ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน ระยะห่างแต่ละเฟส  $120^\circ$  เรียงลำดับเฟสเช่นเดียวกับเฟสเซอร์เดิม ส่วนประกอบลำดับบวกจะหมุนตามเข็มนาฬิกา หมุนตามลำดับเฟส abc

2. ส่วนประกอบลำดับลบ (negative-sequence component) ดังรูปที่ 2.4 (ข) เลขห้อยท้าย 2 ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน ระยะห่างแต่ละเฟส  $120^\circ$  เรียงลำดับตรงกันข้ามกับเฟสเซอร์เดิม ส่วนประกอบลำดับลบ จะหมุนกลับลำดับเฟสกับทิศทางเดิม acb

3. ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero-sequence component) ดังรูปที่ 2.4 (ค) เลขห้อยท้าย 0 ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน มีทิศทางไปทางเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละเฟสเซอร์ไม่สมดุลเดิมเป็นผลรวมของส่วนประกอบเฟสเซอร์เดิมในสมการดังนี้

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\ V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 2.1$$

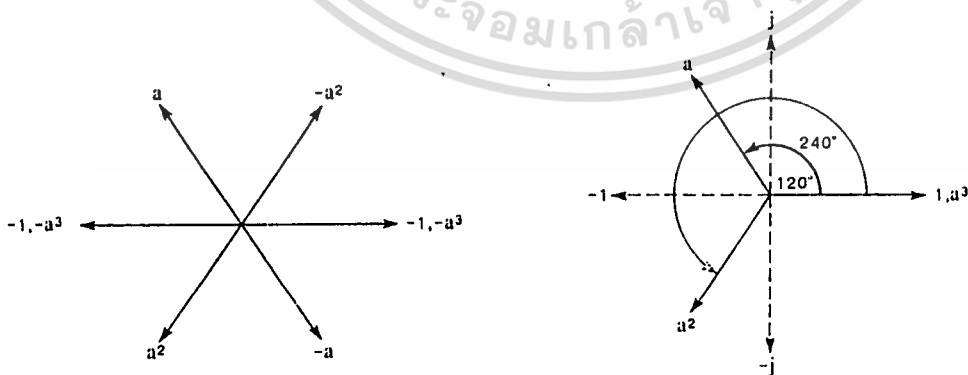
**2.3 โอเปอเรเตอร์ (OPERATOR)**

เนื่องจากเฟสเซอร์องค์ประกอบสมมาตรของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟสห่างกัน 120° ผลการคูณจำนวนเชิงซ้อน 2 จำนวน เป็นผลคูณของขนาดและผลรวมของมุมนั้น ถ้าจำนวนเชิงซ้อนที่แสดงเฟสคูณด้วยจำนวนเชิงซ้อนของขนาดยูนิต และมุม  $\theta$  แล้วจำนวนเชิงซ้อนผลลัพธ์จะแสดงเฟสเซอร์ได้เท่ากับเฟสเซอร์เริ่มต้นที่ห่างจากมุม  $\theta$

จำนวนเชิงซ้อนของขนาดยูนิตและมุมที่เชื่อมโยง  $\theta$  นี้ เป็นโอเปอเรเตอร์ที่หมุนเฟสเซอร์ซึ่งมันทำงานอยู่ตามมุม  $\theta$

เราได้คุ้นเคยกับโอเปอเรเตอร์  $j$  ที่ทำให้การหมุนตามเป็นมุม 90° และโอเปอเรเตอร์  $-1$  ที่ทำให้การหมุนตามเป็นมุม 180° มาแล้ว จะเห็นว่าโอเปอเรเตอร์  $j$  ทำให้การหมุนเป็นมุม + 90° ซึ่งได้  $j \times j$  เป็น 180° และ  $j^2$  เท่ากับ  $-1$  ส่วนกำลังไฟฟ้าอื่นของโอเปอเรเตอร์  $j$  หาได้จากการวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกัน

โดยทั่วไปแล้วตัวอักษร  $a$  ใช้แสดงโอเปอเรเตอร์ที่ทำให้การหมุนเป็นมุม 120° ขนาดจำนวนค่าเชิงซ้อนและมุม  $\theta$  เป็นค่าโอเปอเรเตอร์หมุนตามเฟสเซอร์ ดังรูปที่ 2.5



(ก) a โอเปอเรเตอร์

(ข) j โอเปอเรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 2.5** สำโอะแคะแคะมเฟสเซอร์ของโอเปอเรเตอร์  $a$  และ  $j$  นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 (ข)

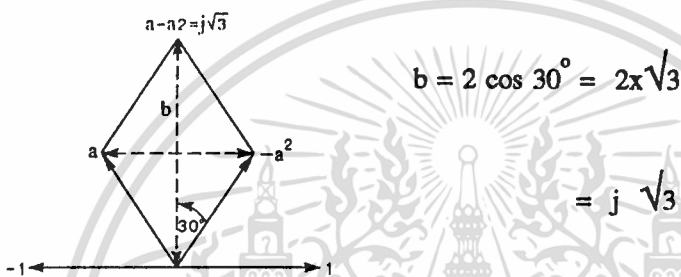
$$a = 1 \angle 120^\circ = 1 (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) = -0.5 + j 0.866$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = 1 (\cos 240^\circ + j \sin 240^\circ) = -0.5 - j 0.866$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ = 1$$

$$a^4 = 1 \angle 120^\circ = a = -0.5 + j 0.866$$

$$a^4 - a^2 = a - a^2 = j \sqrt{3} \text{ ดังรูปที่ 2.6}$$

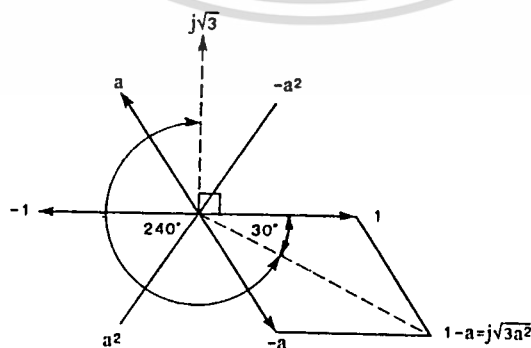


รูปที่ 2.6  $a - a^2$  เป็น  $j$  โอเปอเรเตอร์มีค่า  $j \sqrt{3}$

$$a^2 - a = -j \sqrt{3}$$

$$1 + a = -a^2 = -(-0.5 - j0.866) = 0.5 + j0.866$$

$$1 - a = 1 - (-0.5 - j0.866) = 0.5 + j0.866 = 1.732 \angle 30^\circ = j \sqrt{3} a \angle 240^\circ = j \sqrt{3} a \text{ ดังรูปที่ 2.7}$$

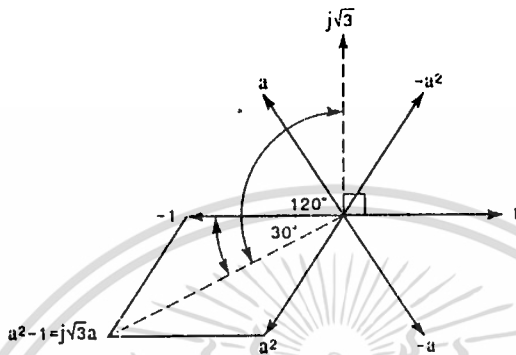


รูปที่ 2.7  $1 - a$  เป็น  $j$  โอเปอเรเตอร์มีค่า  $j \sqrt{3} a$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a^2 - 1 = (-0.5 - j0.866) - 1 = -1.5 - j0.866 = 1.732 \angle 30^\circ = j \sqrt{3} \angle 120^\circ$$

$$= j \sqrt{3} a \text{ ดังรูปที่ 2.8}$$



รูปที่ 2.8  $a^2 - 1$  เป็น  $j$  โอเปอเรเตอร์ มีค่า  $j \sqrt{3} a$

**2.8.1 ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ไม่สมมาตร (symmetrical component of unsymmetrical phaser)** เพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ 2.10 เมื่อเทียบกับรูปที่ 2.35 จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 2.2$$

แทนค่าสมการที่ 2.2 ลงในสมการที่ 2.1 จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\ V_c &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 2.3$$

เขียนฟอร์มใหม่ในรูปของเมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} 1 & 1 \\ 1 & a^2 \\ 1 & a \end{matrix} \quad \text{เมื่อคูณลงเป็นบวก คูณขึ้นเป็นลบ}$$

$$\text{ดีเทอร์มิแนนต์ (determinant) } |A| = a^4 + a + a - (a^2 + a^2 + a^2)$$

$$= 3a - 3a^2$$

$$|A| = 3(a - a^2)$$

$$\text{ในรูปที่ 2.6 } a - a^2 = j \sqrt{3}$$

$$A = 3j \sqrt{3}$$

หาค่าโคแฟกเตอร์ (cofactor)

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 2.5$$

ค่าโคแฟกเตอร์เลขคู่เป็นบวกและเลขคี่เป็นลบ

$$A_{11} = \begin{bmatrix} a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} = a^4 - a^2 = a - a^2 = j \sqrt{3}$$

$$A_{12} = - \begin{bmatrix} 1 & a \\ 1 & a^2 \end{bmatrix} = - (a^2 - a) = a - a^2 = j \sqrt{3}$$

$$A_{13} = \begin{bmatrix} 1 & a^2 \\ 1 & a \end{bmatrix} = a - a^2 = j \sqrt{3}$$

$$A_{21} = - \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a & a^2 \end{bmatrix} = - (a^2 - a) = a - a^2 = j \sqrt{3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a^2 \end{bmatrix} = a^2 - 1 = j\sqrt{3}a$$

$$A_{23} = - \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a \end{bmatrix} = 1 - a = j\sqrt{3}a^2$$

$$A_{31} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \end{bmatrix} = a - a^2 = j\sqrt{3}$$

$$A_{32} = - \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a \end{bmatrix} = 1 - a = j\sqrt{3}a^2$$

$$A_{33} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a^2 \end{bmatrix} = a^2 - 1 = j\sqrt{3}a$$

แทนค่าโคแฟกเตอร์ A ลงในสมการที่ 2.5

$$\text{โคแฟกเตอร์ } A \begin{bmatrix} j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3} \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3}a^2 \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3}a \end{bmatrix}$$

โคแฟกเตอร์ A ทรานสโพส (cofactor A transpose) เปลี่ยนโรว์เป็นคอลัมน์และจากคอลัมน์เป็นโรว์

$$A^T \begin{bmatrix} j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3} \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3}a^2 \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3}a \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์สเมตริกซ์ (inverse matrix)

$$A^{-1} = \frac{A^T}{|A|} = \frac{1}{3j\sqrt{3}} \begin{bmatrix} j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3} \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3}a^2 \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3}a \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} = \frac{j\sqrt{3}}{3j\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 2.6$$

จากสมการที่ 2.4 เมื่ออินเวอร์สเมตริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 2.7$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c) \quad \dots\dots\dots 2.8$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  $V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$  ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามสามารถหาในเทอมของกระแสได้เช่นกัน ในสมการที่ 2.4

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{..... 2.9}$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{..... 2.10}$$

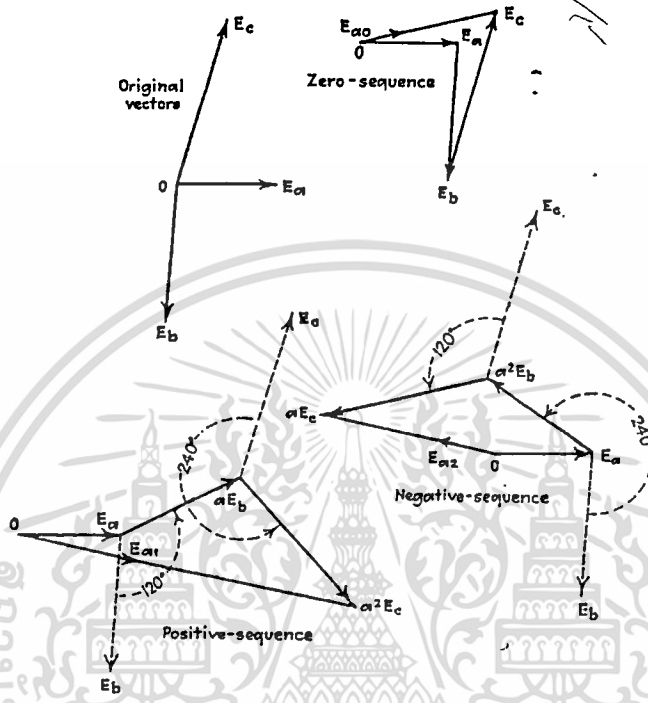
$$I_{a1} = \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2I_c)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2I_b + aI_c) \quad \text{..... 2.11}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.8 สามารถแสดงการรวมเฟสเซอร์ ขององค์ประกอบสมมาตรได้  
 ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การรวมเฟสเซอร์ขององค์ประกอบสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การวัดองค์ประกอบสมมาตร (Measurement of Symmetrical Components)

ในการวัดองค์ประกอบสมมาตร สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือในการวัด (Instrument or meter) ทำการวัดในวงจร (Network) เหมือนกับปริมาณพวกกระแส (Current) โวลต์เตจ (Voltage) กำลังงานไฟฟ้า (Power) ทั่ว ๆ ไป โดยเป็นการวัดแบบรวมปริมาณซีเควิน (Sequence Quantities) ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งแยกเป็นองค์ประกอบลำดับบวก, องค์ประกอบลำดับลบ, และองค์ประกอบ ลำดับศูนย์

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวัดนั้น ได้มีการเสนอหลักการวิธีการและวงจรที่ใช้ในการวัด โดย Fortescue Chubb และ Slepian หลังจากนั้น R.D. Evans ได้ศึกษาหลักการดังกล่าว และได้เสนอแนะเพิ่มเติมซึ่งในปริญญาณิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงวิธีการดังกล่าวเฉพาะที่ใช้วัดปริมาณ โวลต์เตจและกระแส เท่านั้น

### 2.4.1 การวัดปริมาณโวลต์เตจ (Measurement of Sequence voltage) โดยจะแยกวัดเป็นส่วนองค์ประกอบลำดับต่าง ๆ

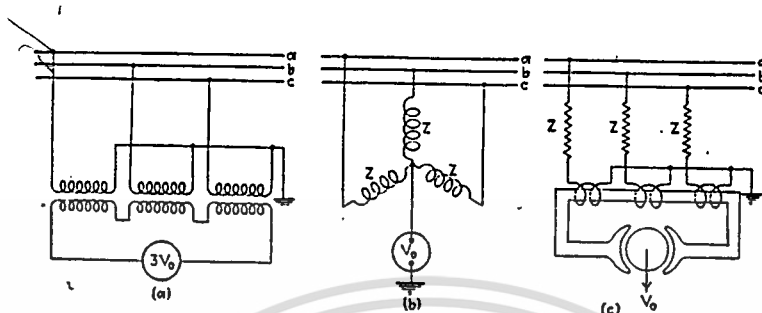
- โวลต์เตจลำดับศูนย์
- โวลต์เตจลำดับบวก
- โวลต์เตจลำดับลบ

#### 2.4.1.1 การวัดโวลต์เตจลำดับศูนย์ (Measurement of zero sequence voltage)

โวลต์เตจลำดับศูนย์

$$V_{ao} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$$

ซึ่งเป็นการวัดค่า โดยค่าที่ได้เป็นหนึ่งในสามของผลรวมของแรงดันในแต่ละเฟส (One - third of the sum of the three line - to - neutral voltage) ซึ่งมีวิธีการวัดหลายวิธี ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วิธีการวัดโวลต์เตจลำดับศูนย์

รูปที่ 2-10 (a), (c) = เป็นการวัดค่าหนึ่งในสามของผลรวมแรงดันในแต่ละเฟส

รูปที่ 2-10 (b) = เป็นการวัดค่าโวลต์เตจระหว่างจุดต่อร่วมกับนิวตรอน (between the star point and neutral or ground)

2.4.1.2 การวัด โวลต์เตจลำดับบวกและโวลต์เตจลำดับลบ

(Measurement of Positive and Negative - Sequence Voltage)

โวลต์เตจลำดับบวก

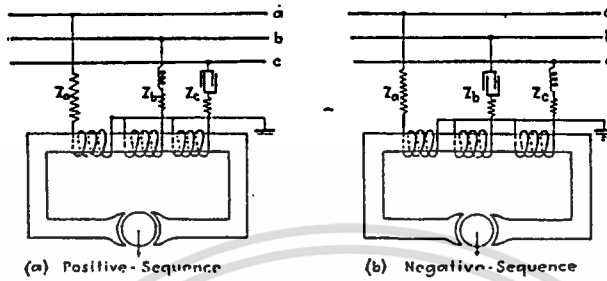
$$V_{a_1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c)$$

โวลต์เตจลำดับลบ

$$V_{a_2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c)$$

จะเห็นว่าจากสมการข้างบนมีการเลื่อนเฟส (Phase shift) เข้ามาเกี่ยวข้องกับ 1, a, a<sup>2</sup> ซึ่งเป็นมุมเฟส (Phase angle) 0, 120 240 องศา ตามลำดับ ซึ่งในการเลื่อนมุมเฟสต่าง ๆ โดยการใช้ค่าความต้านทาน (Resistance) เพื่อเลื่อนมุมเฟสไป 0 องศา และใช้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ในการเลื่อนมุมเฟส 120 และ 240 องศา วงจรที่ใช้ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Positive-Sequence

(b) Negative-Sequence

General Relations

$$\begin{aligned} Z_h &= Z_a e^{+j90^\circ} \\ Z_e &= Z_a e^{-j90^\circ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_h &= Z_a e^{-j90^\circ} \\ Z_e &= Z_a e^{+j90^\circ} \end{aligned}$$

Typical Values

$$\begin{aligned} Z_a &= R \\ Z_h &= R(0.5 + j0.866) \\ Z_e &= R(0.5 - j0.866) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_a &= R \\ Z_h &= R(0.5 - j0.866) \\ Z_e &= R(0.5 + j0.866) \end{aligned}$$

Phase rotation  $a b c$   
for positive-sequence voltage:



รูปที่ 2.11 วิธีการวัดโวลต์เตจลำดับบวกและลบสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย

จากรูปค่าที่อ่านได้

$$I_m = [E_a/Z_a] - [E_b/Z_b] - [E_c/Z_c] \quad \text{----- 2.12}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการโวลต์เตจลำดับบวก

$$V_{a_1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c)$$

ซึ่งจะได้ค่าความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสที่จะใช้กับวงจรในการวัด

$$Z_b = Z_a e^{+j60^\circ}$$

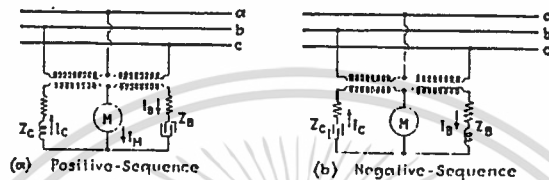
$$Z_c = Z_a e^{-j60^\circ} \quad \text{----- 2.13}$$

และสำหรับการวัดโวลท์เตจลำดับลบก็ได้หลักการเดียวกัน แต่ค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้

$$Z_b = Z_{ae}^{-j60}$$

$$Z_c = Z_{ae}^{+j60}$$

----- 2.14



General Relation

$$Z_c = aZ_b \qquad Z_n = aZ_c$$

Typical Values

$$Z_n = R(0.500 - j0.866)$$

$$Z_c = R(0.500 + j0.866)$$

$$Z_n = R(0.500 + j0.866)$$

$$Z_c = R(0.500 - j0.866)$$

Phase rotation a b c  
for positive-sequence voltage

รูปที่ 2.12 วิธีการวัดโวลท์เตจลำดับบวกและลบสำหรับระบบ 3 เฟส 3 สาย

### 2.4.2 การวัดปริมาณกระแส (Measurement of Sequence Current)

สามารถแยกชนิดการวัดได้เป็น

- กระแสลำดับศูนย์
- กระแสลำดับบวก
- กระแสลำดับลบ

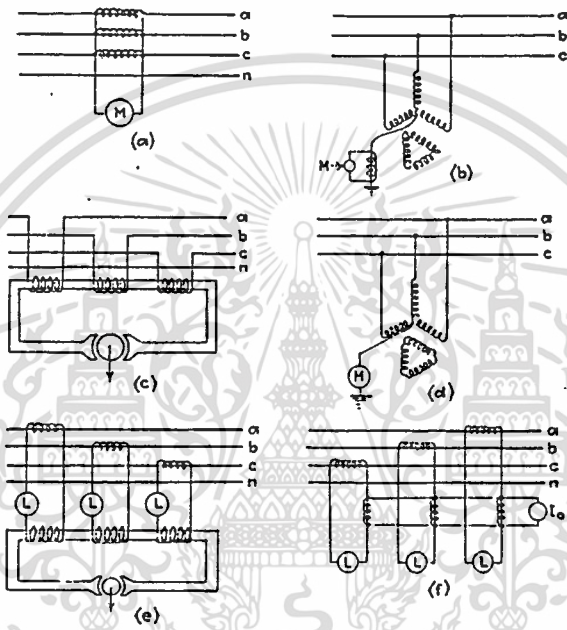
#### 2.4.2.1 การวัดกระแสลำดับศูนย์ (Measurement of Zero Sequence Current)

ในการวัดมีหลายวิธีให้เลือกได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยวิธีการวัด เป็นการวัดแบบค่าที่ได้เป็นค่าหนึ่งในสามของผลรวมกระแสในแต่ละไลน์ (one-third of the sum of the line currents) ดังรูปที่ 2.13 (a), (c), (e) และ (f)

อีกวิธีหนึ่งเป็นการวัดค่ากระแสในไลน์นิวทรัล (the neutral or ground current) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (b), (d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{a_0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c)$$



รูปที่ 2.13 วิธีการวัดกระแสลำดับศูนย์

4.2.2.2 การวัดกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับลบ

(Measurement of Positive Negative Sequence current)

จากกระแสลำดับบวก

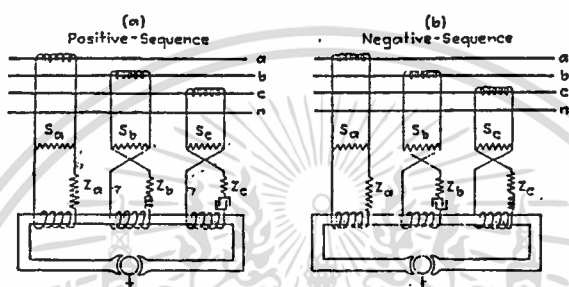
$$I_{a_1} = \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2 I_c)$$

กระแสลำดับลบ

$$I_{a_2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 3 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะหาได้จากกระแสในแต่ละไลน์ (line current) โดยมีการเลื่อนมุมเฟส  
เข้ามาเกี่ยวข้อง 1, a, a<sup>2</sup> ซึ่งหมายถึงมุมเฟส 0, 120, 240 องศา ตามลำดับ โดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์เข้า  
มาช่วยในการเลื่อนมุมเฟส



General Relation

$$\frac{S_b}{Z_b + S_b} = \frac{S_a}{Z_a + S_a} e^{+j60^\circ} \quad \frac{S_b}{Z_b + S_b} = \frac{S_a}{Z_a + S_a} e^{-j120^\circ}$$

$$\frac{S_c}{Z_c + S_c} = \frac{S_a}{Z_a + S_a} e^{-j120^\circ} \quad \frac{S_c}{Z_c + S_c} = \frac{S_a}{Z_a + S_a} e^{+j120^\circ}$$

Typical Values

$$\frac{S_a}{Z_a + S_a} = K e^{j0^\circ} \quad \frac{S_a}{Z_a + S_a} = K e^{j0^\circ}$$

$$\frac{S_b}{Z_b + S_b} = K e^{j120^\circ} \quad \frac{S_b}{Z_b + S_b} = K e^{-j120^\circ}$$

$$\frac{S_c}{Z_c + S_c} = K e^{-j120^\circ} \quad \frac{S_c}{Z_c + S_c} = K e^{+j120^\circ}$$

Phase rotation a b c  
for positive-sequence voltage



รูปที่ 2.14 วิธีการวัดกระแสลำดับบวกและลบในระบบ 3 เฟส 4 สาย

จากรูป 
$$I_M = \begin{bmatrix} S_a \\ Z_a + S_a \end{bmatrix} I_a - \begin{bmatrix} S_b \\ Z_b + S_b \end{bmatrix} I_b - \begin{bmatrix} S_c \\ Z_c + S_c \end{bmatrix} I_c \dots\dots\dots 2.15$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $Z_a, Z_b, Z_c$  เป็นอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสเพื่อใช้ในการเลื่อนมุมเฟสในแต่ละเฟส  
 $S_a, S_b, S_c$  เป็นอิมพีแดนซ์ที่ขนาน  $Z_a, Z_b, Z_c$  ตามลำดับ  
 $K_a, K_b, K_c$  เป็นค่าคงที่ของกระแสในแต่ละเฟส

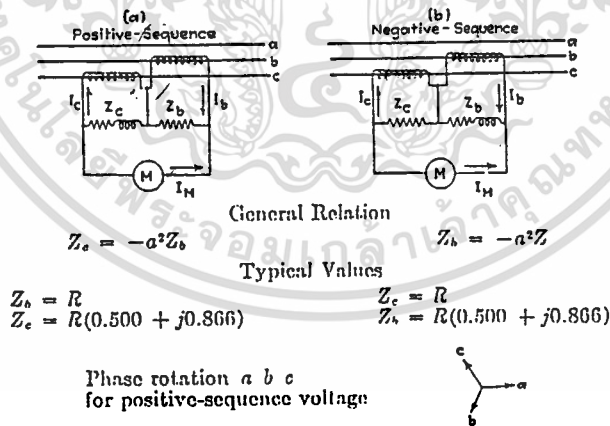
จะได้  $I_M = K_a I_a - K_b I_b - K_c I_c$  ----- 2.16

สำหรับการวัดกระแสลำดับบวกนั้น

$$\begin{aligned} K_a &= K \\ K_b &= -aK = Ke^{-j60} \\ K_c &= -a^2 K = Ke^{+j60} \end{aligned}$$
 ----- 2.17

สำหรับการวัดกระแสลำดับลบ

ก็ใช้หลักการและวิธีการเดียวกันเพียงแต่เปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ในสาขา (Impedance branches)  $Z_b$  และ  $S_b$  กับ  $Z_c$  และ  $S_c$  ซึ่งทำให้กระแสในสาขา  $b$  และ  $c$  มีการเลื่อนมุมเฟสตรงข้ามกัน เมื่อเทียบกับการวัดกระแสลำดับบวก



รูปที่ 2.15 วิธีการวัดกระแสลำดับบวกและลบ ในระบบ 3 เฟส 3 สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากหลักการวัดปริมาณกระแสและโวลต์ตรงที่กล่าวมาแล้วนั้น มีเงื่อนไขในการใช้งาน  
มากเช่น

- โดยการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ เป็นตัวทำหน้าที่เลื่อนเฟส

ใช้ความต้านทานกับอินดักเตอร์ทำหน้าที่เลื่อนมุมเฟสไป 120 องศา

ใช้ความต้านทานกับคาปาซิเตอร์หน้าที่เลื่อนมุมเฟสไป 240 องศา

- ค่าความต้านทาน อินดักเตอร์ คาปาซิเตอร์ หรืออิมพีแดนซ์ต้องมีคุณสมบัติเหมือนกัน  
ทุกประการและค่าที่ใช้จะแตกต่างกันไม่ได้

- การรวมกันโดยใช้แกนเหล็กเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้เกิดการสูญเสียเกี่ยวกับแกนเหล็กทำให้  
ผลรวมเกิดผิดพลาดได้ง่าย

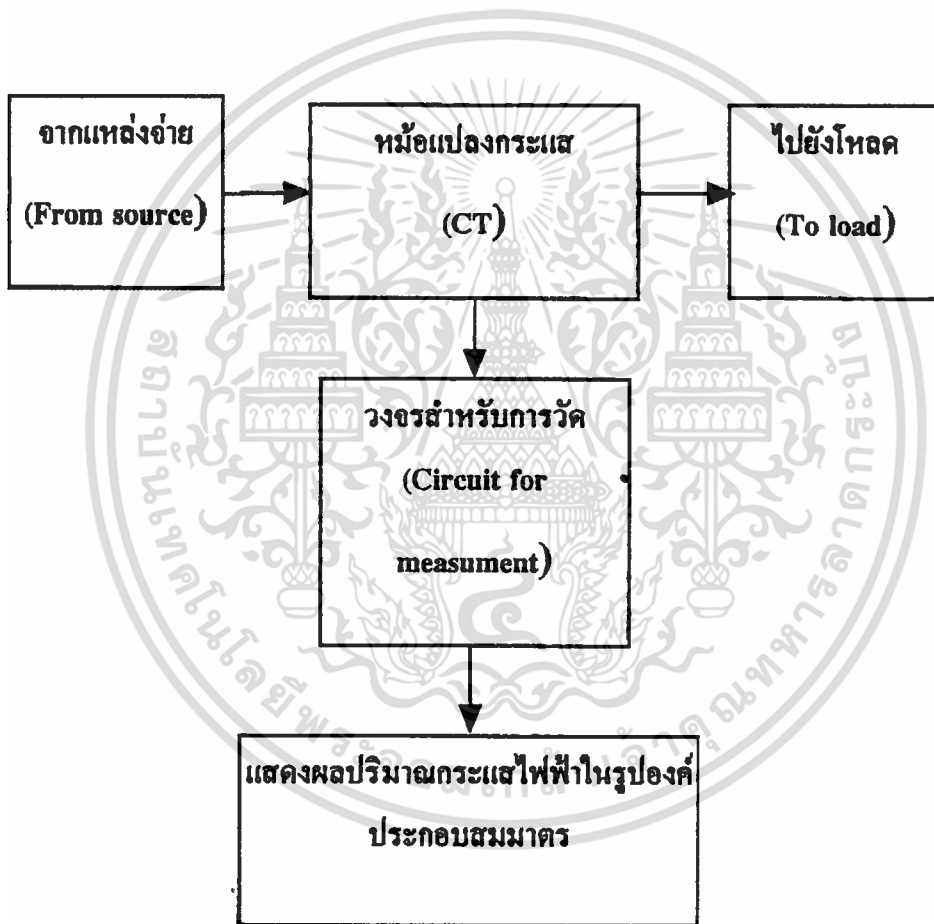
ดังนั้น ในปริยญาณิพนธ์เล่มนี้จะไม่ใช่วิธีการดังกล่าวในการหาค่าต่าง ๆ โดยจะใช้พวก  
อุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาแทน เช่น พวกวงจร เลื่อนมุมเฟส วงจรการบวกสัญญาณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 แนวทางในการสร้างเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

การออกแบบสร้างเครื่องวัดในปริมาณหนึ่งจะมุ่งเน้นการออกแบบสร้างในส่วนการวัดปริมาณของกระแสเท่านั้น หลักการในการออกแบบเบื้องต้นโดยจำลองจากสมการพื้นฐานขององค์ประกอบสมมาตรมาเป็นแนวในการคิดออกแบบสำหรับแนวทางในการวัดปริมาณของกระแสในรูปขององค์ประกอบสมมาตรทางไฟฟ้า นั้น แสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูป



รูปที่ 2.16 รูปบล็อกไดอะแกรมสำหรับการวัดปริมาณกระแสในรูปองค์ประกอบสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบล็อกไดอะแกรมอธิบายหน้าที่ของแต่ละบล็อกได้ดังนี้

### 2.5.1 บล็อกหม้อแปลงกระแส ซึ่งจะต่ออนุกรมกับวงจรที่จะวัด

กระทำการหน้าที่ลดระดับกระแสให้มีระดับต่ำลง เพื่อความเหมาะสมและปลอดภัย สำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มาต่อรวมในขั้นตอนถัดไป โดยขดทุติยภูมิจะจ่ายกระแส โดยเป็นส่วนร่วมกับกระแสทางขดปฐมภูมิ

ถ้า อัตราส่วนการแปลงของ ซีที  $K = \frac{\text{กระแสด้านปฐมภูมิ}}{\text{กระแสด้านทุติยภูมิ}}$

ดังนั้นลักษณะของกระแสที่ไหลเข้าและไหลออกจากซีที จะเป็น



$$Ia' = Ia / K$$

รูปที่ 2.17 แสดงปริมาณกระแสไหลเข้าไหลออกของซีที

### 2.5.2 บล็อกวงจรสำหรับการวัด ซึ่งจะต่อรับปริมาณทางไฟฟ้า

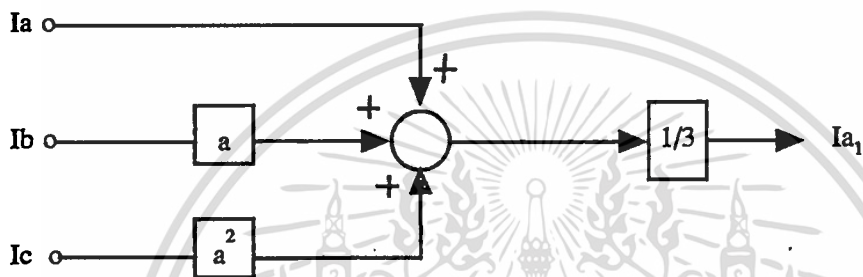
จาก ซีที จะทำหน้าที่จัดการปริมาณไฟฟ้า หรือจัดการแยกปริมาณไฟฟ้าที่ ต้องการจะวัด สำหรับในเครื่องวัดปริมาณองค์ประกอบสมมาตรนี้ จะทำหน้าที่แยกกระแสที่จะวัดปริมาณเป็นองค์ประกอบลำดับบวก, องค์ประกอบลำดับลบ, องค์ประกอบ ลำดับศูนย์ออกจากกันและกัน

โดยในบล็อกนี้จะจำลองเครื่องวัดปริมาณต่าง ๆ จากสมการที่ใช้คำนวณหาค่าปริมาณนั้น ๆ โดยแยกเป็น

### กระแสลำดับบวก (Positive Sequence Current)

$$I_{a_1} = \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2I_c)$$

โดยอาศัยสมการดังกล่าวจำลองเป็นบล็อกไดอะแกรมในการวัดได้ดังนี้

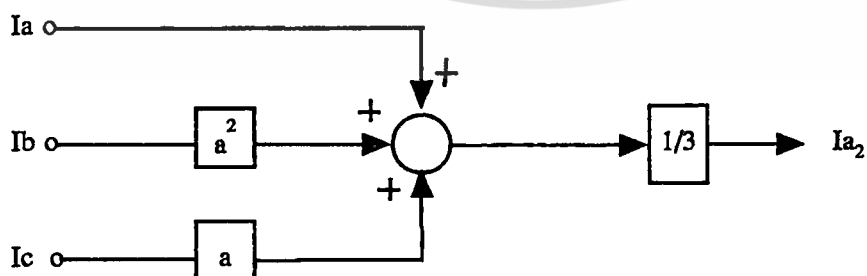


รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรม สำหรับการวัดกระแสลำดับบวก

### กระแสลำดับลบ (Negative Sequence Current)

$$I_{a_2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2I_b + aI_c)$$

เขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้



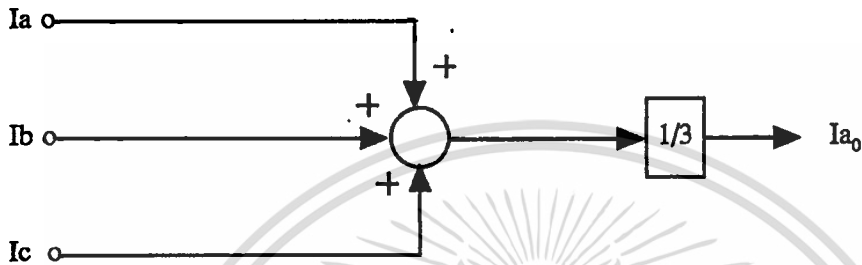
รูปที่ 2.19 บล็อกไดอะแกรม สำหรับการวัดกระแสลำดับลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current)

$$I_{a_0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c)$$

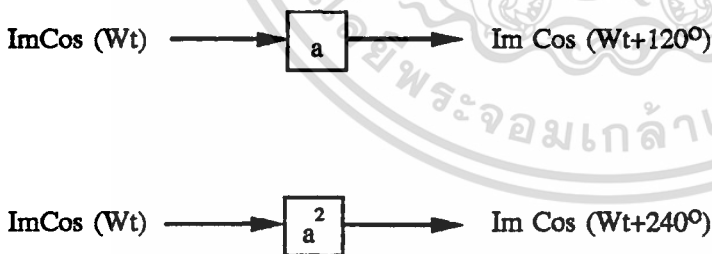
เขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมดังนี้



รูปที่ 2.20 บล็อกไดอะแกรม สำหรับวัดกระแสลำดับศูนย์

จากบล็อกไดอะแกรมสำหรับการวัดนั้นยังมีบล็อกที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

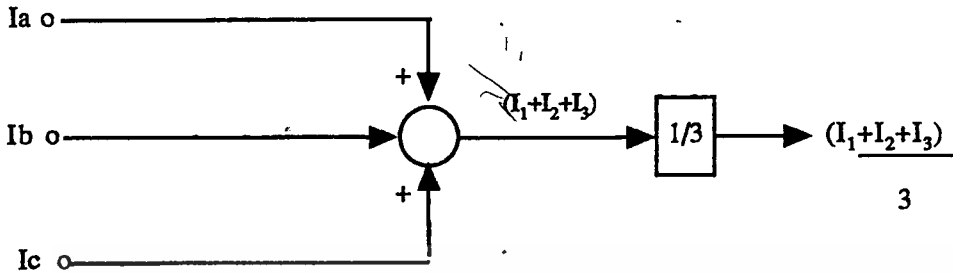
### 2.5.3 บล็อกเลื่อนมุมเฟส (Shift Phase) $+120^\circ, +240^\circ$



รูปที่ 2.21 บล็อกไดอะแกรม การเลื่อนมุมเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 บล็อกการรวมสัญญาณ (Summing)



รูปที่ 2.22 บล็อกไดอะแกรมการรวมสัญญาณ

2.5.5 บล็อกแสดงผลปริมาณกระแสองค์ประกอบสมมาตร

ซึ่งโครงสร้างภายในจะเป็นวงจรที่สามารถแสดงผลเป็น ค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของปริมาณองค์ประกอบสมมาตรโดยแยกเป็น กระแสลำดับบวกกระแสลำดับลบ, กระแสลำดับศูนย์

2.6 ส่วนประกอบที่ใช้ในเครื่องวัดองค์ประกอบสมมาตรทางไฟฟ้า

2.6.1 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transformer)

หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าหรือเรียกสั้น ๆ ว่า CT ทำหน้าที่ แปลงกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูง ๆ ให้ลดต่ำลง หรืออาจจะแปลงกระแสไฟฟ้าต่ำให้สูง ขึ้นก็ได้

2.6.1.1 โครงสร้างและวงจรการต่อหม้อแปลงกระแส ไฟฟ้า

ทางด้านขดลวดปฐมภูมิ ของหม้อแปลงกระแส ไฟฟ้าชั้น K-L ให้ต่ออนุกรมกับไลน์ (Line) ของระบบไฟฟ้าหรือภาระไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมินี้ เป็นกระแสไฟฟ้าตามภาระไฟฟ้า ซึ่งไม่ได้ขึ้นอยู่กับวงจรการวัดทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าพิกัดกระแสไฟฟ้าทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าจะถูกกำหนดให้เหมาะสมกับเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าและเครื่องวัดเพาเวอร์แฟกเตอร์ ซึ่งมักจะให้พิกัดกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดกระแสไฟฟ้า(Current Coil) ของเครื่องวัดเหล่านี้ เท่ากับ 5 A ตัวอย่างเช่น 25/5 A, 5/5A และ 2.5/5A เป็นต้น นอกจากนั้น หม้อแปลงกระแสไฟฟ้ายังได้กำหนดให้มีพิกัดกระแสไฟฟ้า 1A ทางขดลวดทุติยภูมิด้วย

สัดส่วนกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า 5/5A ใช้สำหรับการที่ต้องการแยกวงจรการวัดให้ออกจากระบบของแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงๆ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับตัวเครื่องวัดและบุคลากร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.1.2 หลักการทำงาน

เมื่อให้ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าต่อตัววงจร แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วลวดวงจรมีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อไม่คำนึงถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมภายในขดลวดนี้ รวมทั้งแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีค่าต่ำมาก ( $\approx 0$ ) จึงสามารถบอกได้ว่าที่แกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้ามีเส้นแรงแม่เหล็กน้อยมาก ( $\approx 0$ ) ดังนั้นผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force)  $\theta$  ในวงจรแม่เหล็กนี้จึงเท่ากับศูนย์

$$\theta_1 - \theta_2 = 0$$

$\theta_1$  : แรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดลวดปฐมภูมิ  $I_1 N_1$

$\theta_2$  : แรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดลวดทุติยภูมิ  $I_2 N_2$

$$I_1 N_1 - I_2 N_2 = \theta$$

$$\therefore \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = a_i \text{ อัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า}$$

กระแสไฟฟ้า  $I_2$  ทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ถ้าคูณด้วย  $a_i$  ให้เท่ากับ  $I_2$  ควรจะเท่ากับ  $I_1$  แต่ความเป็นจริงของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าจะต้องมีเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi_N$  จำนวนน้อย ๆ ที่แกนเหล็ก ( $\theta_1 - \theta_2 \neq 0$ ) เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำ ๆ ที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า จึงจะมีกระแสไฟฟ้า  $I_2$  เกิดขึ้นได้ และ  $\phi_N$  ได้จากผลต่างทางเวกเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดทั้งสอง :

$$\phi_1 - \phi_2 = \phi_N$$

และแรงเคลื่อนแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าเป็น

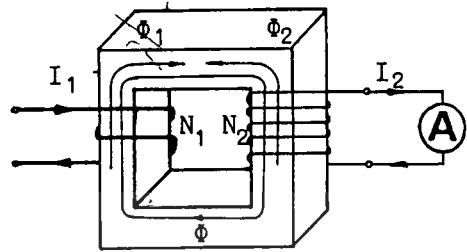
:

$$\phi_1 - \phi_2 = \phi_N$$

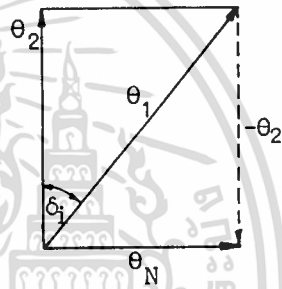
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเวกเตอร์ไดอะแกรมรูป 15.2.1 แสดงผลต่างของ  $\phi_1$  และ  $\phi_2$  จะได้เป็น  $\phi_N$  ซึ่งค่า  $\phi_N$  นี้ แสดงเป็นความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า :

$$\begin{aligned}
 f_{rel} &= \frac{\phi_1 \phi_2}{\phi_1} \times 100\% \\
 &= \frac{I_2 N_2 - I_1 N_1}{I_1 N_1} \times 100\% \\
 &= \frac{N_2 \cdot I_2 - I_1}{N_2} \times 100\% \\
 &= \frac{a_i \cdot I_2 - I_1}{I_1} \times 100\%
 \end{aligned}$$



ก



รูป 2.23 ก) โครงสร้างของไฟฟ้า  
 ข) เวกเตอร์ไดอะแกรมของ  
 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก  
 หม้อแปลงกระแส  
 ภายในแกนเหล็ก

**สภาพขั้วหม้อแปลง แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ**

(ก) สภาพขั้วหักล้าง (Subtractive Polarity) หมายถึง การที่หม้อแปลงซึ่งเมื่อกำหนดให้ทางค้ำานปฐมภูมิมีกระแสไหลเข้าที่ขั้วใดขั้วหนึ่งแล้ว ก็จะมีกระแสไหลออกทางค้ำานทุติยภูมิที่ขั้วตรงกันดังรูปที่ 2.20 (ก)

(ข) สภาพขั้วเสริม (additive Polarity) หมายถึง การที่หม้อแปลงซึ่งเมื่อกำหนดขั้วให้ทางค้ำานปฐมภูมิมีกระแสไหลเข้าที่ขั้วใดขั้วหนึ่ง ทางค้ำานทุติยภูมิก็จะมีกระแสไหลเข้าที่ขั้วตรงกันดัง

รูปที่ 2.23(ข) สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปหม้อแปลงกระแสจะเป็นชนิดสภาพขั้วหักล้าง โดยมีตัวอักษรและเครื่องหมายกำหนดไว้ที่ขั้วต่อสาย เช่น เครื่องหมาย "●" "□" แสดงไว้ ทั้งนี้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไหลเข้าและไหลออก ถ้าหากต่อขั้วของซีทีผิดขั้ว จะทำให้มิเตอร์อ่านผิดพลาด หรือหากถ้าใช้กับรีเลย์ด้วยแล้ว ยิ่งมีความสำคัญมาก ถ้าหากต่อผิดขั้วจะทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาด CT สำหรับสวิตช์เกียร์แรงสูงโดยทั่วไปทางด้านทุติยภูมิจะมี 2 แกน (core) คือแกนหนึ่งใช้สำหรับภาคเครื่องวัด และอีกแกนหนึ่งสำหรับภาครีเลย์ โดยปกติกระแสพิภักทางด้านทุติยภูมิเป็น 5A สำหรับงานมิเตอร์และรีเลย์ ส่วน CT ที่มีกระแสพิภักทางด้านทุติยภูมิเป็น 1A จะใช้เมื่อมีการเดินสายไปยังรีเลย์ไกลมาก ๆ ทั้งนี้เพื่อป้องกันแรงดันตกในสาย



รูปที่ 2.24 สภาพขั้วของหม้อแปลงกระแส

### 2.6.1.3 ผลของการเปิดวงจรขดลวดทุติยภูมิ

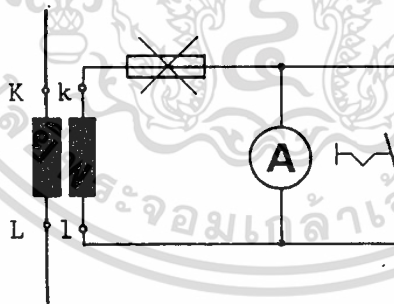
การใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ร่วมกับเครื่องวัดไฟฟ้า จะต้องคอยระวังไม่ให้เปิดวงจรทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าโดยเด็ดขาด ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายหรือเกิดผลเสียในการวัดได้ดังนี้ :

### ผลของการเปิดวงจรตลอดเวลา

ถ้าให้วงจรทางด้านขลวดทุติยภูมิเปิดออก โดยทางด้านขลวดปฐมภูมิต่ออยู่ภายใต้ภาระไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าทางด้านขลวดทุติยภูมิ  $I_2 = \theta_N$  จะทำให้ค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $\theta_N$  สูงขึ้นมาก จาก

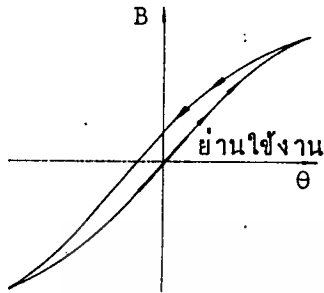
$$\begin{aligned}\theta_1 - \theta_2 &= \theta_N \\ \text{เมื่อ } I_2 &= \theta \\ \theta_2 &= 0 \\ \theta_N &= \theta_1\end{aligned}$$

จากสมการ  $\theta_N$  จะมีค่าประมาณ 20 เท่าของการใช้งานปกติและทำให้แกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงมาก จนถึงจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก เป็นผลให้ค่าสูญเสียของแกนเหล็ก จากกระแสไฟฟ้าไหลวนสูงขึ้นมากทำให้ฉนวนเคลือบระหว่างแผ่นเหล็กไหม้ได้ และจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลวนเพิ่มขนาดสูงขึ้นอีกจนทำให้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าเสียหาย



**รูป ๕.๒๔** การต่อขลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าจะต้องไม่มีอุปกรณ์ตัดวงจรเช่น ฟิวส์

## ผลของการเปิดวงจรชั่วขณะ



การตัดวงจรการวัดของขดลวดทุติยภูมิออกชั่วขณะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างที่แกนเหล็กเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis) และเมื่อต่อวงจรการวัดเข้าไปใหม่ ทำให้การเทียบกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้านี้ได้ค่าไม่ถูกต้องเนื่องจากแมกเนไตซ์เคิร์ฟ เลื่อนตำแหน่งไปแล้ว

### รูป 2.26 แสดงขอบเขตแมกเนไตซ์เคิร์ฟที่ถูกใช้งาน (เส้นทึบ)

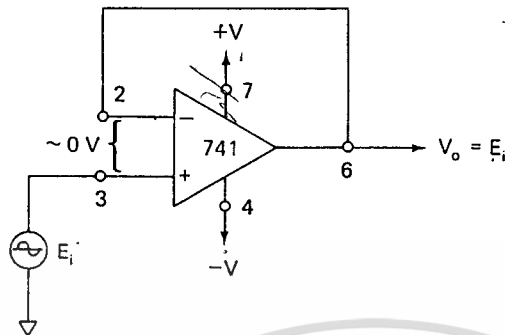
นอกจากนั้นขดลวดทุติยภูมิซึ่งมีจำนวนรอบสูงมาก เมื่อ  $\Phi_N = \Phi_1$  มีค่าประมาณ 20 เท่าของการใช้งานปกติซึ่งทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำปรากฏทางด้านขดลวดทุติยภูมิสูงมากในขณะที่เปิดวงจรไว้ แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ สามารถทำอันตรายต่อบุคลากรได้นอกจากนั้นขดลวดปฐมภูมิจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกับแรงเคลื่อนของระบบ ทำให้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าทำหน้าที่เหมือนโช๊ค (Choke) ตัวหนึ่งซึ่งต่ออยู่ในวงจรไฟฟ้า

#### 2.6.1.4 เบอร์เดน (Burden)

เบอร์เดน หมายถึงกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ถ้าอุปกรณ์ของเครื่องวัดทุกตัวที่ต่ออนุกรมกับขดลวดทุติยภูมิ มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในเครื่องวัดรวมกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายวัดมีค่าภายใต้เบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าแล้ว ผลการวัดจากความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า จะเป็นไปตามคลาสของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้านั้น

ความหมายของเบอร์เดนนั้น บางครั้งหมายถึงค่าความต้านทานที่จะนำมาต่อทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียไม่เกินเกินพิกัดเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

### 2.6.2 วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower)



รูปที่ 2.27 แสดงวงจรตามแรงดัน

วงจรในลักษณะนี้ จะสะท้อนค่าความต่างศักย์ที่ขาอินพุตให้ไปปรากฏเหมือนกันที่ขาเอาต์พุตของออปแอมป์ หรือมีการเลียนตามค่าแรงดันที่ขาอินพุตนั่นเอง

วงจรลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติการขยายเท่ากับ 1 เท่านั้น บางคนก็เรียกวงจรนี้ว่า บัฟเฟอร์ (Buffer) บางคนก็เรียกว่า Isolation amplifier และบางครั้งก็เรียกว่า Unity - gain amplifier ซึ่งเป็นการเรียกตามลักษณะของวงจร วงจรประเภทนี้จะป้อนสัญญาณ  $E_i$  เข้าทางขาอินพุตขาบวก เพื่อไม่ให้สัญญาณที่ออกมาทางด้านเอาต์พุตเกิดการกลับเฟส มีการลัดวงจรระหว่างด้านอินพุตขาลบและเอาต์พุตด้วย ซึ่งมีลักษณะของวงจรป้อนกลับแบบลบด้วยเช่นกัน

จากวงจร ความต่างศักย์ระหว่างขาอินพุต ทั้ง 2 เป็น 0 ดังนั้นแรงดันที่ขาลบ ซึ่งลัดวงจรอยู่กับเอาต์พุต จะเท่ากับที่ขาบวก ดังนั้น

$$V_o = E_i \quad \text{-----} \quad 2.18$$

เพราะฉะนั้นอัตราขยายของวงจรนี้เท่ากับ 1 ดังสมการที่ 2.19

$$A_{cl} = \frac{V_o}{E_i} \quad \text{-----} \quad 2.19$$

$$= 1$$

ข้อดีของวงจรตามแรงดันก็คือ มีความต้านทานทางด้านอินพุตของวงจรสูงมาก (เป็นเมกะโอห์ม) ทำให้ดึงกระแสจากแหล่งจ่ายไฟน้อยมาก

### 2.6.3 วงจรเลื่อนเฟส (Phase shifter)

วงจรเลื่อนเฟสจะเป็นวงจรที่ทำให้ขนาดของสัญญาณมีค่าคงที่ แต่เฟสเลื่อนตำแหน่งไป ตัวอย่างเช่น คลื่นรูปไซน์ (Sine wave) ที่มีความถี่เท่ากับ 1 kHz และค่าแรงดันขอดเท่ากับ 1 โวลต์ เป็นอินพุตให้กับวงจรเลื่อนเฟส ดังในรูปที่ 2.27 (a) แรงดันเอาต์พุต  $V_o$  จะมีความถี่และขนาดเท่ากับ  $E_i$  เดิม แต่จะตาม  $E_i$  อยู่ 90 องศา ดังนั้น  $V_o$  เปลี่ยนตำแหน่ง 0 โวลต์ ไปที่ 90 องศา หลังจากที  $E_i = 0$  ไปแล้วเมื่อเขียนอยู่ในรูปคณิตศาสตร์จะเขียนได้ว่า  $V_o = E_i \angle -90^\circ$  สมการรูปทั่วไปของแรงดันเอาต์พุตของวงจรเลื่อนเฟส ในรูปที่ 2.24 (b.) จะเป็นไปตามสมการที่ 2.20

$$V_o = E_i \angle -\theta \quad \text{----- 2.20}$$

โดยที่  $\theta$  เป็นมุมเฟส และจะหาได้จากสมการที่

ในการสร้างวงจรเลื่อนเฟส ดังรูปที่ 2.24 (b.) อุปกรณ์ที่ต้องการใช้มีเพียงออปแอมป์ 1 ตัว ตัวต้านทาน 3 ตัว และตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวเท่านั้นตัวต้านทาน  $R$  ทั้งสองจะต้องมีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ ตั้งแต่ 10 ถึง 220 กิโลโอห์ม ส่วนค่าของมุมเฟส  $\theta$  จะขึ้นอยู่กับ  $R_1, C_1$  และความถี่  $f$  ของ  $E_i$  ดังในสมการที่ 2.21

$$\theta = 2 \arctan 2\pi f R_1 C_1 \quad \text{----- 2.21}$$

เมื่อ  $\theta$  มีหน่วยเป็นองศา

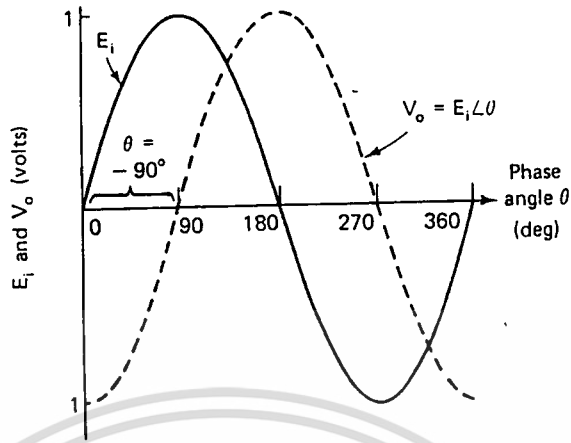
$f$  มีหน่วยเป็น  $\text{Hz}$

$R_1$  มีหน่วยเป็นโอห์ม

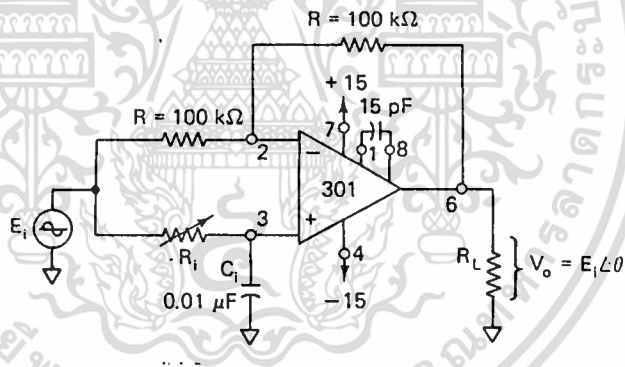
$C_1$  มีหน่วยเป็นฟาร์ด

จากสมการที่ 2.21 ถ้าเรารู้ค่าของมุมเฟสที่เราต้องการ การหาค่าของ  $R_1$  ทำได้โดยสมมติว่า  $C_1$  ขึ้นมาและหาค่า  $R_1$  จากสมการที่ 2.21 ดังนี้

$$R_1 = \frac{\tan(\theta/2)}{2\pi f C_1} \quad \text{----- 2.22}$$



ก. แรงดันอินพุตและเอาต์พุตสำหรับ  $-90^\circ$



ข. ลักษณะการต่อวงจรเลื่อนเฟส  
รูปที่ 2.28 แสดงวงจรเลื่อนเฟส

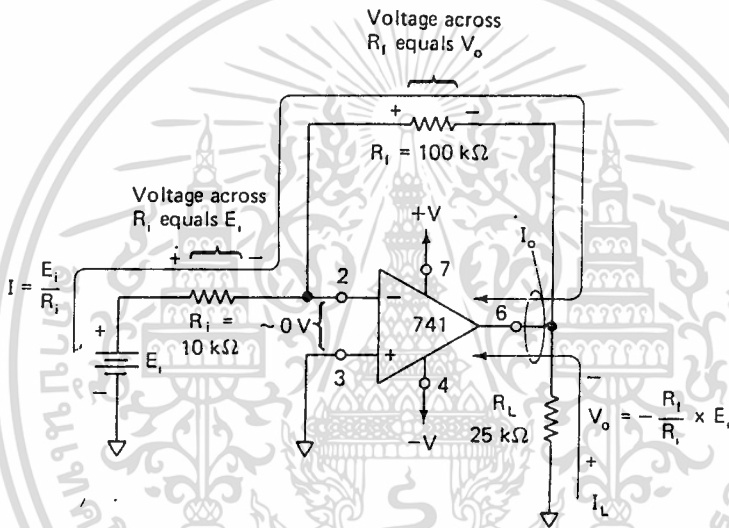
จากสมการที่ 2.21 เมื่อ  $R_i = 1/(2\pi f C_1)$ ,  $\theta$  จะเท่ากับ  $-90$  องศา ถ้าค่าของ  $R_i$  เปลี่ยนไปจาก 1 จนถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ จะทำให้  $\theta$  มีค่าได้ตั้งแต่  $-12$  ถึง  $-168$  องศา แต่ถ้าเราเปลี่ยนค่าของ  $R_i$  และ  $C_1$  ไปจนกระทั่ง  $\theta$  เกิน 180 องศา ( $-180$  องศา) จะทำให้มุมเฟสเป็นบวก ซึ่งหมายถึงว่า  $V_o$  นำหน้า  $E_i$  อยู่โดย  $V_o = E_i \angle (180^\circ - \theta)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 วงจรขยายแบบกลับเฟส (The Inverting Amplifier)

วงจรในรูป 2.28 เป็นวงจรขยายได้ทั้งสัณฐานการขยายแบบรูปปิด (Closed-loop gain ;  $A_{cl}$ ) จาก  $E_i$  ไปสู่  $V_o$  ขึ้นอยู่กับ  $R_f$  และ  $R_i$  เพื่อทำความเข้าใจกับวงจรแบบนี้ ขอยกข้อแนะนำมาเสนอ ดังนี้

1. ในกรณี  $V_o$  ไม่อิ่มตัว (Saturation) ความต่างศักย์ระหว่างขาอินพุตบวกและลบ ( $E_d$ ) จะเท่ากับศูนย์
2. ปริมาณกระแสที่ไหลเข้าขาอินพุตทั้งสองจะมีค่าน้อยมาก จนคิดว่าไม่มีกระแสไหลเข้า



รูปที่ 2.29 วงจรขยายแบบกลับเฟส

2.6.4.1 เมื่อป้อนแรงดันบวกเข้าที่ขาอินเวอร์ตติ้ง

จากวงจรในรูปที่ 2.28 เราป้อนแรงดัน  $+E_i$  ให้กับขาอินพุตลบ (ขาอินเวอร์ตติ้ง) ผ่านตัวต้านทานอินพุต  $R_i$  และให้  $R_f$  ซึ่งเป็นตัวต้านทานป้อนกลับต่ออยู่ระหว่างขาเอาต์พุตและอินพุตลบ ส่วนขาอินพุตบวกต่ออยู่กับกราวด์ สิ่งที่เราต้องการหาคือ  $A_{CL}$  ว่าจะมีค่าเท่าไร ซึ่งหาได้จากสูตร  $V_o/E_i$  โดย  $V_o$  หาได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

จากรูปที่ 2.25 แรงดันบวกถูกป้อนเข้าที่ขาลบของออปแอมป์  $R_i$  จะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันให้เป็นกระแส  $I$  จากนั้น  $R_f$  จะทำหน้าที่แปลงกระแส  $I$  ให้กลับไปอยู่ในรูปของแรงดันอีกครั้ง โดยเป็นแรงดันที่เป็นสัดส่วนกับ  $E_i$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อเสนอแนะที่ว่า จะไม่มีกระแสไหลเข้าขาอินพุตทั้ง 2 ของออปแอมป์ทั้ง 2 ของออปแอมป์ ดังนั้นกระแส  $I$  ทั้งหมดจาก  $R_i$  จะไหลผ่านไปยัง  $R_f$  จะไหลผ่านไปยัง  $R_f$  ทำให้เกิด  $V_{Rf}$  ขึ้น (โดยไม่มีกระแสไหลเข้าอินพุตลบ)

$$I = \frac{E_i}{R_i} \quad \text{-----} \quad 2.23$$

จากข้อเสนอแนะที่ว่า จะไม่มีกระแสไหลเข้าขาอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ ดังนั้นกระแส  $I$  ทั้งหมดจาก  $R_i$  จะไหลผ่านไปยัง  $R_f$  ทำให้เกิด  $V_{Rf}$  ขึ้น (โดยไม่มีกระแสไหลเข้าอินพุตลบ)

$$V_{Rf} = (I \times R_f) = \frac{(E_i \times R_f)}{R_i} \quad \text{-----} \quad 2.24$$

จาก  $V_{Rf}$  ที่ได้เป็นแรงดันที่ตกคร่อม  $R_f$  ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ระหว่างกราวด์กับ  $V_o$  ตามทิศของกระแสในขณะนี้ กระแสไหลสลับเนื่องมาจาก  $I$  ผ่านกราวด์ซึ่งอยู่ทางซ้ายของ  $R_f$  มายัง  $V_o$  ซึ่งอยู่ทางขวาของ  $R_f$  แสดงให้เห็นว่า  $V_o$  ในตอนนี้มีแรงดันต่ำกว่ากราวด์ คือ เป็นลบ(แรงดันตกคร่อมขา 2 และ ขา 6 ของออปแอมป์ มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์) ดังนั้นในขณะที่  $E_i$  เป็นบวกเทียบกับกราวด์  $V_o$  ก็จะเป็นลบเมื่อเทียบกับกราวด์ (จะได้หักล้างเป็น 0 โวลต์พอดี) เพราะฉะนั้นถ้าคิดว่าขนาดของ  $V_o$  เท่ากับ  $V_{Rf}$  แล้วเครื่องหมายของ  $V_o$  ก็จะกลับกันกับ  $V_{Rf}$  ดังนั้นจากสมการที่ 2.24 จะได้

$$V_o = - \frac{E_i \times R_f}{R_i} \quad \text{-----} \quad 2.25$$

จากนิยามของอัตราขยายแบบรูปปิด  $A_{CL}$  เท่ากับ  $V_o/E_i$  จะได้

$$\begin{aligned} A_{CL} &= \frac{-V_o}{E_i} \\ &= \frac{(-E_i \times R_f) \times (1)}{R_i \quad E_i} \\ &= \frac{-R_f}{R_i} \quad \text{----- 2.26} \end{aligned}$$

เครื่องหมายลบในสมการที่ 2.26 แสดงว่าขั้วของ  $V_o$  จะกลับกับทางด้าน  $E_i$  ซึ่งจุดนี้เองที่ทำให้วงจรขยายนี้จึงได้ชื่อว่า วงจรขยายแบบกลับเฟส ซึ่งอัตราขยายของวงจรมีขึ้นอยู่กับการ  $R_f$  และ  $R_i$  เท่านั้น

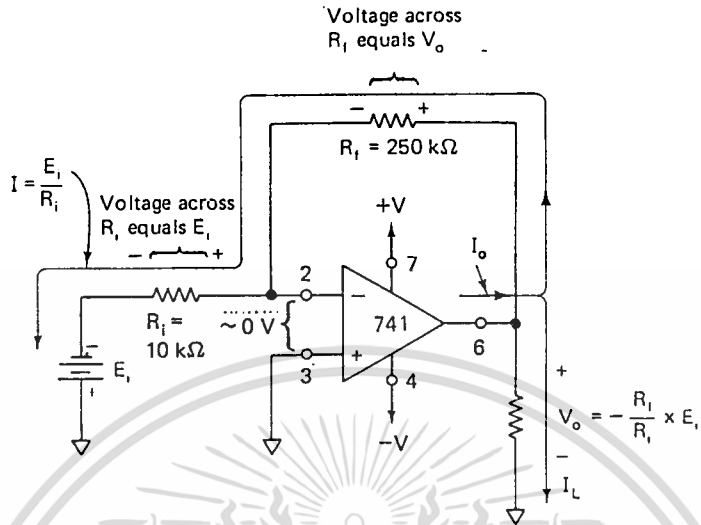
#### 2.6.4.2 โหลดและกระแสเอาต์พุต

กระแสเอาต์พุต  $I_o$  ของออปแอมป์ ประกอบด้วยกระแส 2 ส่วนคือ

1. กระแสที่เกิดจาก  $V_o$  คร่อม  $R_f$  (ในขณะที่  $V_o$  เป็นลบ)  $I_L = V_o/R_L$
2. กระแส  $I$  ที่ผ่าน  $R_f$  มายังเอาต์พุตซึ่งมีทิศทางของ  $I$  จะเหมือนกับ  $I_L$  (มีทิศทางไหลเข้าขา 6 ของออปแอมป์เหมือนกันดังรูปที่ 2.25 ดังนั้นกระแสเอาต์พุตของออปแอมป์  $I_o$  จะเท่ากับ  $I_o = I + I_L$  ซึ่ง  $I_o$  จะมีค่ามากที่สุดอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 มิลลิแอมป์เท่านั้น

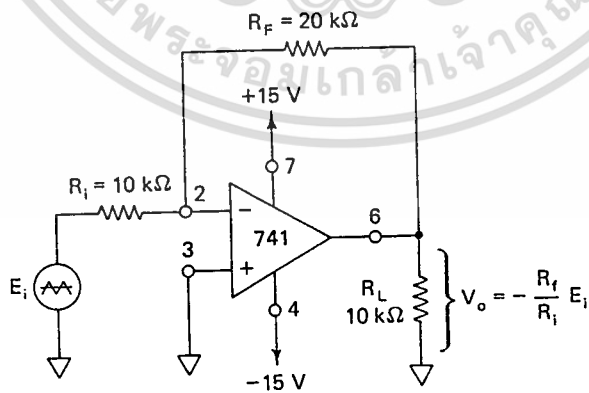
#### 2.6.4.3 เมื่อป้อนแรงดันลบเข้าที่ขาอินเวอร์ต

จากวงจรในรูปที่ 2.29 มีการป้อน  $E_i$  ผ่าน  $R_i$  เข้าทางขาอินพุตลบ โดย  $E_i$  ที่ป้อนให้มีแรงดันเป็นลบ ดังนั้นทำให้ทิศทางของกระแสจึงกลับดังวงจร ในรูปที่ 2.28 แต่สมการทุก ๆ สมการจะเหมือนกันกับตอนแรก และเมื่อพิจารณาจากทิศทางการไหลของกระแสในวงจรรูปที่ 2.29 นี้แล้ว จะได้ข้อสังเกตว่าในขณะที่แรงดันเป็นลบจะทำให้ เป็นบวก

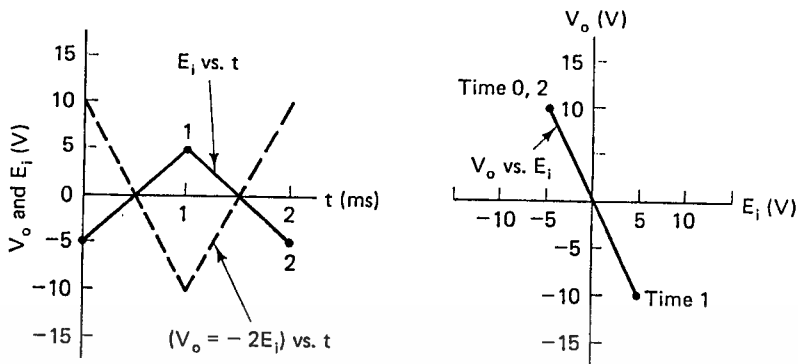


รูปที่ 2.30 แสดงการไหลของกระแสเมื่อแรงดันที่เป็นลบถูกป้อนเข้าที่ขาลบของ  
 ออปแอมป์

2.6.4.4 เมื่อป้อน AC ให้กับขาอินเวอร์ตติ้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 แสดงวงจรแบบอินเวอร์ตติ้ง

ในรูปที่ 2.31 (a) เมื่อถูกป้อนอินพุตด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะได้อัตราขยาย (gain) เท่ากับ  $-2$  ในรูปที่ 2.31 (b.) ซึ่งแสดงกราฟแรงดัน ต่อเวลาเมื่อวัดด้วยสโคป ส่วนในรูปที่ 2.31 (c.) แสดงค่าคุณสมบัติของอินพุตต่อเอาต์พุต (Input - output characteristic)

จากวงจรรูปที่ 2.31(a) เป็นการป้อนสัญญาณ AC เข้าที่ขาอินพุตลบ ลักษณะสัญญาณ AC ที่ป้อนให้มีลักษณะดังรูปที่ 2.31 (b.) โดยจะประกอบด้วยคลื่นแบ่งเป็น 2 ช่วงใน 1 ลูกคือ

1. ช่วงที่มีแรงดันเป็นบวก ก็จะใช้การพิจารณาวงจรและสมการเช่นเดียวกันกับวงจรในรูปที่ 2.28 ดังนั้นในขณะที่  $E_i$  ซึ่งตอนนี้เป็นบวก จะทำให้  $V_o$  เป็นลบ
2. ช่วงที่มีแรงดันเป็นลบ ก็จะใช้การพิจารณาวงจรและสมการเช่นเดียวกันกับวงจรในรูปที่ 2.29 ดังนั้นในขณะที่  $E_i$  ซึ่งตอนนี้เป็นลบ จะทำให้  $V_o$  เป็นบวก

รูปคลื่นที่ออกมาทางด้านเอาต์พุตจะกลับเฟส ( $180^\circ$  out of phase) กับทางด้านอินพุตดังแสดงในรูปที่ 2.31(b.) และรูปที่ 2.31(c.) โดยที่ความถี่ของคลื่นในด้านอินพุตจะเท่ากับเอาต์พุต

#### 2.6.4.5 หลักในการออกแบบวงจร

- เลือกลักษณะของวงจรตามรูปที่ 2.28 ถึงรูปที่ 2.30 ซึ่งไม่ว่าจะเลือกเช่นใด ลักษณะวงจรก็เหมือนกันหมด จะต่างกันก็เพียงแต่ลักษณะของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้เท่านั้น
- เลือก  $R_i$  ควรจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 10 กิโลโอห์ม เพื่อป้องกันออปแอมป์พัง เนื่องจากรับกระแสมากเกินไป

- คำนวณค่า  $R_f$  ในที่นี้ หากสมการ  $A_{cl}$

$$A_{cl} = - \frac{R_f}{R_i}$$

$$R_f = - A_{CL} \times R_i$$

2.6.4.6 สรุปวิธีการวิเคราะห์วงจร

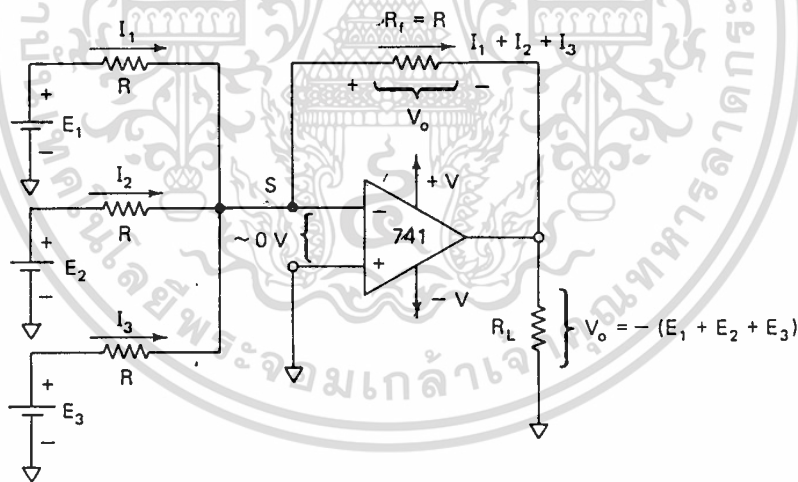
ในการวิเคราะห์ขยายแบบอินเวอร์ตมีขั้นตอนดังนี้

-หา  $R_i$  ซึ่งก็คือ ค่าความต้านทานด้านอินพุตของวงจรก่อน

- เมื่อทราบ  $R_i$  แล้ว ขนาดของอัตราขยายจะเท่ากับ  $R_o/R_i$  โดยสัญญาณเอาต์

พุตที่ได้จะมีการกลับเฟสกับทางด้านอินพุต

2.6.5 วงจรรวมสัญญาณแบบอินเวอร์ต (Inverting adder)



รูปที่ 2.32 วงจรรวมสัญญาณแบบอินเวอร์ต

วงจรในรูปที่ 2.32 เป็นวงจรที่ใช้รวมสัญญาณทางด้านอินพุตให้ออกมาที่ด้านเอาต์พุต โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะกลับเฟส เมื่อเทียบกับด้านอินพุต ซึ่งเป็นไปตามสมการที่

$$V_o = -(E_1 + E_2 + E_3) \quad \text{-----} \quad 2.28$$

พิจารณากระแสที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟและ R ทางด้านอินพุตแต่ละตัว จะรวมกันที่จุด S (ที่จุด S จะเสมือนเป็นกราวด์) ซึ่งกระแส  $I_1, I_2$  และ  $I_3$  หาได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{E_1}{R}, \quad I_2 = \frac{E_2}{R}, \quad I_3 = \frac{E_3}{R} \quad \text{----- 2.29}$$

จากลักษณะของวงจร ขยายแบบอินเวอร์ตติ้ง กระแสรวม  $(I_1+I_2+I_3)$  ที่ไหลเข้าที่จุด S จะไหลผ่านออกมาตาม  $R_f$  เกิดแรงดันตกคร่อม  $R_f$  ซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $V_o$  ซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $V_o$  แต่กลับเฟสกัน

$$V_o = - (I_1+I_2+I_3) \times R_f$$

เมื่อแทนค่ากระแสจากสมการที่ 2.29 และใช้  $R_f$  เท่ากับ R ลงไปในสมการ  $V_o$  ก็จะได้  $V_o$  ตามสมการที่ 2.28

$$\begin{aligned} V_o &= - \frac{(E_1) + (E_2) + (E_3)}{R} \times R \\ &= - (E_1+E_2+E_3) \end{aligned}$$

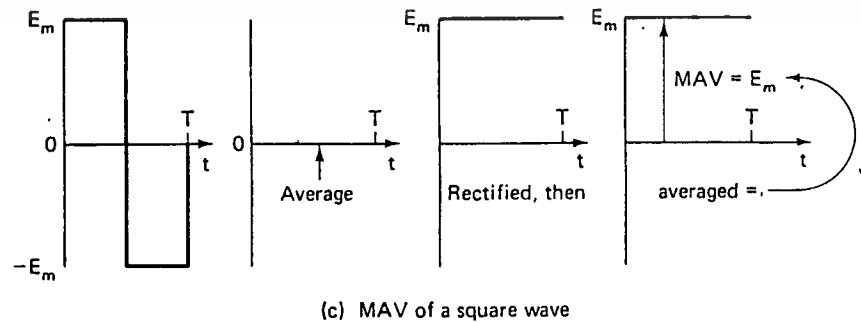
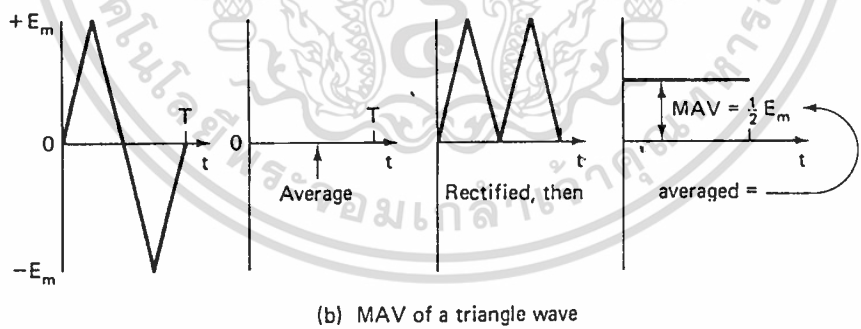
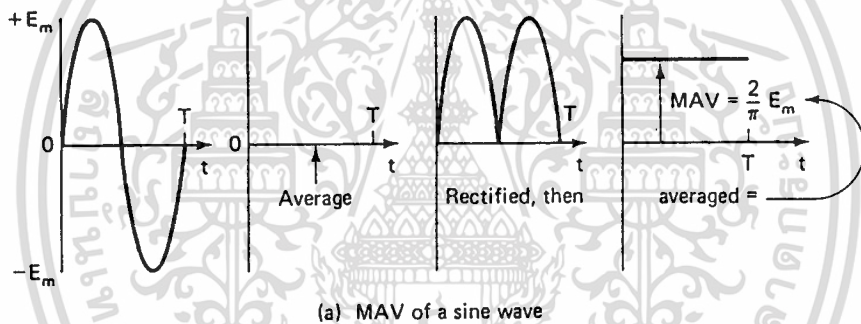
ถ้าต้องการรวมสัญญาณเพิ่มขึ้นก็ให้เพิ่มแหล่งจ่ายไฟเข้าไปอีก และตัวต้านทานที่เพิ่มเข้าไปต้องเท่ากับตัวต้านทาน R เดิม (เหตุที่ใช้ตัวต้านทานเท่ากัน เพื่อตัดปัญหาอัตราส่วนระหว่าง  $R_f$  และ  $R_i$ ) แต่ถ้าต้องการลดจำนวนสัญญาณด้านอินพุตลงก็ให้ปลดแหล่งจ่ายไฟนั้น ๆ ออกไปเลย

2.6.6 วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง (AC to DC Converter)

การออกแบบวงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง จะใช้หลักการเกี่ยวกับการออกแบบวงจรเรกติไฟเออร์(Rectifier)วงจรฟูลเวฟเรกติไฟเออร์เราอาจเรียกว่า

วงจรค่าสมบูรณ์ (absolute-value) ได้เมื่อตัดแปลงวงจรนี้ให้เป็นวงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรงนี้ เราจึงอาจเรียกว่าวงจรค่าสมบูรณ์เฉลี่ย หรือ mean-absolute-value (MAV)

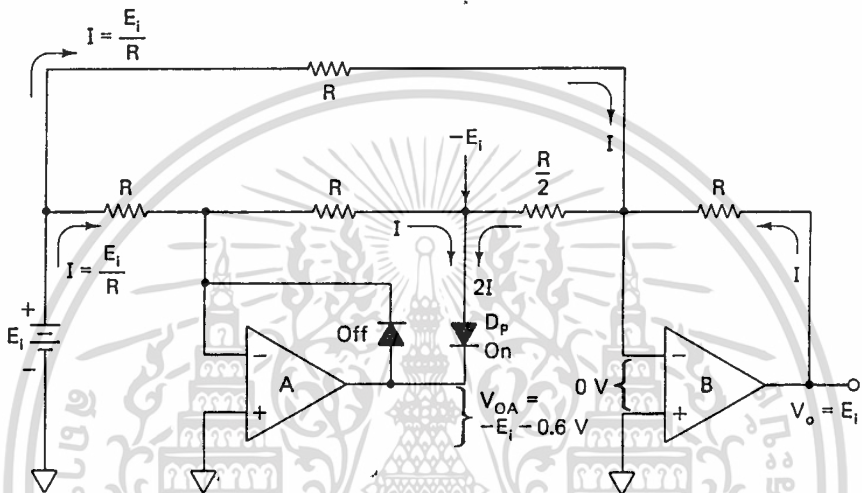
ในรูปที่ 2.32 เมื่อเราป้อนแรงดันที่เป็นไซน์ ตามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นสมมาตรกันตามแกน t จะเห็นได้ว่าวงจรก็สามารถกลับหัวของแรงดัน แล้วเฉลี่ยค่าสมบูรณ์ดังกล่าว หนึ่งค่าสมบูรณ์เฉลี่ยนี้เราไม่สามารถจะวัดด้วยมิเตอร์ชนิด DC ได้ และแรงดันสมบูรณ์ เฉลี่ยของคลื่นแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่า rms หรือ root-mean-square



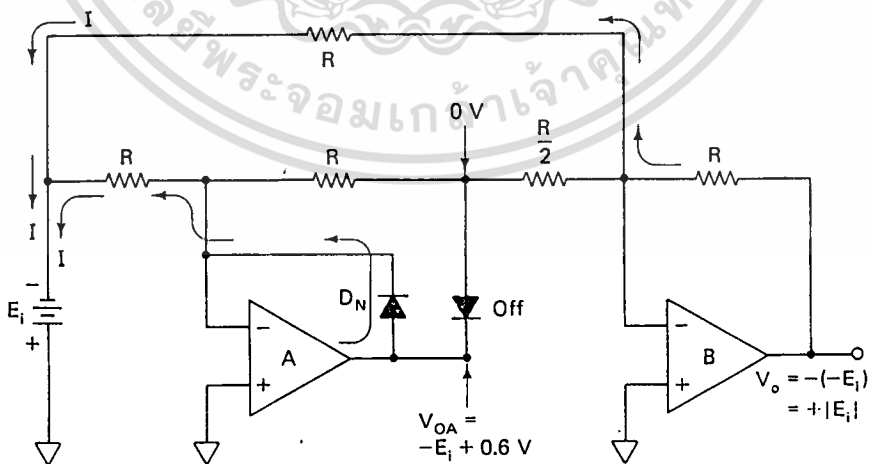
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน **รูปที่ 2.33** แสดงว่า mav ที่ได้จากรูปคลื่น แต่ละชนิด ถ้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.6.1 เรกติไฟเออร์ชนิดต่อกราวด์เข้ากับขาอินพุตบวก

จากรูปที่ 2.34 เป็นวงจรแปลงไฟสลับเป็นไปตรง เมื่ออินพุตเป็นบวกในรูปที่ 2.31 (a) ออปแอมป์ A จะทำการอินเวิร์ตหรือกลับขั้ว  $E_i$  ส่วนออปแอมป์ B จะทำการรวมเอาต์พุตของ A กับค่า  $E_i$  ซึ่งจะให้ค่าเอาต์พุตเป็น  $V_o = E_i$  และเมื่ออินพุตที่เป็นลบให้กับวงจรดังรูปที่ 2.30(b.) ออปแอมป์ B จะทำการอินเวิร์ต หรือกลับขั้วของ  $-E_i$  ให้เป็น  $+E_i$  แทน



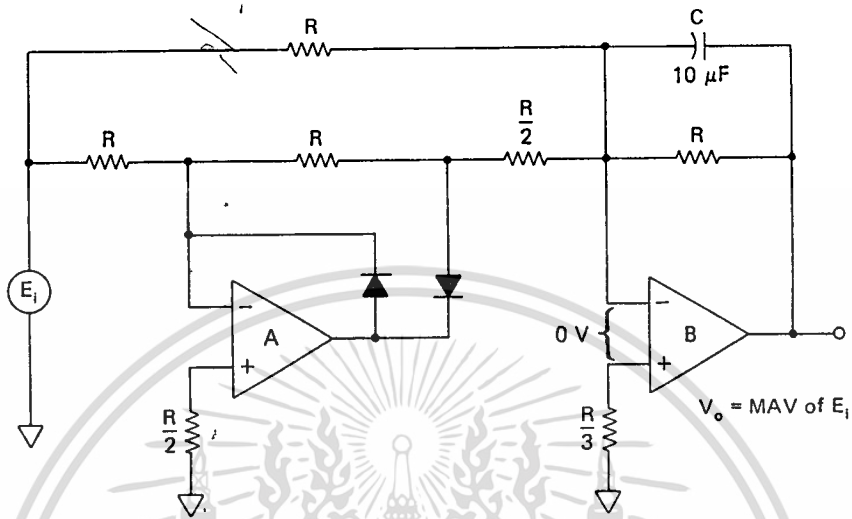
(a) เมื่ออินพุตเป็นบวก ออปแอมป์ A และ B จะกลับขั้ว  $E_i$  ซึ่งจะได้  $V_o = E_i$



(b.) เมื่ออินพุตเป็นลบ ออปแอมป์ A จะไม่ทำหน้าที่เรกติไฟ หรือกลับขั้ว แต่ออปแอมป์

จะทำหน้าที่นี้เอง ซึ่งจะได้  $V_o = E_i$  เช่นกัน รูปที่ 2.33 วงจรค่าสมมุติชนิดต่อกราวด์เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ขาอินพุตบวกของออปแอมป์ทุกตัว โดย  $R = 20 \text{ k}$  ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 ใส่ตัวเก็บประจุ C เข้าไปในวงจร ในรูปที่ 2.30 ก็จะทำให้วงจรแปลงไฟสลับให้เป็นไฟตรงคือวงจร MAV นั่นเอง

#### 2.6.6.2 วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง

จากวงจรรูปที่ 2.30 เราได้ตัดแปลงให้วงจรดังกล่าว มีความสามารถในการกรองความไม่เรียบของแรงดันให้เรียบขึ้นได้ โดยการใช้ตัวเก็บประจุเข้าช่วยดังรูปที่ 2.31 หน้าที่ของตัวเก็บประจุ C ในที่นี้จะเป็นผู้เฉลี่ยแรงดันที่ ไม่เสมอราบเรียบกันให้เท่ากันให้มากที่สุด

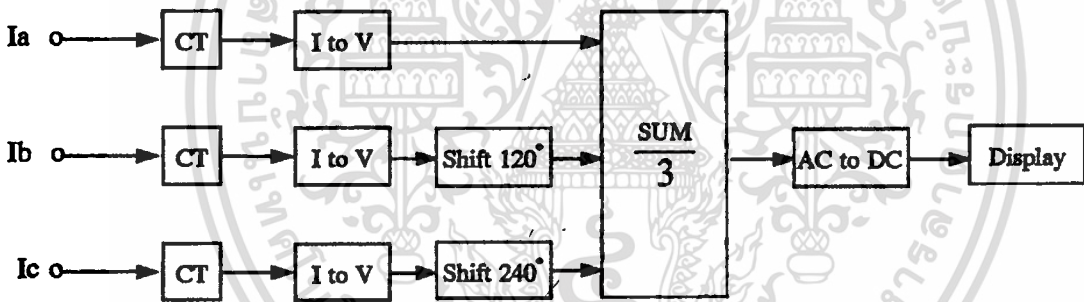
## บทที่ 3

### การสร้างและส่วนประกอบของเครื่องวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

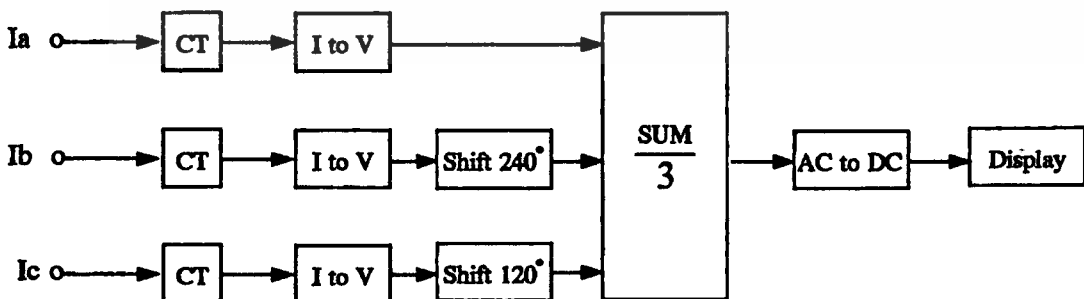
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบคำนวณสร้าง เครื่องวัดองค์ประกอบสมมาตรเป็นหลัก โดยจะแยกคำนวณและสร้างเป็นส่วน ๆ ซึ่งจากแนวทางในการออกแบบเบื้องต้น ได้นำมาปรับปรุงเพิ่มเติมอุปกรณ์และส่วนประกอบที่สามารถช่วยให้การสร้างเครื่องวัดมีความเป็นไปได้มากขึ้น โดยการนำเอาอุปกรณ์และวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วยทำหน้าที่ต่าง ๆ ซึ่งสามารถแสดงหลักการในการวัดเป็นบล็อก ในแต่ละบล็อกจะแทนด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์

#### 3.1 หลักการในการวัดปริมาณกระแสในรูปองค์ประกอบสมมาตร

##### การวัดกระแสลำดับบวก

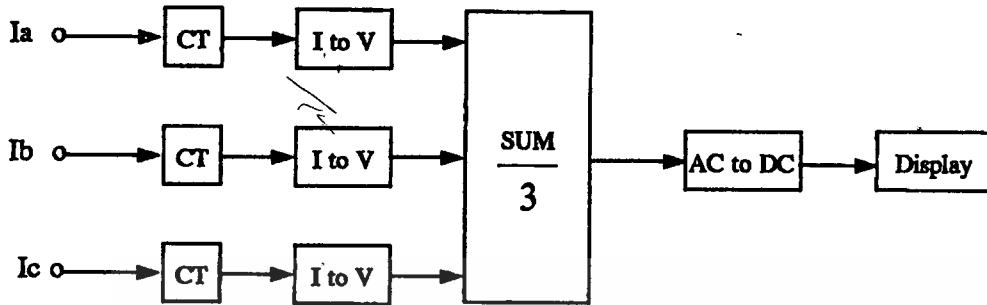


##### การวัดกระแสลำดับลบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การวัดกระแสลำดับศูนย์



รูปที่ 3.1 แสดงการวัดปริมาณกระแสในรูปองค์ประกอบสมมาตร

### 3.2 การคำนวณและการสร้าง

จากหลักการในการวัด ซึ่งจะมีอุปกรณ์และวงจรต่าง ๆ ที่นำมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยที่บางส่วนเป็นการนำมาใช้งานร่วม และบางส่วนเป็นการออกแบบและสร้างขึ้นมา ในแต่ละส่วนก่อนจะนำมาใช้งานร่วมกันนั้นได้ทำการทดสอบเป็นส่วน ๆ ไป สำหรับการคำนวณ การทดสอบ จะแสดงเป็นส่วนดังนี้

#### 3.2.1 หม้อแปลงกระแส หรือ จีที

ในส่วนนี้เป็นการนำมาใช้งาน โดยได้ทำการทดสอบศึกษาถึงความสัมพันธ์ทั้งขนาดและมุม ระหว่างกระแสทางคานปฐมภูมิ และกระแสทุติยภูมิ ที่เบอร์เดนม้าต่าง ๆ เพื่อที่จะเลือกใช้ค่าเบอร์เดนม้าที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

**การทดสอบซีที**

ในการทดสอบได้ทำการทดสอบซีที ที่อัตราส่วนการแปลงของซีที

ซีที 1 ชุด มี 3 ตัว

พิกัด 30/5 5 VA

Class 1

ซีทีตัวที่ 1		
Ipri	Isec	K
5.3 $\angle 0$	0.7 $\angle 15$	7.5
10.6 $\angle 0$	1.05 $\angle 21$	10
15 $\angle 0$	1.35 $\angle 32$	11
19.8 $\angle 0$	1.70 $\angle 39$	11
25.2 $\angle 0$	1.90 $\angle 60$	13

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการทดสอบ ซีที ตัวที่ 1

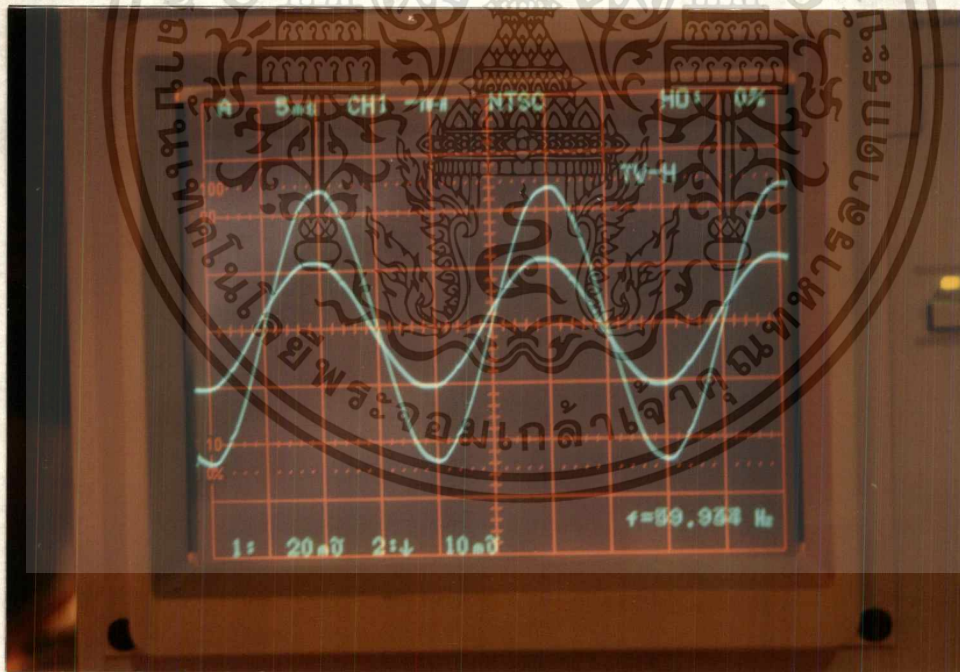
ซีทีตัวที่ 2		
Ipri	Isec	K
5.4 $\angle 0$	0.7 $\angle 13$	7.7
10.6 $\angle 0$	1.05 $\angle 20$	10
15 $\angle 0$	1.35 $\angle 20$	11
19.4 $\angle 0$	1.60 $\angle 20$	12
25.2 $\angle 0$	1.85 $\angle 36$	14

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการทดสอบ ซีที ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

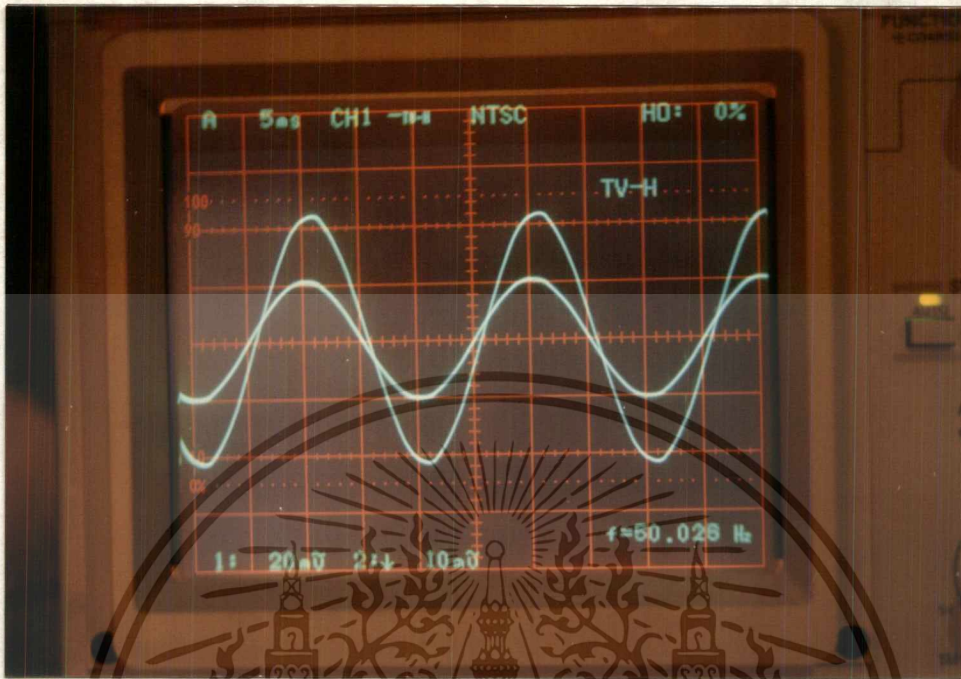
ซีทีตัวที่ 3		
Ipri	Isec	K
5.3 $\angle 0$	0.7 $\angle 10$	7.5
10.1 $\angle 0$	1 $\angle 16$	10
15.4 $\angle 0$	1.36 $\angle 18$	11
19.6 $\angle 0$	1.58 $\angle 40$	12
25.4 $\angle 0$	1.82 $\angle 54$	14

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดสอบ ซีที ตัวที่ 3

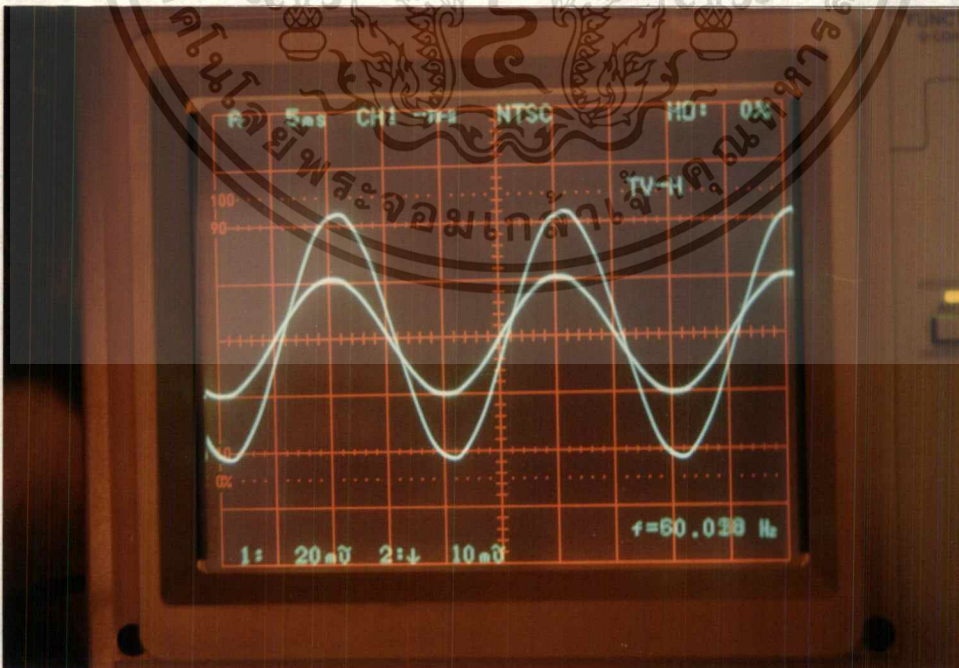


รูปที่ 3-2 แสดง Wave form ของ Ipri กับ Isec ของ ซีทีตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



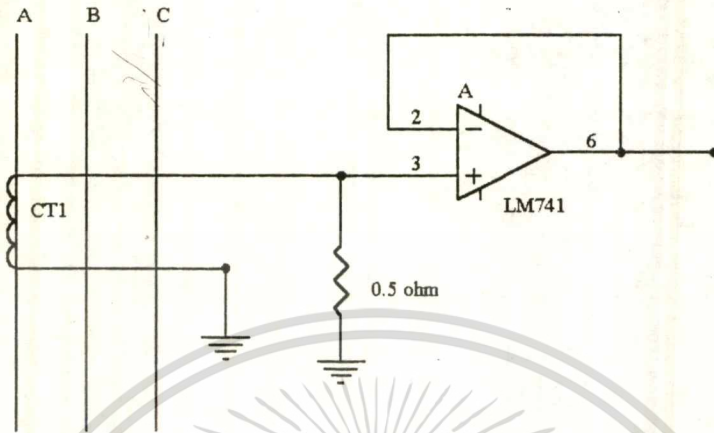
รูปที่ 3-3 แสดง Wave form ของ Ipri กับ Isec ของ ซีพิตัวที่ 2



รูปที่ 3-4 แสดง Wave form ของ Ipri กับ Isec ของ ซีพิตัวที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้  
 ในทางอื่นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

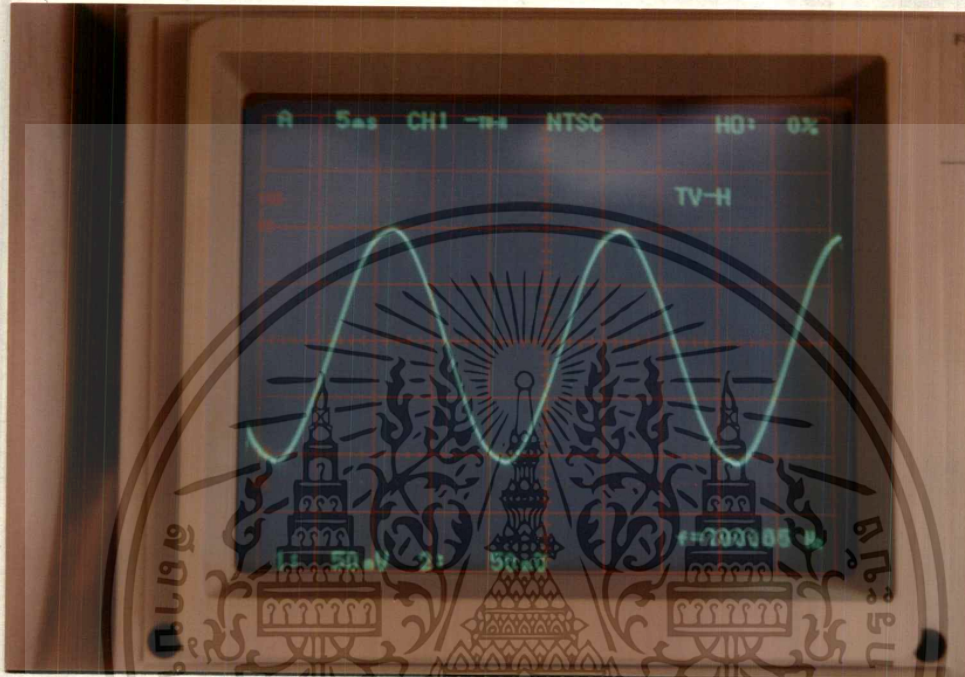
### 3.2.2 วงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน (Voltage to current)



รูปที่ 3-5 แสดงโครงสร้างของวงจร

วงจรมีหน้าที่แปลงค่าของกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่ต่อเข้ากับขาอินพุตของตัวแปลงกระแสเป็นแรงดัน ซึ่งจะส่งต่อไปในวงจรการวัด โดยที่  $R$  ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแส  $I_s$  เป็นแรงดัน  $R I_s$  ออปแอมป์ A ถูกต่อให้มีลักษณะมีอินพุตอิมพีแดนซ์ สูงมาก และมี เอาท์พุตแอมป์ต่ำมาก ดังนั้นแรงดันอินพุตจะปรากฏที่เอาท์พุตของมันด้วย ดังนั้นถ้าความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_p$  และ  $I_s$  เป็นเชิงเส้น และ  $R$  มีค่าคงที่  $I_p$  จะมีความสัมพันธ์ เป็นเชิงเส้นกับแรงดัน  $V$  ด้วย ในการที่จะพิจารณาเลือกค่า  $R$  นั้น ต้องคำนึงถึงเบอร์เดนของซีทีและขนาดแรงดันที่จะไปขับวงจรในภาคการวัด กล่าวคือ ในกรณีที่เลือกค่า  $R$  น้อยไปจะมีผลทำให้แรงดันเอาท์พุต น้อยไปสำหรับใช้ในการขับวงจรภาคต่อไป แต่ถ้าเลือกค่า  $R$  มากไปก็จะมีผลให้ความผิดพลาดอันเนื่องมาจาก ซีที เพิ่มขึ้นด้วย

ในการทดลองนี้ ใช้ซีทีที่ค่าเบอร์เดน 5 โวลต์-แอมป์ โดยเลือกค่า  $R = 0.2$  โอห์ม และเป็นชนิดเซรามิก พิกัด 10 วัตต์ (เนื่องจากผล  $I^2 R$ ) เพื่อให้สามารถที่จะทนกระแส 5 แอมป์ได้ ส่วนออปแอมป์เลือกใช้เบอร์ LM 741 C

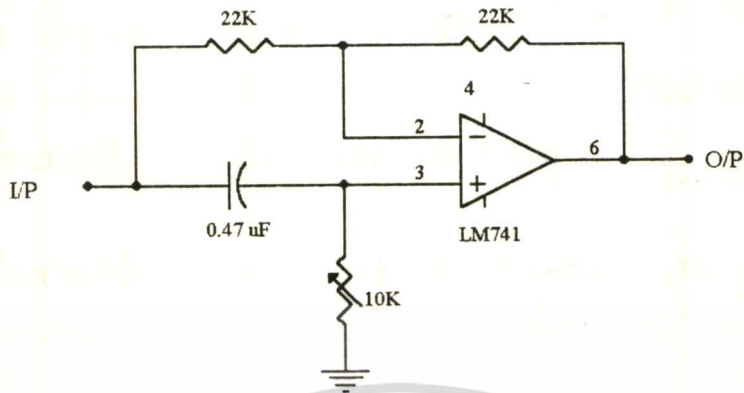


รูปที่ 3.6 แสดงสัญญาณอินพุตเทียบกับเอาต์พุตวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน

### 3.2.3 วงจรเลื่อนเฟส ( Phase Shifter)

โดยให้แรงดันเอาต์พุตตามหลัง (lagging) แรงดันอินพุตเป็นมุม 120 องศาทางไฟฟ้า โครงสร้างของวงจรนี้ แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยที่ออปแอมป์ A ตัวที่ตัวต้านทาน R, Ri ตัวเก็บประจุ C ทำหน้าที่เลื่อนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างวงจรเลื่อนเฟส  $120^\circ$

ในการคำนวณจากสมการ 2.21

$$\theta = 2 \operatorname{Arctan} 2\pi f R_i C_i$$

เมื่อ  $\theta = 120^\circ$

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

$$C_i = 0.47 \mu\text{F} \text{ (กำหนดค่าเอง)}$$

เพราะฉะนั้น  $R_i = \frac{\tan \theta}{2\pi f C_i}$

$$= \frac{\tan \theta}{2\pi \times 50 \times 0.47 \times 10^{-6}}$$

$$= 11.730 \text{ K}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

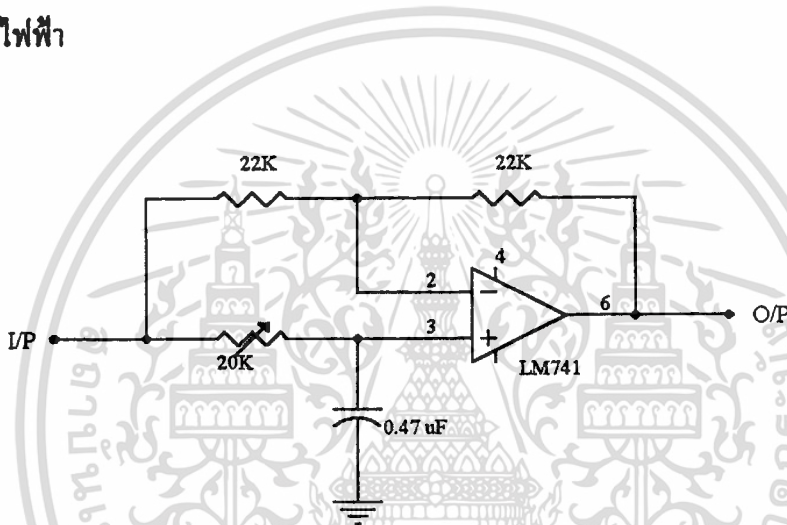
สำหรับการเลือกค่าที่ใช้งาน

ความต้านทาน R เลือกค่าที่  $10\text{ K}\Omega$  คงที่

ความต้านทาน  $R_i$  เลือกค่าที่  $15\text{ K}\Omega$  ปรับค่าได้ละเอียด

ออปแอมป์ A เลือกใช้เบอร์ LM 741 C

สำหรับวงจรเลื่อนเฟส โดยให้แรงดันเอาต์พุตตามหลังแรงดันอินพุตเป็นมุม  $240^\circ$  องศาทางไฟฟ้า  
โครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 3.5 การทำงานก็เหมือนกับวงจรเลื่อนเฟสที่ทำให้แรงดันอินพุตเป็น  
 $120^\circ$  องศาทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างวงจรเลื่อนเฟส  $240^\circ$

จากสมการ 2.21

$$\theta = \text{Arctan } 2\pi fR_iC_i$$

เมื่อ  $\theta = 240^\circ$

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

$$C_i = 0.47\ \mu\text{F}$$

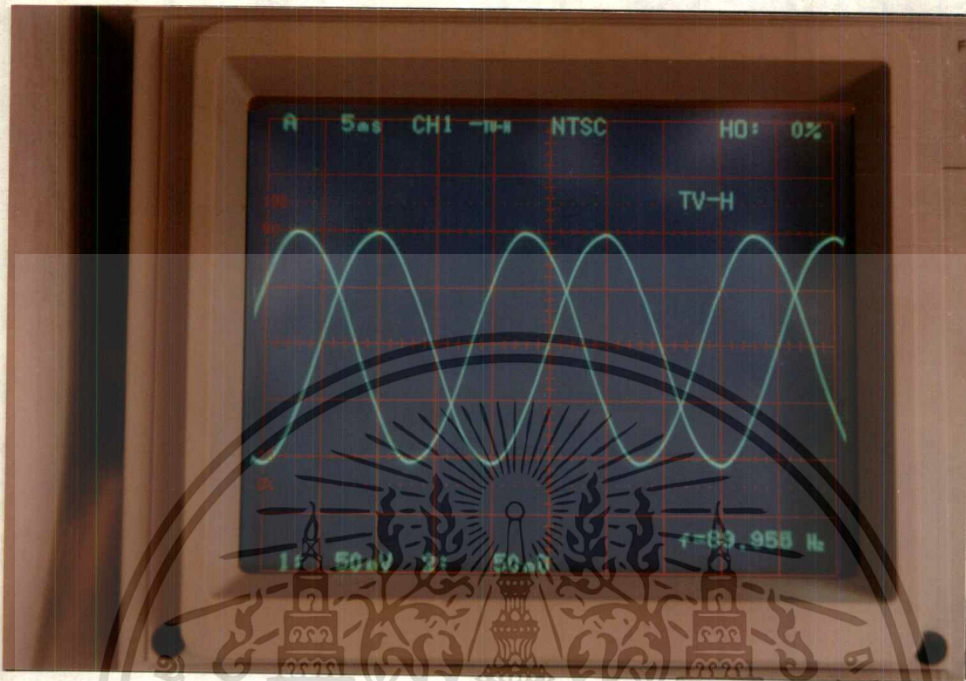
เพราะฉะนั้น ค่า

$$R_i = \frac{\tan 240}{2 \times \pi \times 50 \times 0.47 \times 10^{-6}}$$

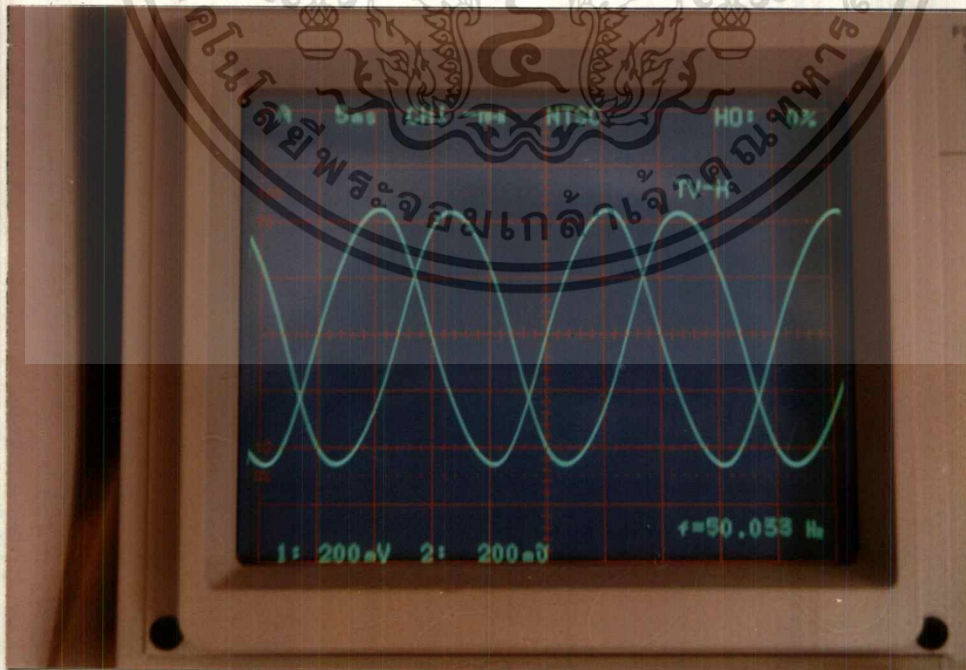
$$= 11.73\text{ K}\Omega$$

ดังนั้นค่าที่เลือกใช้งานก็เลือกเหมือนกรณีแรงดันเอาต์พุตตามหลังแรงดันอินพุต

เป็นมุม  $120^\circ$  องศาทางไฟฟ้า สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงสัญญาณ อินพุตเทียบกับเอาต์พุตของวงจร Shift phase  $120^\circ$



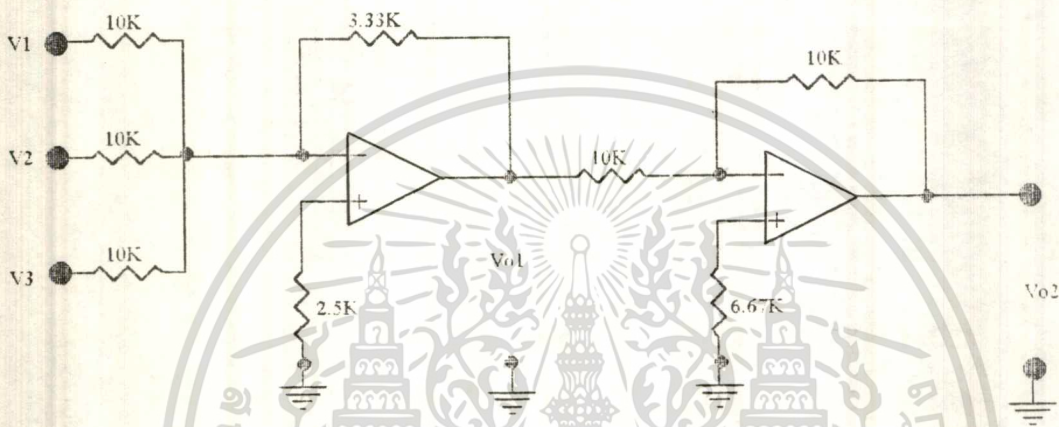
รูปที่ 3.10 แสดงสัญญาณ อินพุตเทียบกับเอาต์พุตของวงจร Shift phase  $240^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.2.4 วงจรรวมสัญญาณ**

ซึ่งในส่วนนี้จะมีวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟสต่อร่วมกับวงจรถ่ายสัญญาณแบบเฟสเพื่อให้สัญญาณอินพุตกับเอาต์พุต มีค่าเฟสที่เหมือนกัน

โครงสร้างของวงจรนี้ แสดงดังรูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต และ สัญญาณอินพุต V1, V2 และ V3 เป็นไปดังสมการที่ ( 3.1 )



รูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างของวงจรรวมสัญญาณ

$$V_o = \frac{R_6}{R_5} \left( \frac{R_4 V_1}{-R_1} + \frac{R_4 V_2}{R_2} + \frac{R_4 V_3}{R_2} \right)$$

เพื่อให้ได้  $V_o = \frac{1}{3}(V_1 + V_2 + V_3)$  ดังนั้นเราจึงเลือกค่า

$$R_5 = R_6 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$R_4 = \frac{10}{3} \text{ K}\Omega \text{ เลือกใช้ } 10 \text{ K}\Omega \text{ ขนาดกัน 3 ตัว}$$

ส่วน  $R_7$  และ  $R_8$  แต่ไว้เพื่อ ลดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากกระแสไบอัส

$$R_7 = R_1 // R_2 // R_3 // R_4$$

$$= \frac{5}{3} \text{ K}\Omega \text{ เลือกใช้ } 5 \text{ K}\Omega \text{ ขนาดกัน 3 ตัว}$$

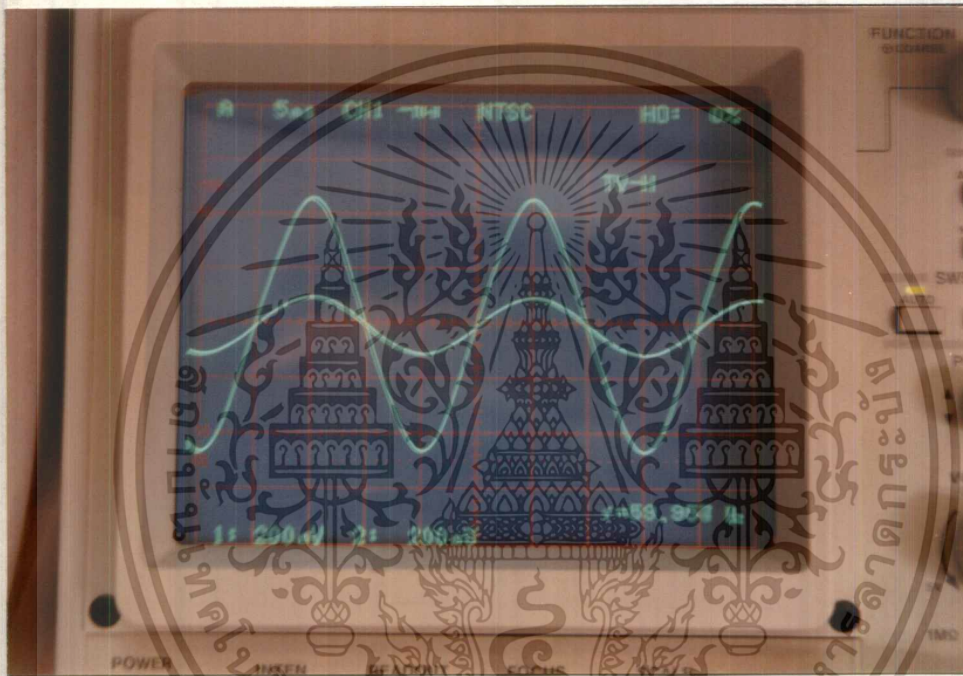
$$R_8 = R_5 // R_6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้นไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออปแอมป์  $A_1$  ทำหน้าที่รวมสัญญาณแบบกลับเฟส

ออปแอมป์  $A_2$  ทำหน้าที่กลับสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก  $A_1$  อีกครั้งหนึ่ง

ออปแอมป์  $A_1$   $A_2$  เลือกใช้เบอร์ LM 741C

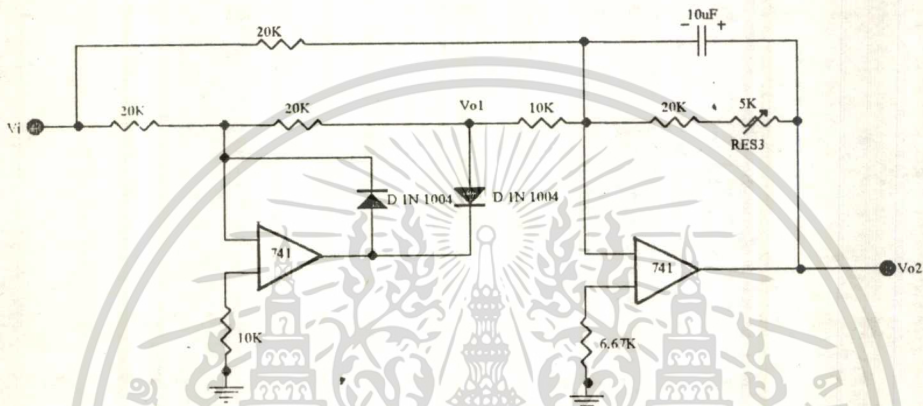


รูปที่ 3.12 แสดงสัญญาณอินพุตเทียบกับเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.5 วงจรเปลี่ยนแรงดัน เอนซี เป็น ดีซี

โครงสร้างของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 และเอาต์พุต  $V_o$  มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.2



รูปที่ 3.13 แสดงโครงสร้างของวงจร

$$V_o = \left( \frac{R_3 R_5}{R_1 R_4} - \frac{R_5}{R_2} \right) \cdot V_i \quad \text{เมื่อ } V_i \geq 0 \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

$$V_o = - \left( \frac{R_5}{R_2} \right) \cdot V_i \quad \text{เมื่อ } V_i \leq 0$$

ดังนั้นถ้าเราเลือกใช้  $R_1 = R_3$ ,  $R_4 = \frac{R_2}{2}$  จากสมการที่ 3.2 จะได้ว่า

$$V_o = \frac{R_5}{R_2} |V_i| \quad \text{หรือหมายความว่า แรงดันเอาต์พุต } V_o \text{ มีลักษณะ พูลเวฟเรกติไฟเออร์ของ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอินพุต  $V_i$  โดยมีอัตราขยายของขนาดเป็น  $\frac{R_5}{R_2}$  นั่นเอง ซึ่งเมื่อเราใส่ C แรงดันเอาต์พุต  $V_o$  จะมีลักษณะค่อนข้างเรียบ แต่เนื่องจากเราต้องการให้ แรงดันเอาต์พุต  $V_o$  เป็นค่า อาร์ เอ็ม เอส ของแรงดัน อินพุต  $V_i$  เราจึงใช้  $R_s$  เป็นตัวต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ เพื่อความสะดวกเราเลือก

$$R_1 = R_2 = R_3 = 20 \text{ K}\Omega$$

$$R_4 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$R_5 = \text{ตัวต้านทานคงที่ } 20 \text{ K}\Omega + \text{ตัวต้านทานปรับค่าได้ } 5 \text{ K}\Omega$$

$$C = 10 \mu\text{F}$$

$$D_1, D_2 \quad \text{เบอร์ } 1N4148$$

$$A_1, A_2 \quad \text{เบอร์ } LM741C$$

ส่วน  $R_6$  และ  $R_7$  ใ้ไว้ เพื่อชดเชย ความผิดพลาดเนื่องจากกระแสไบอัส

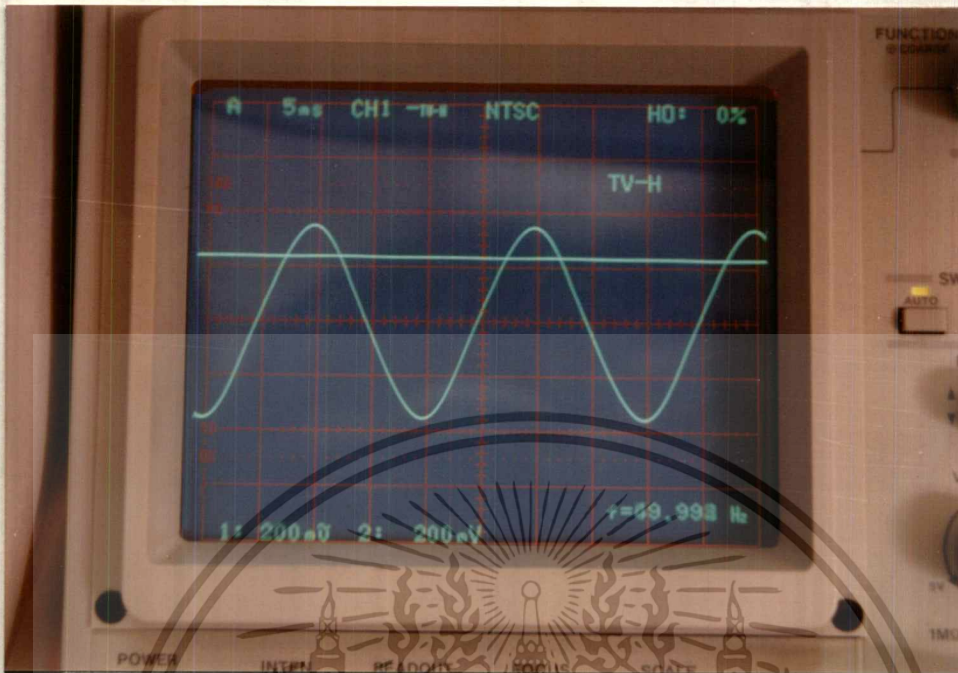
$$\text{โดย } R_6 = R_1 // R_3 \text{ และ}$$

$$R_7 = R_2 // R_4 // R_5$$

ดังนั้นจึงเลือกค่า

$$R_6 = 10 \text{ K}\Omega$$

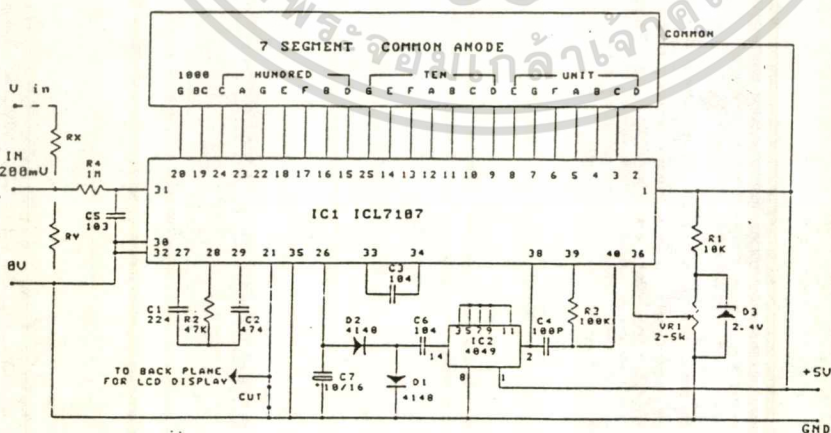
$$R_7 = 10 \text{ K}\Omega \text{ ขนาดกับ } 20 \text{ K}\Omega$$



รูปที่ 3.14 แสดงสัญญาณอินพุตเทียบกับเอาต์ของวงจร AC to DC

### 3.2.6 ส่วนแสดงผล (DISPLAY)

ในส่วนนี้เป็นการนำมาใช้งานร่วม ซึ่งได้นำเอา คิซี คิจิตอลมิเตอร์ (Dc digital meter ) มาใช้ ซึ่งจะรับสัญญาณเข้า(input) จากส่วนของวงจรที่เปลี่ยนเอซึ่เป็นคิซี ซึ่งค่าที่แสดงผลจะเป็นค่าอาร์เอ็มเอส (rms)

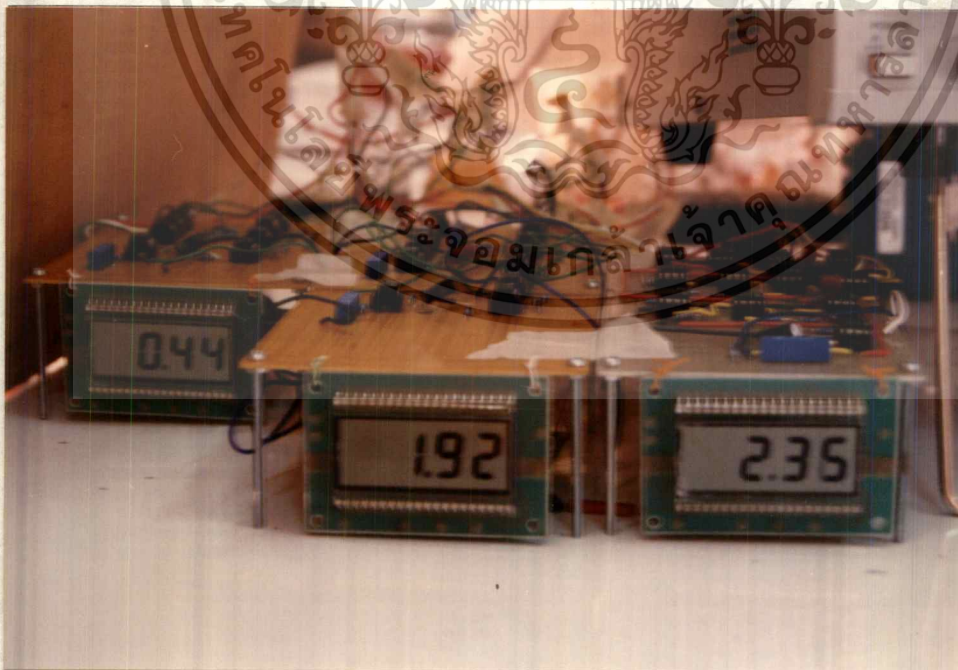


รูป 3.15 โครงสร้างของวงจรคิซี คิจิตอลมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงสัญญาณอินพุทของส่วน Display



รูปที่ 3.17 แสดงสัญญาณเอาต์พุทของส่วน Display

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลการทดสอบส่วนต่างๆของเครื่องวัด

จากการออกแบบ คำนวณและการสร้างส่วนประกอบต่างๆของเครื่องวัดตลอดจน การทดสอบส่วนต่างๆ ซึ่งพอสรุปผลส่วนต่างๆได้ดังนี้

#### ส่วนซีที

จากการทดสอบจะเห็นว่าผลที่ได้เป็นค่าความคลาดเคลื่อนอย่างมากโดยคุณสมบัติของซีทีไม่ได้เป็นไปตามต้องการ กล่าวว่าคุณสมบัติของซีทีที่ต้องการทั้ง 3ตัวต้องมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ นั่นคืออัตราการแปลงของซีทีที่ต้องการที่(ตามระบุใน Spec) มุมเฟสของ กระแสด้านปฐมภูมิเมื่อเทียบกระแสของด้านทุติยภูมิต้องมีมุมเฟสเหมือนกันไม่ว่ากระแสปฐมภูมิ จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร ซึ่งในส่วนซีทีนี้ถ้าไม่เป็นไปตามข้อกำหนดแล้วจะทำให้เครื่องวัด ไม่สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและเที่ยงตรง

ผลที่ได้จากการทดสอบซีทีที่ค่าต่างๆนั้นไม่ว่าจะอัตราการแปลงหรือมุมเฟสจะค่า เปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันมาก ซึ่งถือว่าผลที่ได้ในส่วนนี้ไม่สามารถนำไปใช้ประกอบกับวงจรได้

#### ส่วนวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน

ในส่วนนี้มีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับส่วนของซีที โดยจะรับกระแสจากซีที (กระแสด้านทุติยภูมิ) มาเปลี่ยนเป็นแรงดันโดยการใชตัวต้านทาน(โวลท์เตจตกคร่อมตัวต้านทาน  $V = IR$ )

ผลจากการทดสอบจะเห็นว่ารูปภาพของคลื่นสัญญาณกระแสจะอินเฟสกับ สัญญาณของโวลท์เตจตกคร่อมตัวต้านทาน แต่จากข้อกำหนดของกระแสที่ใช้เป็นกระแสจากทุติย ภูมิของซีที เพราะฉะนั้นในส่วนวงจรนี้จะใช้งานได้ก็ต่อเมื่อซีทีมีคุณสมบัติตามต้องการ

#### ส่วนวงจรเลื่อนเฟส

สำหรับวงจรในส่วนนี้ได้ใช้ตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุทำหน้าที่เลื่อนมุมเฟสของ สัญญาณอินพุตไปตามต้องการ โดยการปรับค่าของตัวต้านทาน

ผลการทดลองจะเห็นว่าในการเลื่อนมุมเฟส  $120^\circ$  หรือ  $240^\circ$  จากรูปภาพสัญญาณ เป็นค่าที่ได้ตามต้องการแต่อาจจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยซึ่งผลจากเครื่องวัด ในการวัดมุม เฟสของสัญญาณที่มีสเกลค่อนข้างหยาบ

### ส่วนวงจรรวมสัญญาณ

เป็นการรวมอินพุต 3 สัญญาณพร้อมกับลดระดับของผลรวมของสัญญาณให้เหลือ 1 ใน 3 ของสัญญาณรวม

ผลที่ได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเนื่องจากอัตราส่วนของ  $R_f$  กับ  $R_i$  ซึ่งเป็นค่าความต้านทาน โดยค่าที่ใช้ในวงจรเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าการคำนวณ

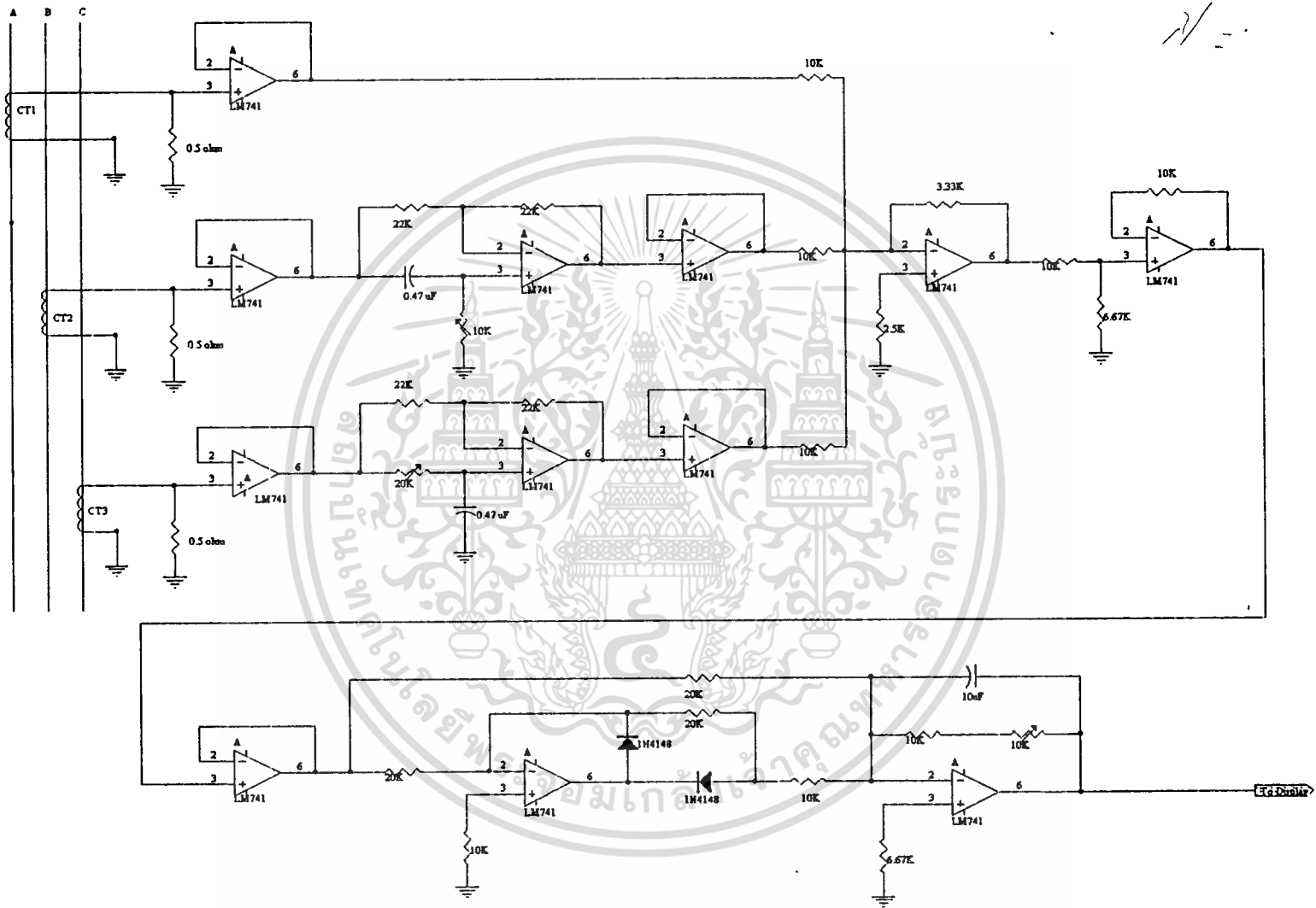
### ส่วนวงจรเปลี่ยนแรงดันอินพุตเป็นคิซี

ซึ่งวงจรในส่วนนี้มีข้อกำหนดที่เอาท์พุทเป็นค่าเฉลี่ย แต่ในโครงการนี้ต้องแสดงผลเป็นค่าใช้งาน (rms) โดยใช้ค่าความต้านปรับค่าต่อเพิ่มเข้าไปเพื่อปรับค่าเอาท์พุทให้เป็นค่าใช้งาน ซึ่งผลจากการทดลองถือว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

### ส่วนแสดงผล

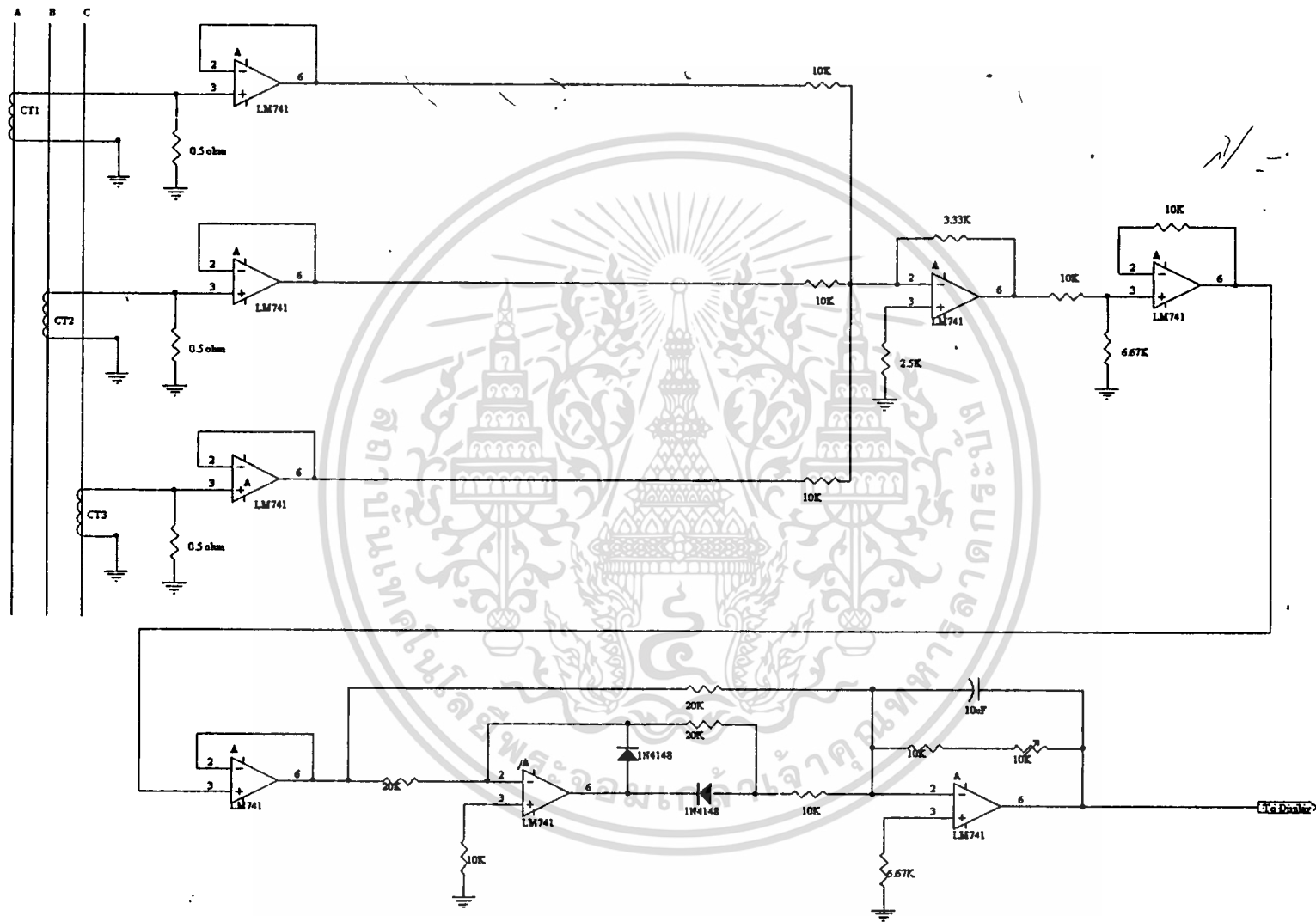
ในส่วนนี้เป็นการแสดงผลเป็นค่าดิจิตอล โดยรับค่าสัญญาณอนาล็อกมาเปลี่ยนเป็นดิจิตอลแล้วนำไปแสดงผล ซึ่งค่าแสดงผลยังไม่ละเอียดพอ(เทคนิค 2 ตำแหน่ง)แต่ถือว่ายอมรับได้

รูปที่ 3.18 วงจรใช้งานจริงสำหรับการวัดกระแสแต่ค่าคัมบวก





รูปที่ 3.20 วงจรใช้งานจริงสำหรับการวัดกระแสต่ำต้นศูนย์



## บทที่ 4

### การทดลองเครื่องวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

ในบทนี้จะเป็นการทดลองเพื่อศึกษาเกี่ยวกับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดฯ โดยเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าที่ได้จากการคำนวณในทีสภาวะเดียวกัน โดยการจำลองระบบไฟฟ้าขึ้นมาในเงื่อนไขต่างๆ เพื่อที่จะทำการทดลองนำเครื่องวัดไปวัดค่าขององค์ประกอบสมมาตรของกระแสในระบบที่ต้องการจะวัด

ซึ่งจากการทดสอบในส่วนต่างๆ ที่ใช้ประกอบในเครื่องวัด จะเห็นว่าส่วนของซีทีนั้นเป็นค่าที่มีความคลาดเคลื่อนสูงมากจนไม่อาจยอมรับได้ (สัญญาณที่ออกจากซีทีเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและมุมที่ไม่คงที่) ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงได้ใช้ค่าของตัวต้านทานเป็นตัวลดขนาดสัญญาณของกระแสในไลน์แทน ซีที กล่าวคือ โดยการนำตัวต้านทานต่ออนุกรมกับกระแสในไลน์ และใช้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน เป็นตัวสัญญาณที่ส่งเข้าเครื่องวัด เพราะฉะนั้นตัวต้านทานนี้จะทำหน้าที่แทนส่วนของ ซีที กับส่วนของวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน เมื่อเทียบกับการที่เราออกแบบเครื่องมือวัดไว้ก่อนหน้านี สำหรับค่าตัวต้านทานที่ใช้ จะเป็นค่า  $= 0.5 \Omega$  ค่านี้สัญญาณที่เข้าเครื่องวัดจะเป็นสัญญาณที่ถูกลดลงมาครึ่งหนึ่งของสัญญาณเดิม เพราะฉะนั้น ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดต้องทำการคูณสอง เพื่อไม่ให้ขนาดของสัญญาณเปลี่ยนแปลง (ขนาดของสัญญาณเท่าเดิม)

โดยการทดลองได้ทำการจำลองระบบไฟฟ้าขึ้นมาโดยแบ่งตามสถานะของแรงดันในระบบส่งจ่าย และชนิดของโหลดได้ดังนี้

#### สถานะแรงดัน

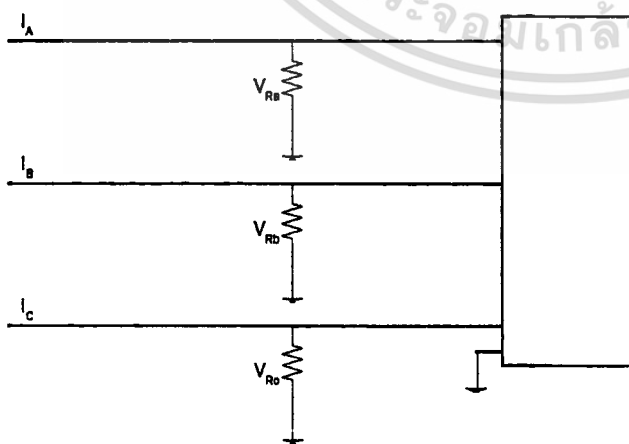
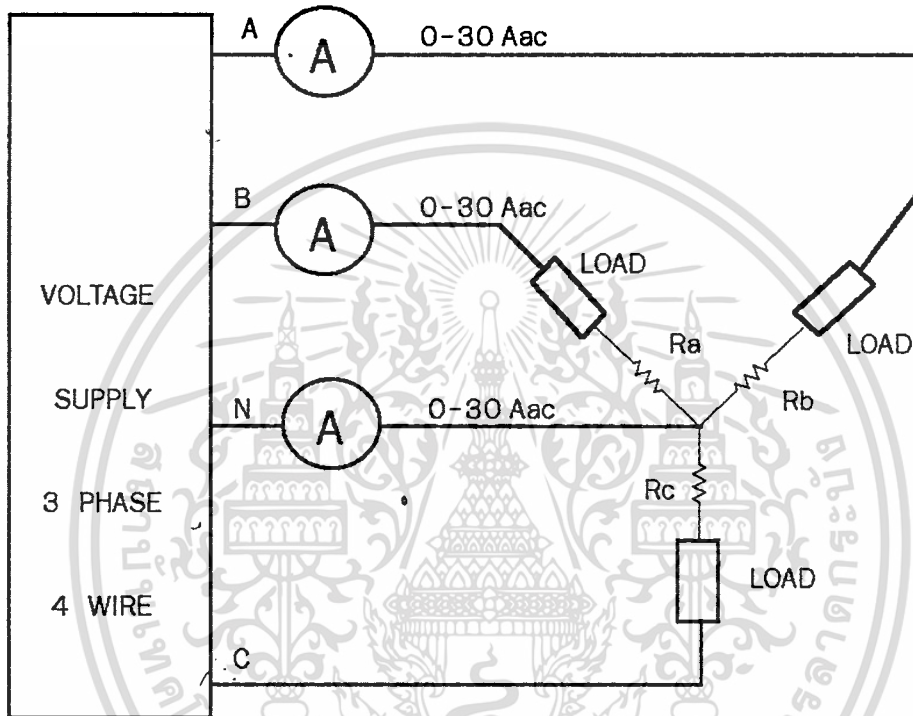
- เมื่อ Voltage แต่ละเฟสเท่ากัน
- เมื่อ Voltage ในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน
- เมื่อ Voltage เกิดเฟสหาย

#### ชนิดของโหลด

- เมื่อเป็น Unity Power Factor Load
- เมื่อเป็น Lagging Power Factor Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเราใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับกระแสในแต่ละไลน์ จึงทำให้การต่อของ  
ภาวะโหลดสามารถต่อได้เฉพาะแบบสตาร์ลงกราวด์ เพราะเนื่องจากสัญญาณที่เข้าในเครื่อง  
วัดต้องมีการต่อกราวด์ร่วม



เครื่องวัดองค์ประกอบ  
สมมาตรของกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.1 รูปวงจรการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 การทดลองที่ 1 เมื่อแรงดันในแต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน

##### 4.1.1 การทดลองที่ 1.1

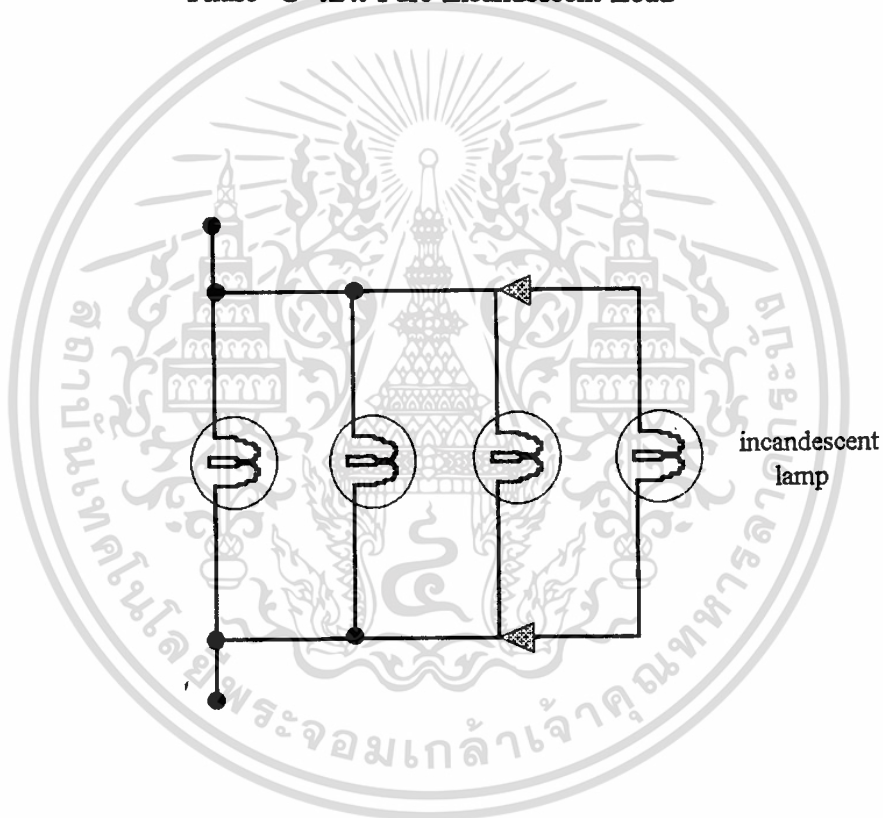
เมื่อเป็น Unity Power Factor Load

โดยโหลดที่ต่อในแต่ละเฟสมีกษณะดังนี้

Phase A เป็น Pure Incandescent Load

Phase B เป็น Pure Incandescent Load

Phase C เป็น Pure Incandescent Load



รูปที่ 4.2 แสดง Unity Power factor load

Voltage of Phase			Current of Phase			Voltage drop Resistor			Symmetrical component of current					
									Measurment			Calulation		
Van	Vbn	Vcn	Ia	Ib	Ic	VRa	VRb	VRc	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>
100∠0	100∠-120	100∠120	9.10∠0	9.25∠-111	9.3∠122.4	4.56∠0	4.62∠-117	4.66∠126°	4.62	0.12	0.15	4.61∠3°	0.137∠-69	0.147∠128.6
220∠0	220∠-119	220∠123	14.5∠0	13.8∠-119	14∠123	7.31∠0	6.7∠-117	7.14∠123	6.96	0.31	0.15	7.05∠2	0.20∠-60.5	0.13∠37°
250∠0	250∠-117	250∠123	15.4∠0	14.2∠-116°	15∠123	7.82∠0	7.03∠-116°	7.6∠123°	7.42	0.39	0.18	7.48∠2.27°	0.35∠-65	0.2∠5.34°

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่ 1.1

#### จากตารางที่ 4.1

$V_{an}$  = Phase Voltage of Phase A

$V_{bn}$  = Phase Voltage of Phase B

$V_{cn}$  = Phase Voltage of Phase C

$I_a$  = Phase Current of Phase A

$I_b$  = Phase Current of Phase B

$I_c$  = Phase Current of Phase C

$V_{Ra}$  = Voltage drop Resistor of Phase A

$V_{Rb}$  = Voltage drop Resistor of Phase B

$V_{Rc}$  = Voltage drop Resistor of Phase C

$I_{a_1}$  = Positive Sequence Current

$I_{a_2}$  = Negative Sequence Current

$I_{a_0}$  = Zero Sequence Current

#### หมายเหตุ

ค่า Symmetrical Component of Current ในตารางผลการทดลอง ซึ่งค่าที่ถูกต้องถูก  
ด้วย 2 อีกครั้งหนึ่ง

**การคำนวณ**

เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดจากเครื่องวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสโดยคำนวณ  
เพื่อหา Symmetrical Component of Current โดยใช้ข้อมูลในบรรทัดที่ 3 ของตาราง 4.1

$$I_a = 15.4 \angle 0$$

$$I_b = 13.8 \angle -119$$

$$I_c = 14 \angle 123$$

จาก Positive Sequence Current

$$\begin{aligned} I_{a_1} &= \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2 I_c) \\ &= \frac{1}{3} [15.4 \angle 0 + (1 \angle 120)(13.8 \angle -119) + (1 \angle 240)(14 \angle 123)] \\ &= \frac{1}{3} (22.44 \angle 2.27) \\ &= 7.48 \angle 2.27 \\ &= 14.96 \angle 2.27 \quad *** \text{ (เป็นค่าที่คูณ 2 แล้ว)} \end{aligned}$$

Negative Sequence Current

$$\begin{aligned} I_{a_2} &= \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \\ &= \frac{1}{3} [(15.4 \angle 0 + (1 \angle 240)(13.8 \angle -119) + (1 \angle 120)(14 \angle 123)] \\ &= \frac{1}{3} (1.05 \angle -65) \\ &= 0.35 \angle -65 \\ &= 0.7 \angle -65 \quad *** \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Zero Sequence Current

$$\begin{aligned}
 I_{a_0} &= \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \\
 &= \frac{1}{3} [(15.4 \angle 0 + 14.2 \angle -116 + 15 \angle 123)] \\
 &= \frac{1}{3} (0.6 \angle 5.34^\circ) \\
 &= 0.2 \angle 5.34 \\
 &= 0.4 \angle 5.34 \quad ***
 \end{aligned}$$

สำหรับการคำนวณเพื่อหากระแสในแต่ละเฟสนั้นเนื่องจากเครื่องวัดนั้นไม่สามารถวัดมุมได้ ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจากข้อมูลที่เอาขนาดของกระแสจากการวัด และเอาขนาดของมุมจากการคำนวณในแต่ละเฟส

$$I_{a_1} = 14.84 \angle 2.27$$

$$I_{a_2} = 0.78 \angle -65$$

$$I_{a_0} = 0.36 \angle 5.34$$

## กระแสใน phase A

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{a_1} + I_{a_2} + I_{a_0} \\
 &= 14.84 \angle 2.27 + 0.78 \angle -65 + 0.36 \angle 5.34 \\
 &= 15.4 \angle 0
 \end{aligned}$$

## กระแสใน phase B

$$\begin{aligned}
 I_b &= a^2 I_{a_1} + a I_{a_2} + I_{a_0} \\
 &= (1 \angle 240) (14.84 \angle 2.27) + (1 \angle 120) (0.78 \angle -65) + 0.36 \angle 5.34 \\
 &= 13.8 \angle -119
 \end{aligned}$$

## กระแสใน phase C

$$\begin{aligned}
 I_c &= a I_{a_1} + a^2 I_{a_2} + I_{a_0} \\
 &= (1 \angle 120) (14.84 \angle 2.27) + (1 \angle 240) (0.78 \angle -65) + 0.36 \angle 5.34 \\
 &= 14 \angle 123
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

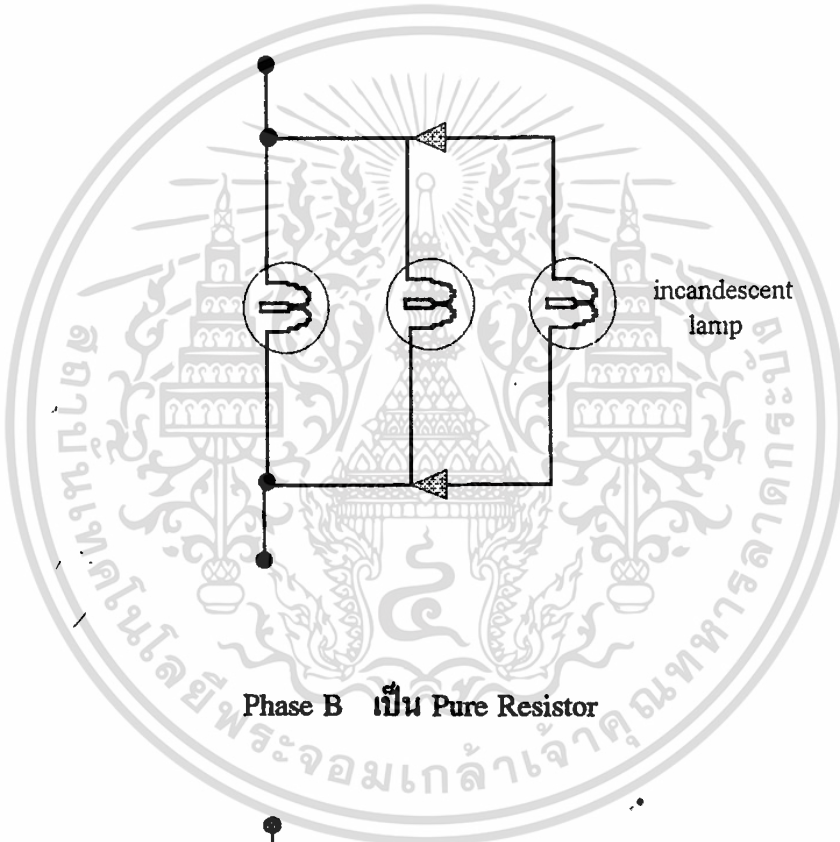
## 1.2 การทดลองที่ 1.2

เมื่อเป็น lagging Power factor load

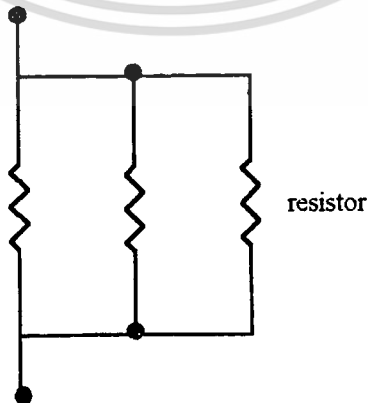
### 4.1.2.1 การทดลองที่ 1.2.1

เมื่อเป็น lagging Power factor load 1 phase  
โดยโหลดในแต่ละเฟรมมีลักษณะดังนี้

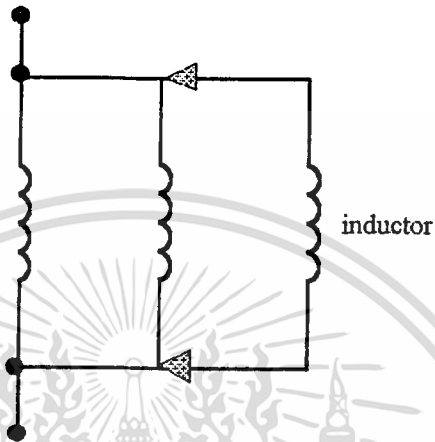
Phase A เป็น Pure Incandescent lamp



Phase B เป็น Pure Resistor



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Phase C เป็น Pure Inductor

รูปที่ 4.3 lagging Power factor load 1 phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage of Phase			Current of Phase			Voltage drop Resistor			Symmetrical component of current					
									Measurment			Calulation		
V <sub>an</sub>	V <sub>bn</sub>	V <sub>cn</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	VR <sub>a</sub>	VR <sub>b</sub>	VR <sub>c</sub>	I <sub>a1</sub>	I <sub>a2</sub>	I <sub>a0</sub>	I <sub>a1</sub>	I <sub>a2</sub>	I <sub>a0</sub>
100∠0	100∠-120	100∠119	9∠0	5.2∠-119	5.6∠41.7	4.42∠0	2.481∠-14	2.893∠41.7	2.71	0.99	1.74	2.67∠4	1.04∠81.3	1.77∠-22
220∠0	220∠122.4	220∠122.4	13∠0	11.4∠120	13∠38.16	6.50∠0	5.54∠122.4	6.57∠37.4	4.97	2.50	2.84	4.85∠28	2.87∠106	2.93∠-4.5
250∠0	250∠122.4	250∠122.4	14∠0	12.9∠122	14.8∠37.4	7.07∠0	6.40∠-123	7.58∠37.4	5.52	2.89	3.14	5.48∠-28.6	3.02∠108	3.21∠-45

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองที่ 1.2.1

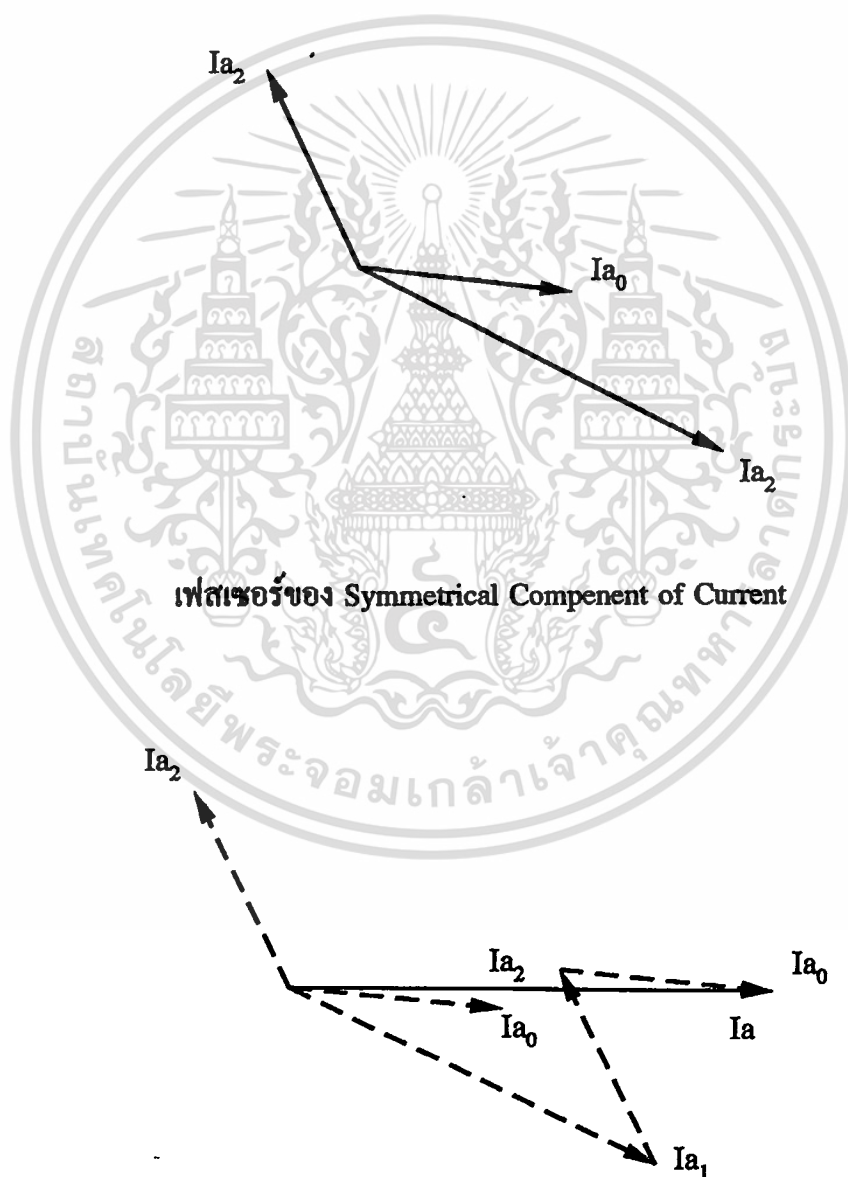
## การวิเคราะห์หากระแสในแต่ละเฟสโดยเฟสเซอร์

โดยใช้ข้อมูลจากบรรทัดที่ 3 ของตาราง 4.2

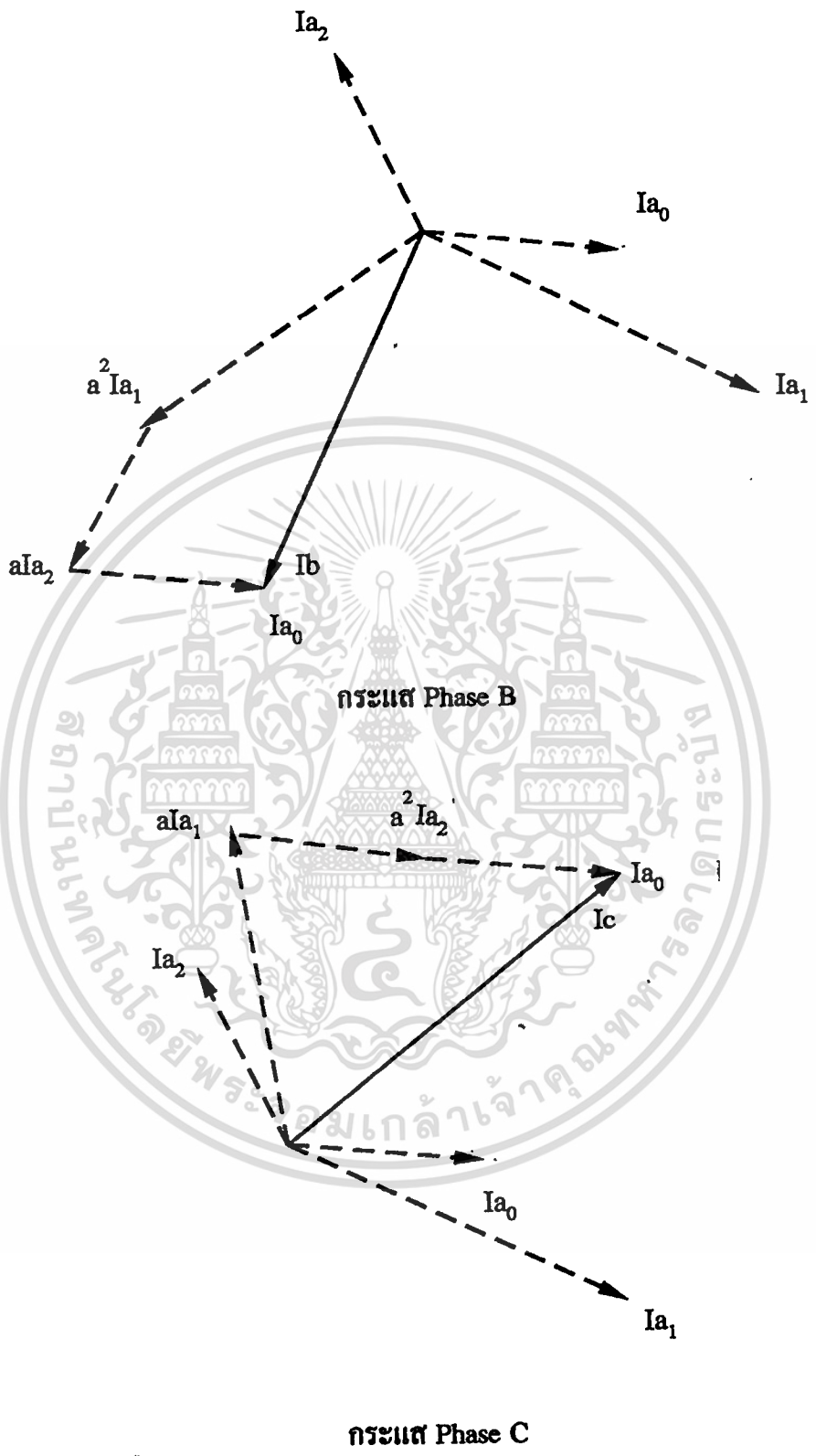
$$I_{a1} \quad 10.96 \angle -28.6$$

$$I_{a2} \quad 6.04 \angle 108$$

$$I_{a0} \quad 6.42 \angle -4.5$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **กระแส Phase A** ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การรวมเฟสเซอร์เพื่อหากระแสในแต่ละเฟส

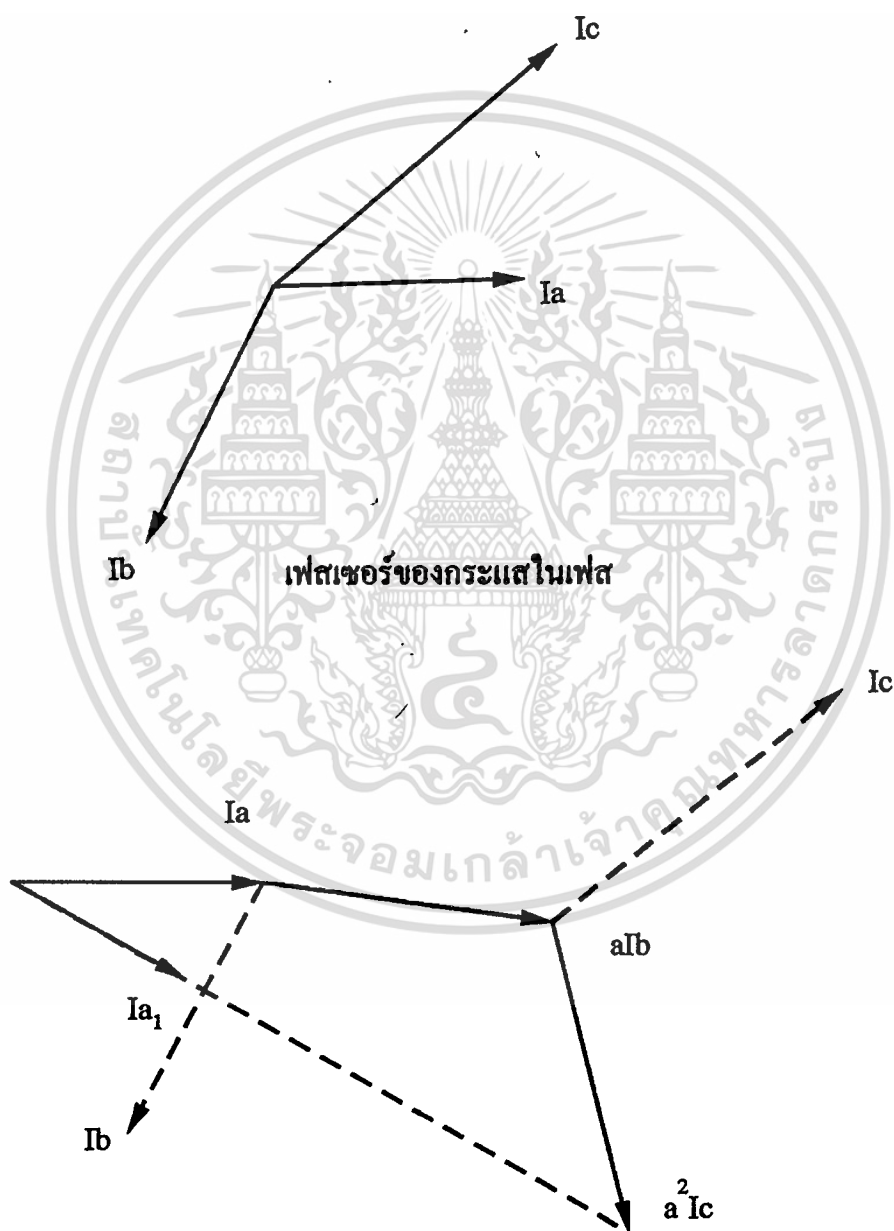
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์หา Symmetrical Component of Current ซึ่งใช้ข้อมูลในบรรทัดที่ 3 ของ ตารางที่ 4.2

$$I_a = 14 \angle 0$$

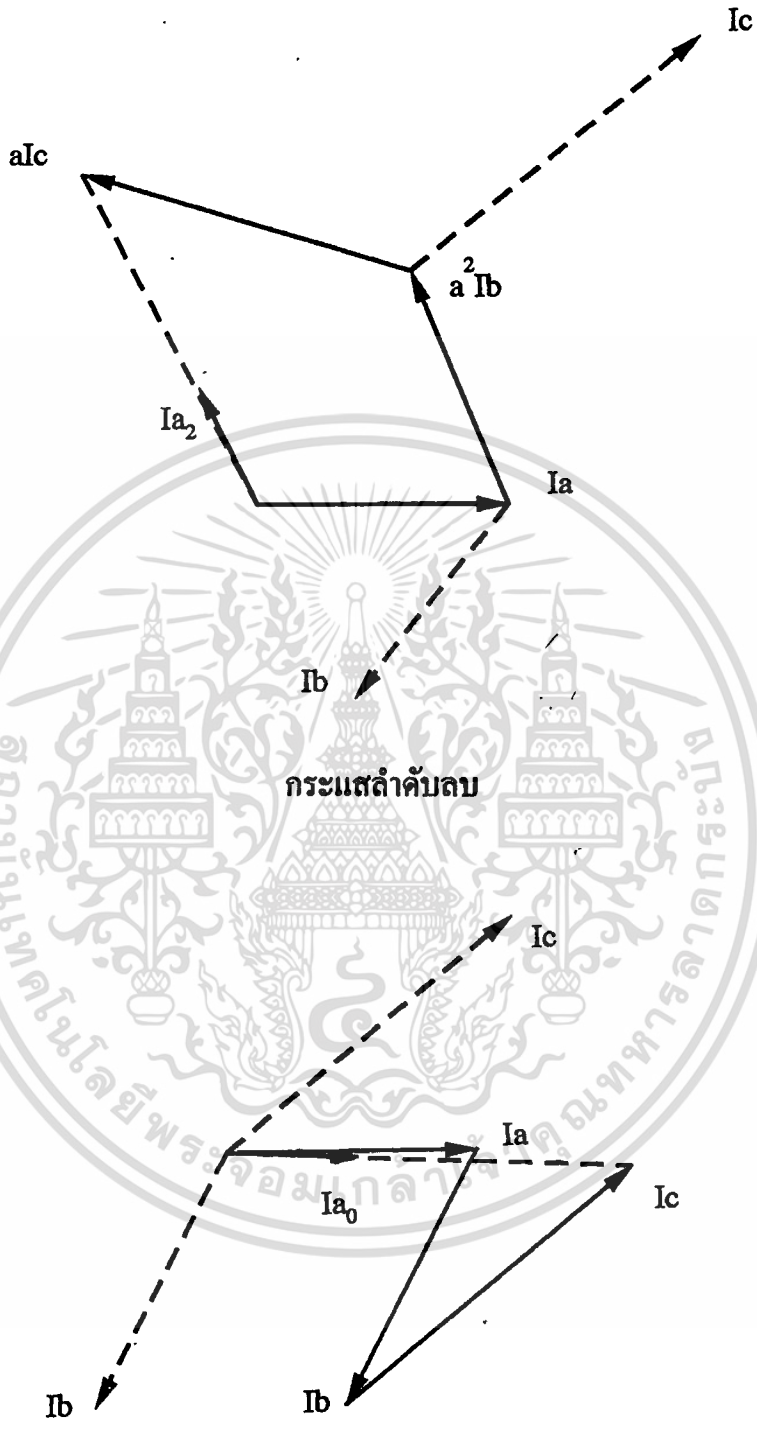
$$I_b = 12.9 \angle -124.4$$

$$I_c = 14.8 \angle 34.7$$



กระแสลำดับบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กระแสลำดับศูนย์

รูปที่ 4.5 การรวมทางเฟสเซอร์ของ Symmetrical Component of Current

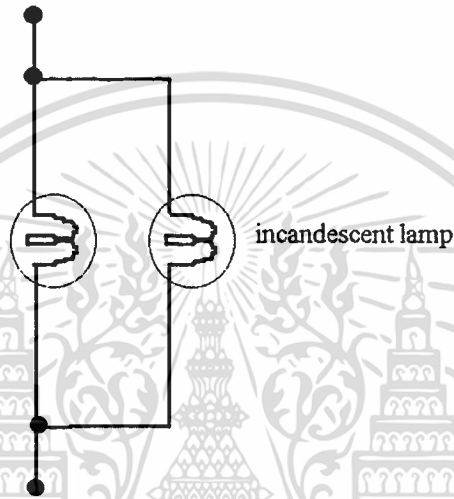
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.2.2 การทดลองที่ 1.2.2

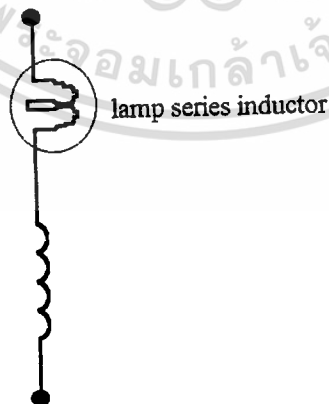
เมื่อเป็น lagging Power factor load 2 phase

โดยโหลดในแต่ละเฟสมีลักษณะดังนี้

Phase A เป็น Pure Incandescent lamp

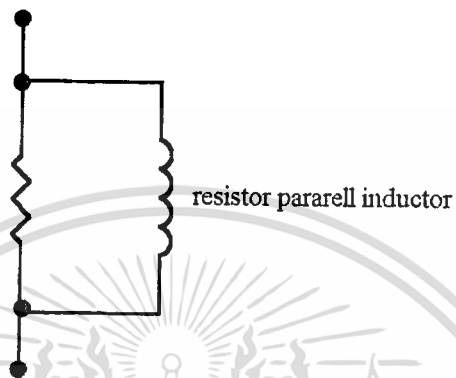


Phase B เป็น Inductor Series lamp



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phase C เป็น Inductor Parallel Resistor



รูปที่ 4.6 lagging Power factor load 2 phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage of Phase			Current of Phase			Voltage drop Resistor			Symmetrical component of current					
									Measurment			Calulation		
Van	Vbn	Vcn	Ia	Ib	Ic	VRa	VRb	VRc	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>
100∠0	100∠122.4	100∠123	7.5∠-68.4	9.1∠-130	6.3∠46.8	3.73∠18.4°	4.38∠-130°	3.148∠46.8	3.28	1.08	1.43	3.26∠-48	1.16∠157°	1.53∠-81
220∠0	220∠122.4	220∠123	14∠50.4	14∠-123	14.2∠50.4	7.07∠-50.4	6.74∠123	7.16∠50.4	6.27	1.97	2.48	6.26∠-14°	2.08∠100	2.59∠-4.6
250∠0	250∠122.4	250∠123	15∠-42.5	14.6∠121	16.2∠57.6	7.85∠-43.2	7.27∠121.7	8.32∠57.6	7.05	2.08	2.55	7.08∠-38	2.06∠167	2.6∠-35.5°

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองที่ 1.2.2

## 4.2 การทดลองที่ 2 เมื่อแรงดันในเฟสมีค่าไม่เท่ากัน

### 4.2.1 การทดลองที่ 2.1

เมื่อเป็น Unity Power factor load

Voltage of Phase			Current of Phase			Voltage drop Resistor			Symmetrical component of current					
									Measurement			Calculation		
Van	Vbn	Vcn	Ia	Ib	Ic	VRa	VRb	VRc	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>
250∠0	150∠-122	100∠123	15.4∠0	11.0∠122.4	9.2∠123	7.84∠0	5.27∠-122	4.55∠121	5.84	1.02	0.92	5.88∠-03	1.08∠12	0.92∠-12°
250∠0	150∠119	50∠122.4	15.4∠0	11.0∠-119	6.5∠122.4	7.79∠0	5.24∠122.4	3.22∠122.4	5.38	1.4	1.22	5.41∠-03	1.42∠25	1.23∠-2.8°
220∠0	220∠116	100∠123	144∠0	14∠-119	9.25∠122.4	7.29∠0	6.50∠120	4.57∠119	6.14	0.76	0.82	6.12∠-03	0.8∠46	0.82∠-415°
220∠0	150∠122.4	80∠121	144∠0	11.2∠122.4	8.2∠121	7.29∠0	5.25∠122.4	4.06∠14	5.49	0.98	0.86	5.53∠0.4	1.02∠21	0.87∠-22

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองที่ 2.1

#### 4.2.2 การทดลองที่ 2.2

เมื่อเป็น lagging Power factor load

##### 4.2.2.1 การทดลองที่ 2.2.1

เมื่อเป็น lagging Power factor load 1 phase

Voltage of Phase			Current of Phase			Voltage drop Resistor			Symmetrical component of current					
									Measurement			Calculation		
V <sub>an</sub>	V <sub>bn</sub>	V <sub>cn</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	V <sub>RA</sub>	V <sub>RB</sub>	V <sub>RC</sub>	I <sub>a1</sub>	I <sub>a2</sub>	I <sub>a0</sub>	I <sub>a1</sub>	I <sub>a2</sub>	I <sub>a0</sub>
250∠0	150∠-122	100∠122	14∠0	8∠-122.4	6∠36	7.25∠0	3.91∠122.4	2.86∠39.6	4.02	1.73	2.44	4∠24.4	1.75∠58.3	2.5∠-11.3
250∠0	150∠122.4	50∠122.4	14∠0	8∠123.4	3.2∠36	7.28∠0	3.87∠122.1	1.49∠36	3.82	1.90	2.21	3.81∠-8.5	1.94∠44	2.27∠-20.3
222∠0	220∠122.4	100∠49.7	14∠0	11.3∠122.4	6∠36	6.71∠0	5.34∠122.4	2.831∠36	4.27	1.97	2.18	4.24∠-14	2.04∠74	2.25∠-25
220∠0	150∠123	80∠121	14∠0	7.8∠122.4	5∠36	6.74∠0	3.82∠123	2.34∠36	3.72	1.74	2.44	3.7∠-13.2	1.74∠566	2.26∠-15.6

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองที่ 2.2.1

#### 4.2.2.2 การทดลองที่ 2.2.2

เมื่อเป็น lagging Power factor load 2 phase

Voltage of Phase			Current of Phase			Voltage drop Resistor			Symmetrical component of current					
									Measurement			Calculation		
Van	Vbn	Vcn	Ia	Ib	Ic	VRa	VRb	VRc	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>
250∠0	150∠-121	100∠118.8	15∠-46.8	11∠-126	6.6∠54.7	7.78∠48.9°	5.30∠-128	3.13∠51.1	4.97	0.21	2.77	49.7∠-40	0.16∠-86	2.83∠-63.4
250∠0	150∠126	50∠121	15∠-44	11.2∠-126	3.3∠46.1	7.85∠44.6	5.18∠-126	1.602∠47.5	4.50	0.67	2.99	4.51∠-34	0.65∠-13	3.09∠-67
220∠0	220∠122.4	100∠189.8	14∠-46.8	13.8∠122.4	6.5∠50.4	7.15∠-46.8	6.55∠122.4	3.199∠51.1	5.05	0.54	2.9	5.04∠-34	0.54∠139°	2.99∠-68.1
220∠0	150∠128	80∠115.2	13.8∠-46.5	11∠-122.4	5.3∠48.9	7.12∠47.5	5.32∠124.6	2.48∠51.1	4.59	0.20	2.7	4.53∠-36	0.26∠-38	2.8∠-12

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองที่ 2.2.2

#### 4.8 การทดลองที่ 8 เมื่อแรงดันเกิดเฟสหาย

##### 4.3.1 การทดลองที่ 3.1

เมื่อเป็น Unity Power factor load

Voltage of Phase			Current of Phase			Voltage drop Resistor			Symmetrical component of current					
									Measurment			Calulation		
Van	Vbn	Vcn	Ia	Ib	Ic	VRa	VRb	VRc	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>
220∠0	220∠-119	0	14∠0	14∠-119	0	6.9∠0	6.65∠122.4	0	4.49	2.31	2.17	4.51∠-1.18	2.34∠57	2.18∠-59.3
220∠0	0	0	14∠0	0	0	7∠0	0	0	2.37	2.37	2.20	2.33∠0	2.33∠0	2.33∠0

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองที่ 3.1

### 4.3.2 การทดลองที่ 3.2

เมื่อเป็น lagging Power factor load

#### 4.3.2.1 การทดลอง 3.2.1

เมื่อเป็น lagging Power factor load 1 phase

Voltage of Phase			Current of Phase			Voltage drop Resistor			Symmetrical component of current					
									Measurment			Calulation		
Van	Vbn	Vcn	Ia	Ib	Ic	VRa	VRb	VRc	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>	Ia <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	Ia <sub>0</sub>
220∠0	220∠122.4	0	14∠0	11∠-122.4	0	6.81∠0	5.15∠122.4	0	3.95	2.11	1.95	3.98∠-1	2.12∠45.9	1.98∠-47
220∠0	0	0	14∠0	0	0	6.8∠0	0	0	2.28	2.27	2.24	2.27∠0	2.27∠0	2.27∠0

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองที่ 3.2.1

### 4.3.2.2 การทดลองที่ 3.2.2

เมื่อเป็น lagging Power factor load 2 phase

Voltage of Phase			Current of Phase			Voltage drop Resistor			Symmetrical component of current					
									Measurement			Calculation		
V <sub>an</sub>	V <sub>bn</sub>	V <sub>cn</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	VR <sub>a</sub>	VR <sub>b</sub>	VR <sub>c</sub>	I <sub>a1</sub>	I <sub>a2</sub>	I <sub>a0</sub>	I <sub>a1</sub>	I <sub>a2</sub>	I <sub>a0</sub>
220∠0	220∠-122.4	0	14.4∠-44.6	14∠-122.4	0	7.12∠46.8	6.52∠122.4	0	4.15	0.69	3.51	4.21∠-26	0.65∠17.6	3.59∠82.6
220∠0	0	0	14∠46.8	0	0	7.02∠-46.8	0	0	2.35	2.35	2.28	2.34∠46.8	2.34∠46.8	2.34∠46.8

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองที่ 3.2.2

#### 4.4 สรุปผลการทดลอง

เมื่อได้ทำการทดลอง ป้อนโหมดที่ปรับค่าได้ต่อเป็นสตาร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ( ทั้งรีซีสตีฟ และรีแอกตีฟ ) ด้วยวารีแอก 1 เฟส 3 ตัว ( ปรับระดับแรงดันแต่ละเฟสได้ ) ที่สภาวะทางไฟฟ้าต่างๆ ( ทั้งสมดุลย์และไม่สมดุลย์ ) ด้วยการปรับวารีแอกและโหลด และเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดเนื่องจากหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า จึงได้ใช้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละเฟสป้อนเข้าเครื่องวัด ( ดูรูปที่ 4.1 ) ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด ( ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสลำดับบวก,ลบ และศูนย์ ) เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณ จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จะสังเกตเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจะมีค่าน้อยเมื่อปริมาณกระแส ( ลำดับบวก,ลบ และศูนย์ ) ที่วัดได้มีค่ามากและในทางกลับกันเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจะมีค่ามากเมื่อปริมาณกระแส ( ลำดับบวก, ลบหรือศูนย์ ) มีค่าน้อยๆเนื่องจากวงจรที่ออกแบบที่ใช้ในวงจรทดลองมีอัตราขยายค่อนข้างสูง ยกตัวอย่างเช่นในกรณีในระบบค่อนข้างสมดุลย์ ( ทั้งขนาดและมุม ) กระแสลำดับลบและศูนย์จะมีค่าน้อยมาก ส่วนกระแสลำดับบวกจะมีค่ามาก ( เกือบเท่ากับกระแสในแต่ละเฟส ) เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกระแสลำดับบวกจะน้อยมาก ( เฉลี่ยประมาณ 1.3 เปอร์เซ็นต์ ) ส่วนเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกระแสลำดับลบและศูนย์จะค่อนข้างมาก ( เฉลี่ยประมาณ 4.7 เปอร์เซ็นต์ ) และเมื่อทำการปรับระบบ ( ทั้งวารีแอกและโหลด ) ให้เกิดความไม่สมดุลย์ขึ้น กระแสลำดับลบและศูนย์จะเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันกระแสลำดับบวกก็จะลดลงแต่ยังคงมีค่ามากกว่ากระแสลำดับลบและศูนย์ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกระแสลำดับบวกจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกระแสลำดับลบและศูนย์จะลดลงมาก ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความสูญเสียของวงจรในเครื่องวัด

## บทที่ 5

### สรุปผลของโครงการและข้อเสนอแนะ

ปฏิญยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอรายละเอียดในการสร้างเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรทางไฟฟ้าโดยจะแสดงอาร์เอ็มเอสของกระแสลำดับบวก,ลบและศูนย์เป็นตัวเลข ( ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ) ในเวลาเดียวกัน โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ( ออปแอมป์เบอร์ LM 741 ) เพื่อที่จะใช้เป็นเครื่องมืออีกชนิดหนึ่งในการศึกษาตลอดจนควบคุมความไม่สมดุลย์ของกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าต่อไป

จากผลการทดลอง ( ซึ่งอยู่ในปฏิญยานิพนธ์ฉบับนี้ ) จะว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระดับหนึ่งซึ่งเกิดจากค่าความสูญเสียในวงจรของเครื่องวัดเนื่องวงจรที่ออกแบบจะให้ออปแอมป์เบอร์ LM 741 จำนวนมากและต่ออยู่บนปริ้นท์สำเร็จ ดังนั้นจึงต้องใช้สายไฟในการเชื่อมต่อแต่ละเสตทจำนวนมาก ซึ่งจะแก้ไขได้โดยใช้ไอซีเบอร์ LM 324 ซึ่งออปแอมป์เบอร์ LM 741 2 ตัว อยู่ในตัวถังเดียวกัน หรือ เบอร์ LM 324 ซึ่งมีออปแอมป์เบอร์ LM 741 4 ตัว ในตัวถังเดียวกันและออกแบบลายปริ้นท์ให้มีการเชื่อมต่อแต่ละเสตทสั้นที่สุดหรือถ้าให้ลดค่าความผิดพลาดในส่วนนี้ลงไปอีกก็อาจใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ความผิดพลาดอีกส่วนหนึ่งที่ต้องตระหนักมากคือผลที่เกิดจากหม้อแปลงกระแสซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ในกรณีที่โหลดเป็นแบบเดลต้าที่ใช้แปลงกระแสในแต่ละเฟสเพื่อป้อนเข้าเครื่องวัด ดังนั้นเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความผิดพลาดในส่วนนี้จึงใช้หม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ( อัตราส่วนและมุมเฟสของกระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณกระแสทางด้านปฐมภูมิ ) และมีคุณสมบัติเหมือนกันทั้ง 3 ตัว

ความผิดพลาดอีกส่วนหนึ่งที่ไม่ได้กล่าวถึงเลยคือความผิดพลาดของมุมเฟสของกระแสลำดับบวก ลบและศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นนี้ไม่ได้ทำการวัดมุมเฟสของกระแสลำดับบวก ลบและศูนย์นั่นเอง ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มความสมบูรณ์ของเครื่องวัดนี้จึงควรมีการแสดงผลมุมเฟสของกระแสลำดับบวก ลบและศูนย์ด้วย

เนื่องจากส่วนของการแสดงผลเป็นวงจรที่นำเอาค่ายอดของรูปคลื่นมาคูณด้วยค่าคงที่ ( เท่ากับ 0.707 ) แล้วแสดงเป็นตัวเลข ดังนั้นค่าที่ได้จึงเป็นค่า อาร์เอ็มเอส ของกระแสที่มีค่ารูปคลื่นเป็นไซน์ดังนั้นเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นมานี้จึงวัดได้แต่กระแสที่ค่ารูปคลื่นเป็นไซน์เท่านั้น ซึ่งในกรณีที่กระแสที่วัดมีค่ารูปคลื่นเป็นไซน์ ( ประกอบด้วยฮาร์โมนิก ) จึงต้องเปลี่ยนภาคแสดงผลใหม่ให้สามารถวัดค่าอาร์เอ็มเอสได้ทุกรูปคลื่นและเพื่อความสะดวกในการศึกษาความไม่สมดุลย์ของกระแสไฟฟ้าดังนั้นควรจะมีส่วนเพิ่มเติมเพื่อที่จะแสดงปริมาณของกระแสในแต่ละเฟส ( รวมทั้งนิรตราลดด้วยถ้าในกรณีที่ระบบ 3 เฟส 4 สาย ) ทั้งขนาดและมุม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขอบเขตของงานที่ทำแล้ว

1. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับ Symmetrical component
2. ศึกษาหาแนวทางในการวัด Symmetrical component of current
3. ออกแบบและสร้างวงจรสำหรับการวัด
  - กระแสลำดับบวก
  - กระแสลำดับลบ
  - กระแสลำดับศูนย์
4. ประกอบส่วนต่างๆของเครื่องมือวัดฯ
5. ทดลองเครื่องวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสเปรียบเทียบกับกรคำนวณ
6. จัดทำกล่องเครื่องมือวัด ฯ

### ประโยชน์ของเครื่องวัด ฯ

ในปัจจุบันนั้นระบบไฟฟ้าที่ใช้งานทั่วไปจะเป็นระบบที่ Unbalance เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงของโหลดเป็นไปตลอดเวลาและไม่สามารถควบคุมได้และสาเหตุจากการขัดข้องของระบบส่งจ่ายของการไฟฟ้า เช่น แรงดันมาไม่เท่ากันในแต่ละเฟสหรือเกิดเฟสหาย โดยในปัจจุบันจะเห็นว่ามี การตรวจเช็คระบบที่เกิดการ Unbalance โดยการใช้ Negative Over current relay ตรวจเช็คระบบของกระแส Negative ถ้ามีค่ามากจนถึงระดับที่ตั้งไว้ ตัว relay จะทำหน้าที่ ปลดวงจรออกจากระบบไฟฟ้า หรือใช้ Ampmeter วัดกระแสในแต่ละเฟส ซึ่งสามารถรู้เฉพาะขนาดของกระแสเท่านั้น หรือใช้ Power factor-meter ซึ่งสามารถตรวจเช็คได้เฉพาะขนาดของมุมเฟสเท่านั้น

แต่สำหรับเครื่องวัดนี้ เมื่อนำไปต่อไว้ในระบบที่ต้องการตรวจเช็คกระแสของระบบโดยหลักการของเครื่องวัดแล้วเป็นการนำกระแสทั้ง 3 เฟสที่เอาทั้งขนาดและมุมเฟสมาทำการรวมกัน ซึ่งทำให้เราสามารถตรวจเช็คระบบได้อย่างสมบูรณ์และที่สำคัญค่าที่เครื่องวัดแสดงผลออกมานั้นเป็นค่าจริงในเวลาขณะนั้น(Real time)ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆซึ่งต้องนำค่าที่วัดได้มาวิเคราะห์หรือคำนวณก่อนจึงสามารถทราบค่าต่างๆ ด้วยเหตุผลที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขณะนั้นค่าที่วิเคราะห์ได้จึง ไม่ใช่ค่าที่เป็น Real time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อเสนอแนะ

1. โครงการนี้ได้ทำการสร้างเคื่องมือวัด ดังนั้นควรรหามาตรฐานมารับ
2. เครื่องวัดนี้ได้ออกแบบสำหรับวัดขนาดกระแสอย่างเดียว ควรปรับปรุงให้สามารถวัดมมเฟสได้ด้วย
3. ค่าผิดพลาดที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบวงจรควรเลือกอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงหรืออาจใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาร่วมทำงาน
4. โครงการนี้ใช้ตัวต้านทานเป็นตัวจับสัญญาณกระแสในแต่ละเฟสซึ่งยังไม่เหมาะสมกับการใช้งาน ควรหาหม้อแปลงกระแสที่มีคุณภาพสูงๆ มาทำหน้าที่แทนเพื่อที่จะสามารถวัดค่าได้สูงๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๒๑



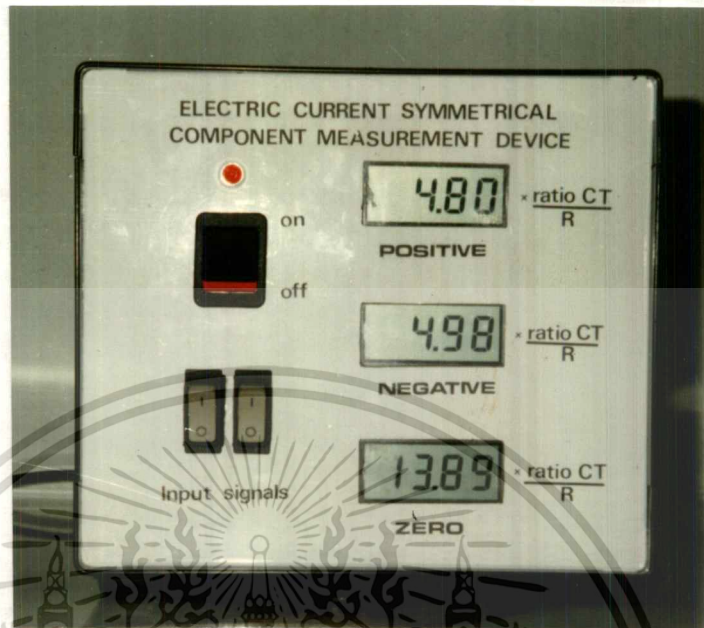
ภาคผนวก ก

## รูปภาพและวิธีใช้เครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก : รูปภาพ และ วิธีใช้เครื่องมือวัด ฯ

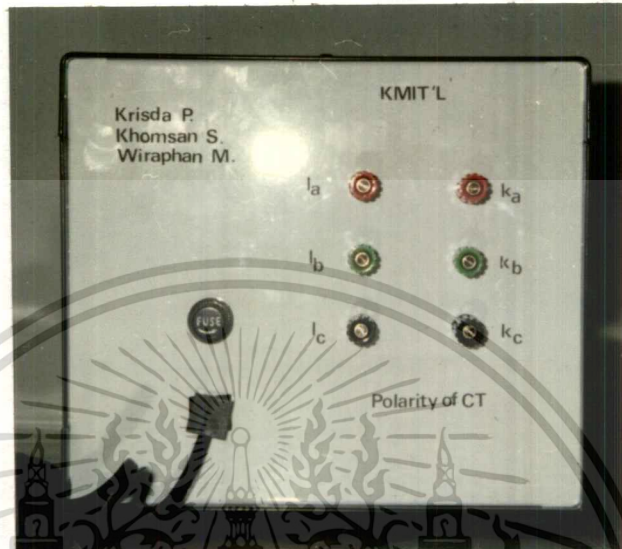
รูปภาพ :



รูปภาพ ด้านหน้าของเครื่องวัด องค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า



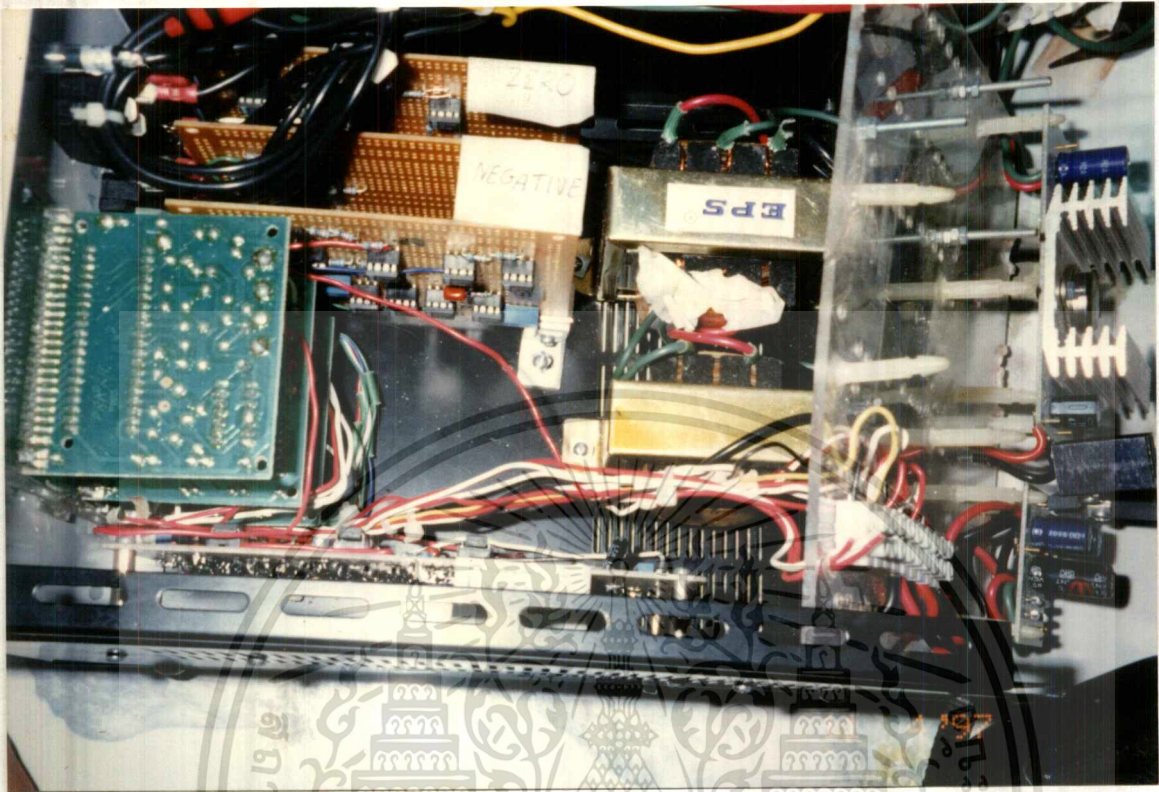
รูปภาพ มิติต่างด้านหน้าของเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพ ด้านหลังของเครื่องวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งรูปภาพ มิติด้านหลังของเครื่องวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า



รูปภาพ วงจรภายในของเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมรรถนะของกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

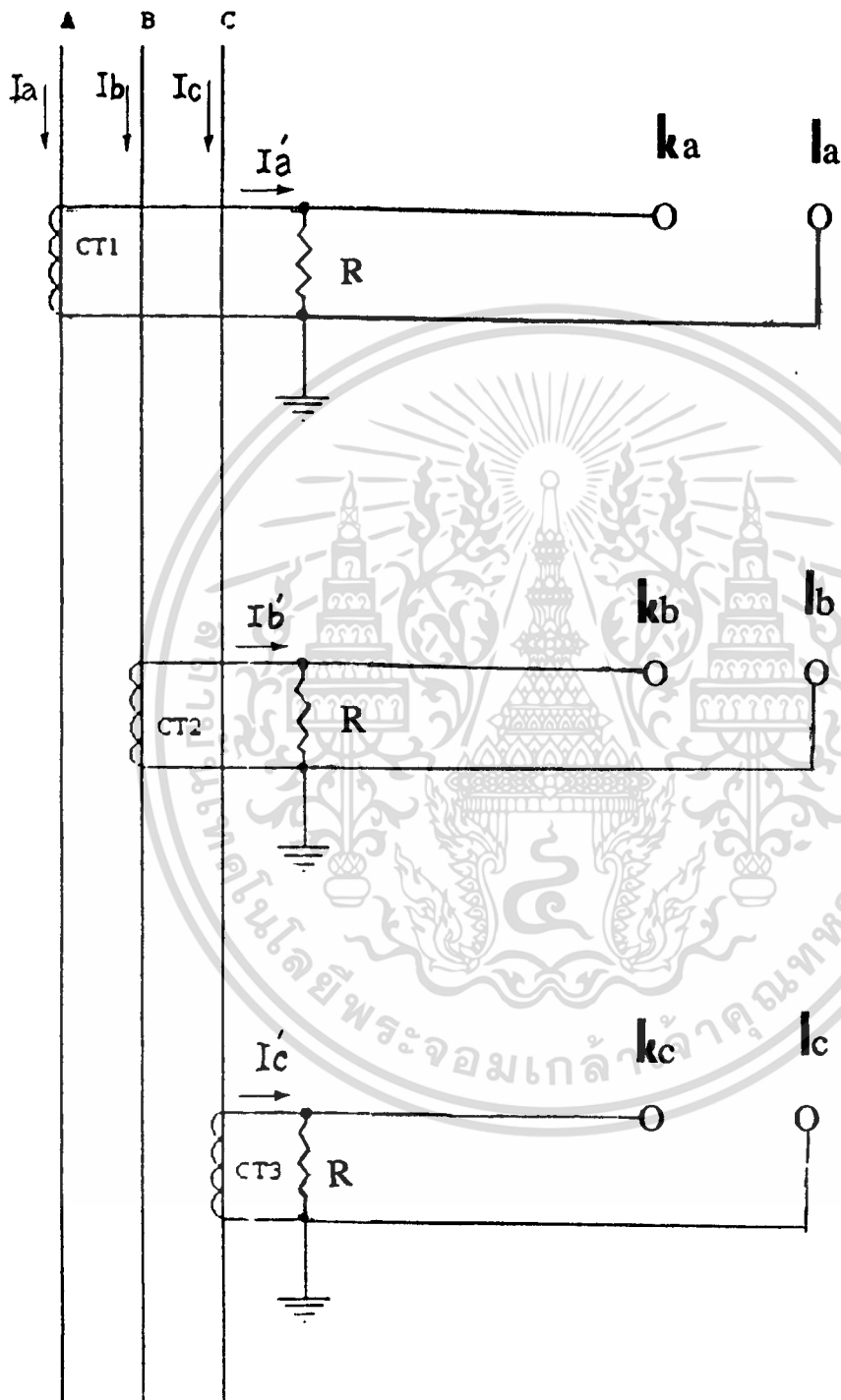
วิธีการใช้เครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า : เขียนเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. เชียบปลั๊กซ์ (ของเครื่องมือวัด) และกดสวิทซ์ที่ตำแหน่ง ON เมื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้ ไอซี ภายในเครื่องมือวัด ฯ
2. ต่อตัวต้านทาน R เข้ากับด้านทุติยภูมิของ CT แล้วนำแรงดันตกคร่อม R ทั้ง 3 ตัว ป้อนเข้าทั้ง 6 ที่อยู่ทางด้านหลังของเครื่องมือวัดฯ ส่วนด้านปฐมภูมิของ CT ต่อ (หรือคล้อง) กับ 3 เฟส ที่เราต้องการวัดฯ โดยดูรายละเอียดจากรูปการต่อ
3. กดสวิทซ์ input signals ให้อยู่ในตำแหน่ง 1 เพื่อป้อนแรงดันตกคร่อม R เข้าเครื่องมือวัด
4. ค่าที่อ่านได้ต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ ratio CT / R โดยที่

$$\text{ratio CT} = I_{pri}/I_{sec} = I_a/I_{a'} = I_b/I_{b'} = I_c/I_{c'}$$

#### หมายเหตุ

- สายที่ใช้ต่อจากทุติยภูมิของ CT มายัง R ควรมียิมพีแดนซ์ ต่ำมาก ๆ (โตะและสั้น) เพื่อลดความผิดพลาดอันเนื่องจาก CT
- ตัวต้าน R ที่ใช้ ควรทดสอบหาค่า R โดยวิธี โวลท์ - แอมป์ ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ และจะต้องทนกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า  $(I_{sec \max})^2 R$  และใช้ R ที่ต่ำกว่าค่าเบอร์เดนของ CT เล็กน้อย. เพื่อลดความผิดพลาดอันเนื่องจาก CT
- CT ทั้ง 3 ตัวจะต้องมีคุณภาพสูงและมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ
- ถ้าด้านปฐมภูมิของ CT มีกระแสไหลห้ามเปิดวงจร ด้านทุติยภูมิเป็นอันขาด



รูปแสดงต่อตัวต้านทาน R เท่ากับ ทุติยภูมิของ CT แล้วนำแรงดันตกคร่อม R ป้อน  
 เอกสารนี้ เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 เข้า ขั้วทั้ง 6 (อยู่ด้านหลัง) ของเครื่องมือวัด  
 ไม่มีการแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก : ข

**DATASHEET** ของอุปกรณ์ต่างๆ

**ที่ใช้ในการสร้างเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MOTOROLA**  
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

## Axial-Lead Standard Recovery Rectifiers

This data sheet provides information on subminiature size, axial lead mounted rectifiers for general-purpose low-power applications.

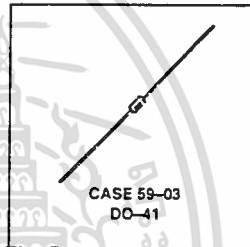
### Mechanical Characteristics

- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 0.4 gram (approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead and Mounting Surface Temperature for Soldering Purposes: 220°C Max. for 10 Seconds, 1/16" from case
- Shipped in plastic bags, 1000 per bag.
- Available Tape and Reeled, 5000 per reel, by adding a "RL" suffix to the part number
- Polarity: Cathode Indicated by Polarity Band
- Marking: 1N4001, 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007

**1N4001  
thru  
1N4007**

1N4004 and 1N4007 are Motorola Preferred Devices

**LEAD MOUNTED  
RECTIFIERS  
50-1000 VOLTS  
DIFFUSED JUNCTION**



### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit
*Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V <sub>RRM</sub> V <sub>VRWM</sub> V <sub>R</sub>	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
*Non-Repetitive Peak Reverse Voltage (halfwave, single phase, 60 Hz)	V <sub>RSM</sub>	60	120	240	480	720	1000	1200	Volts
*RMS Reverse Voltage	V <sub>R(RMS)</sub>	35	70	140	280	420	560	700	Volts
*Average Rectified Forward Current (single phase, resistive load, 60 Hz, see Figure 8, T <sub>A</sub> = 75°C)	I <sub>O</sub>	1.0							Amp
*Non-Repetitive Peak Surge Current (surge applied at rated load conditions, see Figure 2)	I <sub>FSM</sub>	30 (for 1 cycle)							Amp
Operating and Storage Junction Temperature Range	T <sub>J</sub> T <sub>stg</sub>	- 65 to +175							°C

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS\*

Rating	Symbol	Typ	Max	Unit
Maximum Instantaneous Forward Voltage Drop (I <sub>F</sub> = 1.0 Amp, T <sub>J</sub> = 25°C) Figure 1	V <sub>F</sub>	0.93	1.1	Volts
Maximum Full-Cycle Average Forward Voltage Drop (I <sub>O</sub> = 1.0 Amp, T <sub>L</sub> = 75°C, 1 inch leads)	V <sub>F(AV)</sub>	—	0.8	Volts
Maximum Reverse Current (rated dc voltage) (T <sub>J</sub> = 25°C) (T <sub>J</sub> = 100°C)	I <sub>R</sub>	0.05 1.0	10 50	μA
Maximum Full-Cycle Average Reverse Current (I <sub>O</sub> = 1.0 Amp, T <sub>L</sub> = 75°C, 1 inch leads)	I <sub>R(AV)</sub>	—	30	μA

\*Indicates JEDEC Registered Data

Preferred devices are Motorola's recommended choices for future use and best overall value.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# HIGH-SPEED SILICON DIODES



Whiskerless diodes in subminiature DO-35 envelopes.  
These diodes are primarily intended for fast logic applications.

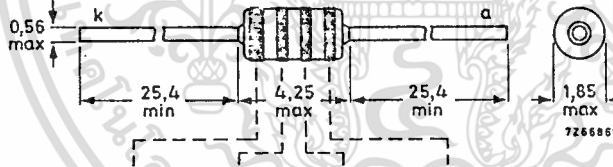
## QUICK REFERENCE DATA

Continuous reverse voltage	$V_R$	max.	75 V
Repetitive peak reverse voltage	$V_{RRM}$	max.	75 V
Repetitive peak forward current	$I_{FRM}$	max.	450 mA
Forward voltage			
1N4148: $I_F = 10$ mA	$V_F$	<	1 V
1N4446: $I_F = 20$ mA			
1N4448: $I_F = 100$ mA			
Reverse recovery time when switched from $I_F = 10$ mA to $I_R = 60$ mA; $R_L = 100 \Omega$ ; measured at $I_R = 1$ mA	$t_{rr}$	<	4 ns

## MECHANICAL DATA

Dimensions in mm

Fig. 1 SOD-27 (DO-35).



1N4148:	yellow	brown	yellow	grey
1N4446:	yellow	yellow	yellow	blue
1N4448:	yellow	yellow	yellow	grey
	(cathode)			

### Note:

Also available with type number markings and cathode side indicated by a coloured band.

Products, available to CECC 50 001 021.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## RATINGS

Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134)

Continuous reverse voltage	$V_R$	max.	75 V
Repetitive peak reverse voltage	$V_{RRM}$	max.	75 V
Average rectified forward current	$I_{F(AV)}$	max.	150 mA
Forward current (d.c.)	$I_F$	max.	200 mA
Repetitive peak forward current	$I_{FRM}$	max.	450 mA
Non-repetitive peak forward current			
$t = 1 \mu s$	$I_{FSM}$	max.	2000 mA
$t = 1 s$	$I_{FSM}$	max.	500 mA
Total power dissipation up to $T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$P_{tot}$	max.	500 mW
Derating factor			2,85 mW/K
Storage temperature	$T_{stg}$		-65 to + 200 $^\circ\text{C}$
Junction temperature	$T_j$	max.	200 $^\circ\text{C}$

## CHARACTERISTICS

$T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  unless otherwise specified

Forward voltages

1N4148:  $I_F = 10 \text{ mA}$

1N4446:  $I_F = 20 \text{ mA}$

1N4448:  $I_F = 100 \text{ mA}$

1N4448:  $I_F = 5 \text{ mA}$

$V_F < 1 \text{ V}$

$V_F$  0,62 to 0,72 V

Reverse avalanche breakdown voltage

$I_R = 100 \mu\text{A}$

$I_R = 5 \mu\text{A}$

$V_{(BR)R} > 100 \text{ V}$

$V_{(BR)R} > 75 \text{ V}$

Reverse currents

$V_R = 20 \text{ V}$

$V_R = 20 \text{ V}; T_j = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

$V_R = 20 \text{ V}; T_j = 150 \text{ }^\circ\text{C}$

$I_R < 25 \text{ nA}$

1N4448  $I_R < 3 \mu\text{A}$

$I_R < 50 \mu\text{A}$

Diode capacitance

$V_R = 0; f = 1 \text{ MHz}$

$C_d < 4 \text{ pF}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## E.5 OPERATIONAL AMPLIFIERS\*

### BJT (741)\*

# FREQUENCY-COMPENSATED OPERATIONAL AMPLIFIER

## FAIRCHILD LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

**GENERAL DESCRIPTION** — The  $\mu$ A741 is a high performance monolithic Operational Amplifier constructed using the Fairchild Planar\* epitaxial process. It is intended for a wide range of analog applications. High common mode voltage range and absence of latch-up tendencies make the  $\mu$ A741 ideal for use as a voltage follower. The high gain and wide range of operating voltage provides superior performance in integrator, summing amplifier, and general feedback applications. Electrical characteristics of the  $\mu$ A741A and E are identical to MIL-M-38510/10101.

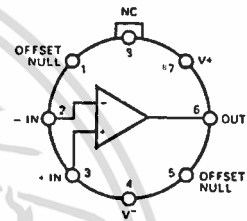
- NO FREQUENCY COMPENSATION REQUIRED
- SHORT CIRCUIT PROTECTION
- OFFSET VOLTAGE NULL CAPABILITY
- LARGE COMMON MODE AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGES
- LOW POWER CONSUMPTION
- NO LATCH-UP

#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage	$\mu$ A741A, $\mu$ A741, $\mu$ A741E	$\pm 22$ V
	$\mu$ A741C	$\pm 18$ V
Internal Power Dissipation (Note 1)		
Metal Can		500 mW
Molded and Hermetic DIP		670 mW
Mini DIP		310 mW
Flatpak		570 mW
Differential Input Voltage		$\pm 30$ V
Input Voltage (Note 2)		$\pm 15$ V
Storage Temperature Range		
Metal Can, Hermetic DIP, and Flatpak		$-65^{\circ}\text{C}$ to $+150^{\circ}\text{C}$
Mini DIP, Molded DIP		$-55^{\circ}\text{C}$ to $+125^{\circ}\text{C}$
Operating Temperature Range		
Military ( $\mu$ A741A, $\mu$ A741)		$-55^{\circ}\text{C}$ to $+125^{\circ}\text{C}$
Commercial ( $\mu$ A741E, $\mu$ A741C)		$0^{\circ}\text{C}$ to $+70^{\circ}\text{C}$
Lead Temperature (Soldering)		
Metal Can, Hermetic DIPs, and Flatpak (60 s)		$300^{\circ}\text{C}$
Molded DIPs (10 s)		$260^{\circ}\text{C}$
Output Short Circuit Duration (Note 3)		Indefinite

#### CONNECTION DIAGRAMS

8-LEAD METAL CAN  
(TOP VIEW)  
PACKAGE OUTLINE 5B

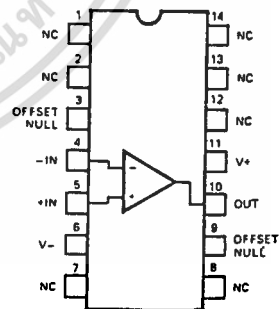


Note: Pin 4 connected to case

#### ORDER INFORMATION

TYPE	PART NO.
$\mu$ A741A	$\mu$ A741AHM
$\mu$ A741	$\mu$ A741HM
$\mu$ A741E	$\mu$ A741EHC
$\mu$ A741C	$\mu$ A741HC

14-LEAD DIP  
(TOP VIEW)  
PACKAGE OUTLINE 6A, 9A



#### ORDER INFORMATION

TYPE	PART NO.
$\mu$ A741A	$\mu$ A741ADM
$\mu$ A741	$\mu$ A741DM
$\mu$ A741E	$\mu$ A741EDC
$\mu$ A741C	$\mu$ A741DC
$\mu$ A741C	$\mu$ A741PC

8-LEAD MINI-DIP  
(TOP VIEW)  
PACKAGE OUTLINES 6T 9T  
PACKAGE CODES T R

ORDER INFORMATION

TYPE	PART NO.
$\mu$ A741C	$\mu$ A741TC
$\mu$ A741C	$\mu$ A741RC

10-LEAD FLATPAK  
(TOP VIEW)  
PACKAGE OUTLINE 3F

ORDER INFORMATION

TYPE	PART NO.
$\mu$ A741A	$\mu$ A741AFM
$\mu$ A741	$\mu$ A741FM

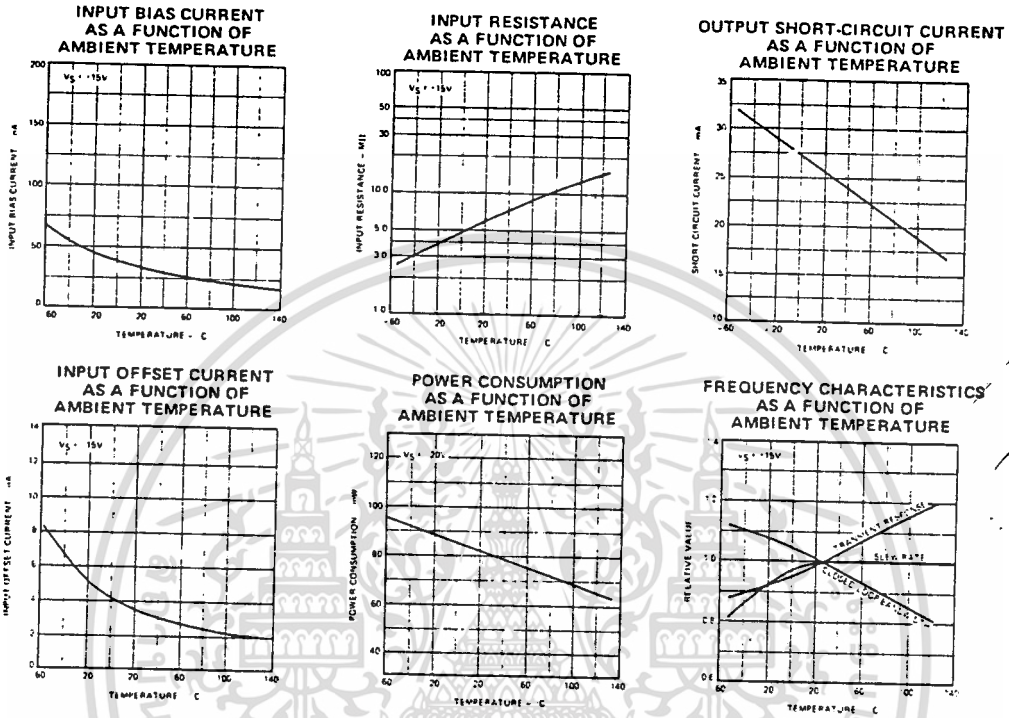
Notes on following pages.

\* Planar is a patented Fairchild process.

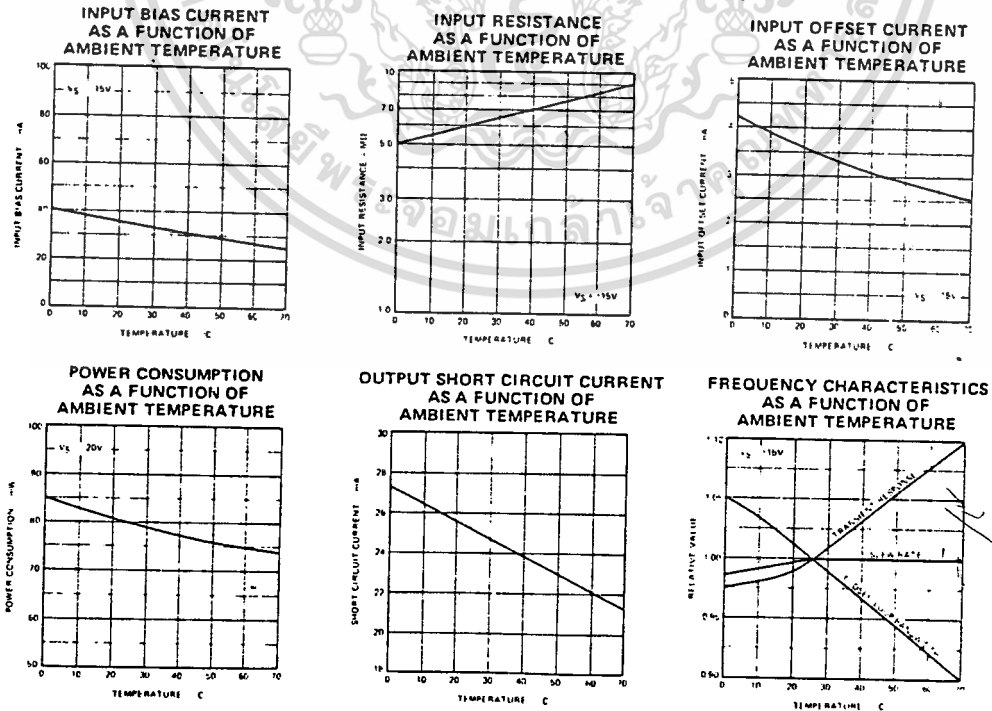
\*Courtesy of Fairchild. For 741 circuit diagram see Fig. 5-25.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL PERFORMANCE CURVES FOR  $\mu A741A$  AND  $\mu A741$



TYPICAL PERFORMANCE CURVES FOR  $\mu A741E$  AND  $\mu A741C$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## E.5 OPERATIONAL AMPLIFIERS (continued)

μA741

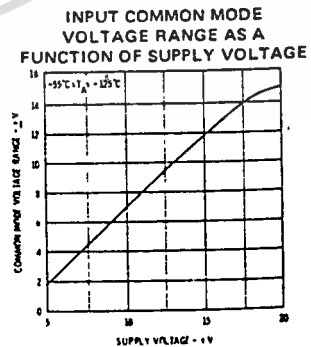
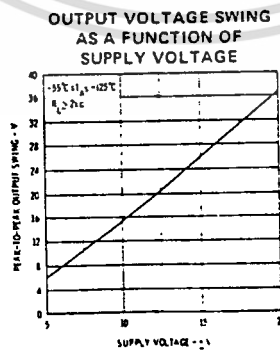
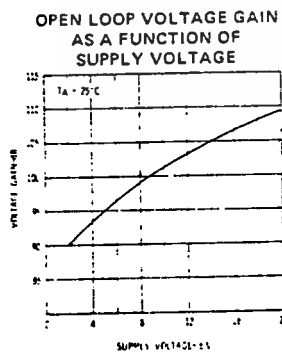
ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_S = \pm 15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified)

PARAMETERS (see definitions)	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Input Offset Voltage	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$		1.0	5.0	mV
Input Offset Current			20	200	nA
Input Bias Current			80	500	nA
Input Resistance		0.3	2.0		M $\Omega$
Input Capacitance			1.4		pF
Offset Voltage Adjustment Range			$\pm 15$		mV
Large Signal Voltage Gain	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_{OUT} = \pm 10\text{ V}$	50,000	200,000		
Output Resistance			75		$\Omega$
Output Short Circuit Current			25		mA
Supply Current			1.7	2.8	mA
Power Consumption			50	85	mW
Transient Response (Unity Gain)	Rise time	$V_{IN} = 20\text{ mV}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$ , $C_L \leq 100\text{ pF}$	0.3		$\mu\text{s}$
	Overshoot		5.0		%
Slew Rate	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$		0.5		V/ $\mu\text{s}$

The following specifications apply for  $-55^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$ :

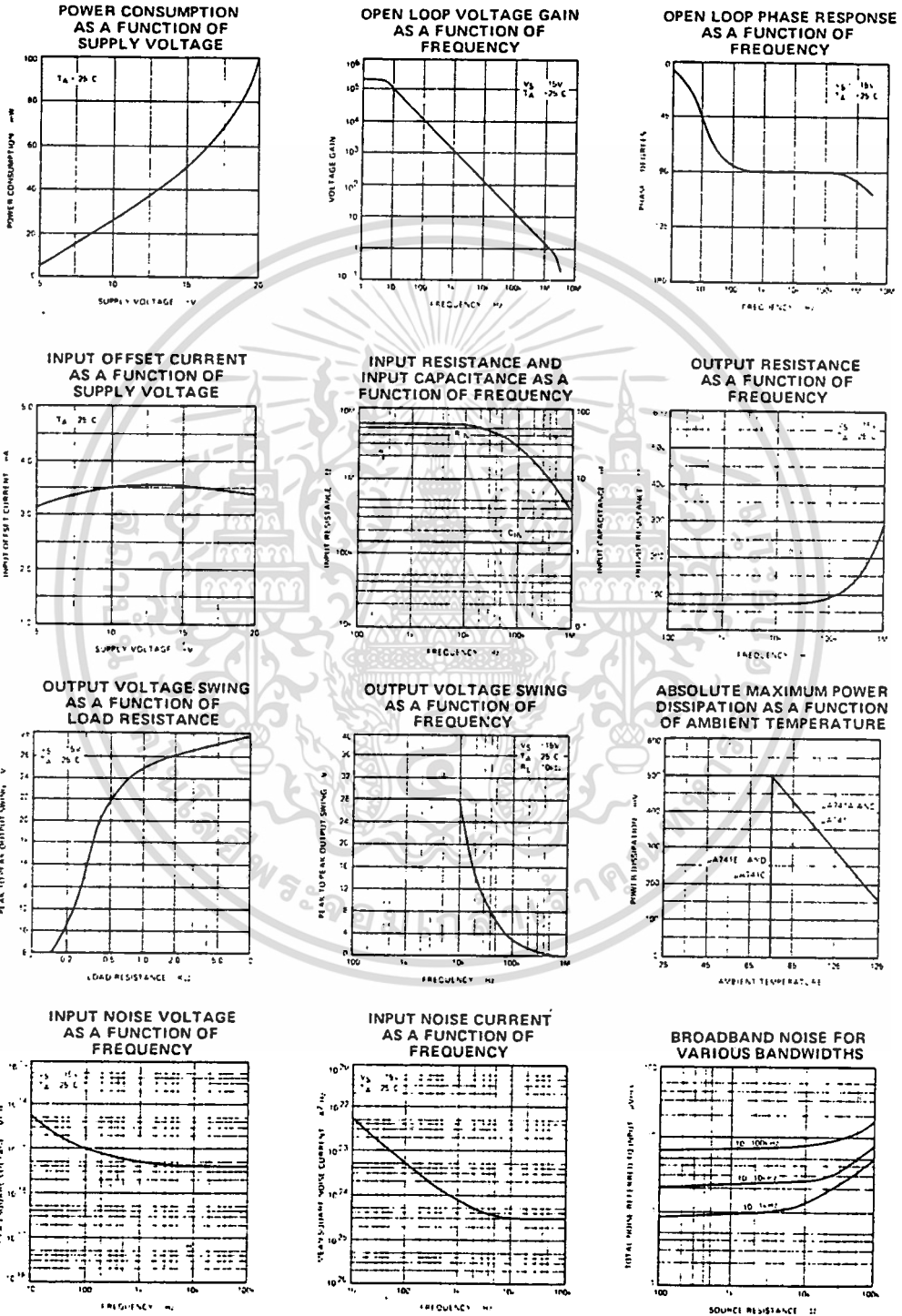
Input Offset Voltage	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$		1.0	6.0	mV
Input Offset Current	$T_A = +125^\circ\text{C}$		7.0	200	nA
	$T_A = -55^\circ\text{C}$		85	500	nA
Input Bias Current	$T_A = +125^\circ\text{C}$		0.03	0.5	$\mu\text{A}$
	$T_A = -55^\circ\text{C}$		0.3	1.5	$\mu\text{A}$
Input Voltage Range		$\pm 12$	$\pm 13$		V
Common Mode Rejection Ratio	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	70	90		dB
Supply Voltage Rejection Ratio	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$		30	150	$\mu\text{V/V}$
Large Signal Voltage Gain	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_{OUT} = \pm 10\text{ V}$	25,000			
Output Voltage Swing	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	$\pm 12$	$\pm 14$		V
	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	$\pm 10$	$\pm 13$		V
Supply Current	$T_A = +125^\circ\text{C}$		1.5	2.5	mA
	$T_A = -55^\circ\text{C}$		2.0	3.3	mA
Power Consumption	$T_A = +125^\circ\text{C}$		45	75	mW
	$T_A = -55^\circ\text{C}$		60	100	mW

### TYPICAL PERFORMANCE CURVES FOR μA741A AND μA741



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL PERFORMANCE CURVES FOR  $\mu A741A$ ,  $\mu A741$ ,  $\mu A741E$  AND  $\mu A741C$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TL061**  
**TL062**  
**TL064**

**LOW POWER**  
**JFET INPUT**  
**OPERATIONAL AMPLIFIERS**

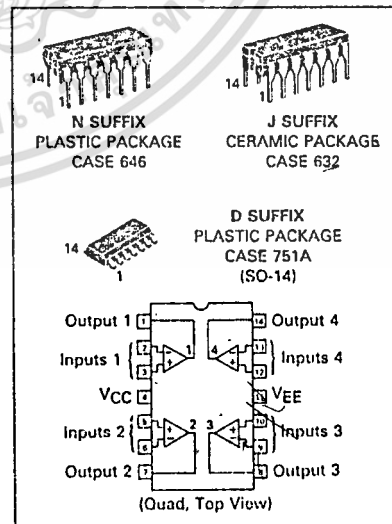
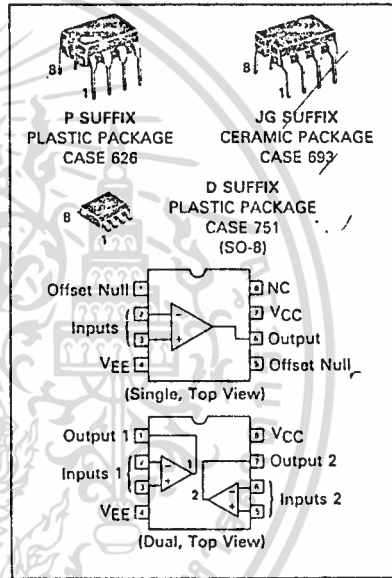
SILICON MONOLITHIC  
 INTEGRATED CIRCUITS

**LOW POWER JFET INPUT**  
**OPERATIONAL AMPLIFIER**

These JFET input operational amplifiers are designed for low power applications. They feature high input impedance, low input bias current and low input offset current. Advanced design techniques allow for higher slew rates, gain bandwidth products and output swing. The TL061 device provides for the external null adjustment of input offset voltage.

These devices are specified over the commercial, vehicular and military temperature ranges. The commercial and vehicular devices are available in Plastic dual in-line and SOIC packages. The military devices are available in Ceramic dual in-line packages.

- Low Supply Current — 200  $\mu$ A/Amplifier
- Low Input Bias Current — 5.0 pA
- High Gain Bandwidth — 2.0 MHz
- High Slew Rate — 6.0 V/ $\mu$ s
- High Input Impedance —  $10^{12} \Omega$
- Large Output Voltage Swing —  $\pm 14$  V
- Output Short Circuit Protection



**ORDERING INFORMATION**

Op Amp Function	Device	Tested Temperature Range	Package
Single	TL061CD, ACD TL061CP, ACP	0 to +70°C	SO-8 Plastic DIP
	TL061VD TL061VP	-40 to +85°C	SO-8 Plastic DIP
	TL061MJG	-55 to +125°C	Ceramic DIP
Dual	TL062CD, ACD TL062CP, ACP	0 to +70°C	SO-8 Plastic DIP
	TL062VD TL062VP	-40 to +85°C	SO-8 Plastic DIP
	TL062MJG	-55 to +125°C	Ceramic DIP
Quad	TL064CD, ACD TL064CN, ACN	0 to +70°C	SO-14 Plastic DIP
	TL064VD TL064VN	-40 to +85°C	SO-14 Plastic DIP
	TL064MJ	-55 to +125°C	Ceramic DIP

# TL061, TL062, TL064

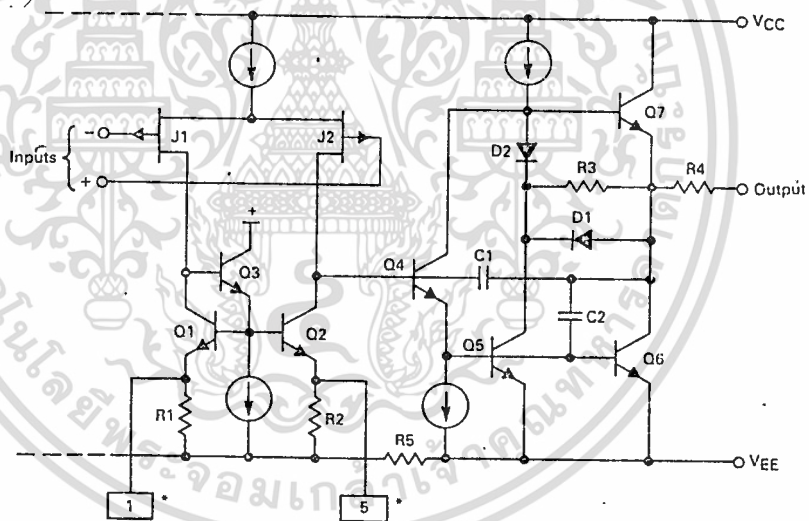
## MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage (from $V_{CC}$ to $V_{EE}$ )	$V_S$	+ 36	V
Input Differential Voltage Range (Note 1)	$V_{IDR}$	$\pm 30$	V
Input Voltage Range (Notes 1 and 2)	$V_{IR}$	$\pm 15$	V
Output Short-Circuit Duration (Note 3)	$t_S$	Indefinite	Seconds
Operating Junction Temperature (Note 3)	$T_J$	+ 160	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	- 65 to + 160	$^{\circ}\text{C}$
Ceramic Package		+ 150	
Plastic Package		- 60 to + 150	

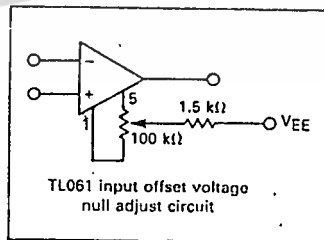
### NOTES:

1. Differential voltages are at the noninverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
2. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply or 15 volts, whichever is less.
3. Power dissipation must be considered to ensure maximum junction temperature ( $T_J$ ) is not exceeded (See Figure 1.)

### EQUIVALENT CIRCUIT SCHEMATIC (EACH AMPLIFIER)



\*Null adjustment pins for TL061 only.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TL061, TL062, TL064

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = +15\text{ V}$ ,  $V_{EE} = -15\text{ V}$ ,  $T_A = 0^\circ\text{C}$  to  $+70^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	TL061AC TL062AC TL064AC			TL061C TL062C TL064C			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage ( $R_S = 50\ \Omega$ , $V_O = 0\text{ V}$ ) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 0^\circ\text{C}$ to $+70^\circ\text{C}$	$V_{IO}$	—	3.0	6.0 7.5	—	3.0	15 20	mV
Average Temperature Coefficient for Offset Voltage ( $R_S = 50\ \Omega$ , $V_O = 0\text{ V}$ )	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	—	10	—	—	10	—	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current ( $V_{CM} = 0\text{ V}$ , $V_O = 0\text{ V}$ ) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 0^\circ\text{C}$ to $+70^\circ\text{C}$	$I_{IO}$	—	0.5	100 2.0	—	0.5	200 2.0	pA nA
Input Bias Current ( $V_{CM} = 0\text{ V}$ , $V_O = 0\text{ V}$ ) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 0^\circ\text{C}$ to $+70^\circ\text{C}$	$I_{IB}$	—	3.0	200 7.0	—	3.0	200 10	pA nA
Input Common Mode Voltage Range $T_A = 25^\circ\text{C}$	$V_{ICR}$	— -11.5	+14.5 -12	+11.5 —	— -11	+14.5 -12	+11 —	V
Large Signal Voltage Gain ( $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$ ) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 0^\circ\text{C}$ to $+70^\circ\text{C}$	$A_{VOL}$	4.0 4.0	58 —	— —	3.0 3.0	58 —	— —	V/mV
Output Voltage Swing ( $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $V_{ID} = 1.0\text{ V}$ ) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 0^\circ\text{C}$ to $+70^\circ\text{C}$	$V_{O+}$ $V_{O-}$ $V_{O+}$ $V_{O-}$	+10 — +10 —	+14 -14 — -10	— -10 — —	+10 — +10 —	+14 -14 — -10	— -10 — -10	V
Common Mode Rejection ( $R_S = 50\ \Omega$ , $V_{CM} = V_{ICR\text{ min}}$ , $V_O = 0\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	CMR	80	84	—	70	84	—	dB
Power Supply Rejection ( $R_S = 50\ \Omega$ , $V_{CM} = 0\text{ V}$ , $V_O = 0$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	PSR	80	86	—	70	86	—	dB
Power Supply Current (each amplifier) (No Load, $V_O = 0\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$I_D$	—	200	250	—	200	250	$\mu\text{A}$
Total Power Dissipation (each amplifier) (No Load, $V_O = 0\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$P_D$	—	6.0	7.5	—	6.0	7.5	mW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TL061, TL062, TL064

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = +15\text{ V}$ ,  $V_{EE} = -15\text{ V}$ ,  $T_A = T_{\text{low}}$  to  $T_{\text{high}}$  (Note 4), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	TL061M,V TL062M,V			TL064M,V			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage ( $R_S = 50\ \Omega$ , $V_O = 0\text{ V}$ ) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{low}}$ to $T_{\text{high}}$	$V_{IO}$	—	3.0	6.0	—	3.0	9.0	mV
Average Temperature Coefficient of Offset Voltage ( $R_S = 50\ \Omega$ , $V_O = 0\text{ V}$ )	$\Delta V_{IO} / \Delta T$	—	10	—	—	10	—	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current ( $V_{CM} = 0\text{ V}$ , $V_O = 0\text{ V}$ ) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{low}}$ to $T_{\text{high}}$	$I_{IO}$	—	5.0	100	—	5.0	100	pA
Input Bias Current ( $V_{CM} = 0\text{ V}$ , $V_O = 0\text{ V}$ ) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{low}}$ to $T_{\text{high}}$	$I_{IB}$	—	30	200	—	30	200	pA
Input Common Mode Voltage Range ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$V_{ICR}$	—	+14.5 -11.5	+11.5 -12	—	+14.5 -12	+11.5 -11.5	V
Large Signal Voltage Gain ( $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$ ) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{low}}$ to $T_{\text{high}}$	$A_{VOL}$	4.0	58	—	4.0	58	—	V/mV
Output Voltage Swing ( $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $V_{ID} = 1.0\text{ V}$ ) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{low}}$ to $T_{\text{high}}$	$V_{O+}$ $V_{O-}$ $V_{O-}$ $V_{O-}$	+10 — -10 —	+14 -14 — —	— -10 — -10	+10 — -10 —	-14 -14 — —	— 10 — -10	V
Common Mode Rejection ( $R_S = 50\ \Omega$ , $V_{CM} = V_{ICR\text{ min}}$ , $V_O = 0\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	CMR	80	84	—	80	84	—	dB
Power Supply Rejection ( $R_S = 50\ \Omega$ , $V_{CM} = 0\text{ V}$ , $V_O = 0\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	PSR	80	86	—	80	86	—	dB
Power Supply Current (each Amplifier) (No Load, $V_O = 0\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$I_D$	—	200	250	—	200	250	$\mu\text{A}$
Total Power Dissipation (each Amplifier) (No Load, $V_O = 0\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$P_D$	—	6.0	7.5	—	6.0	7.5	mW

Note 4. TL06XM  $T_{\text{low}} = -55^\circ\text{C}$   $T_{\text{high}} = +125^\circ\text{C}$   
 TL06XV  $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$   $T_{\text{high}} = +85^\circ\text{C}$

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = +15\text{ V}$ ,  $V_{EE} = -15\text{ V}$ ,  $T_A = +25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Slew Rate ( $V_{in} = -10\text{ V}$ to $+10\text{ V}$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $C_L = 100\text{ pF}$ , $A_V = +1.0$ )	SR	2.0	6.0	—	V/ $\mu\text{s}$
Rise Time ( $V_{in} = 20\text{ mV}$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $C_L = 100\text{ pF}$ , $A_V = +1.0$ )	$t_r$	—	0.1	—	$\mu\text{s}$
Overshoot ( $V_{in} = 20\text{ mV}$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $C_L = 100\text{ pF}$ , $A_V = +1.0$ )	OS	—	10	—	%
Settling Time ( $V_{CC} = +15\text{ V}$ , $V_{EE} = -15\text{ V}$ , $A_V = -1.0$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $V_O = 0\text{ V}$ to $+10\text{ V}$ step)	$t_s$	—	1.6	—	$\mu\text{s}$
		—	2.2	—	
Gain Bandwidth Product ( $f = 200\text{ kHz}$ )	GBW	—	2.0	—	MHz
Equivalent Input Noise ( $R_S = 100\ \Omega$ , $f = 1.0\text{ kHz}$ )	$e_n$	—	47	—	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Input Resistance	$R_i$	—	$10^{12}$	—	$\Omega$
Channel Separation ( $f = 10\text{ kHz}$ )	CS	—	120	—	dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TL061, TL062, TL064

## TYPICAL PERFORMANCE CURVES

FIGURE 1 — MAXIMUM POWER DISSIPATION versus TEMPERATURE FOR PACKAGE VARIATIONS

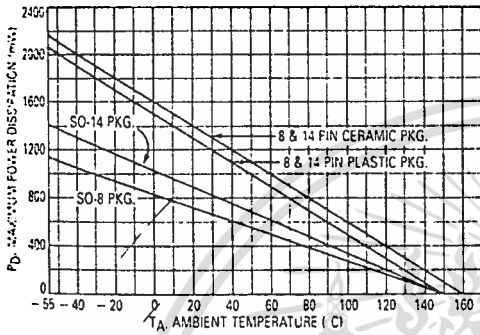


FIGURE 2 — OUTPUT VOLTAGE SWING versus SUPPLY VOLTAGE

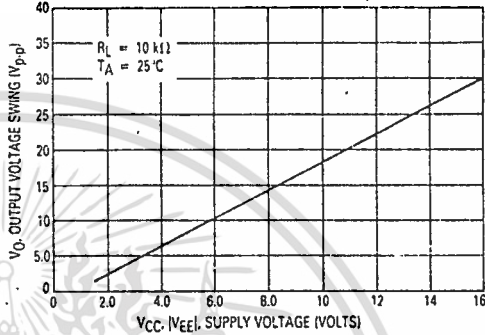


FIGURE 3 — OUTPUT VOLTAGE SWING versus TEMPERATURE

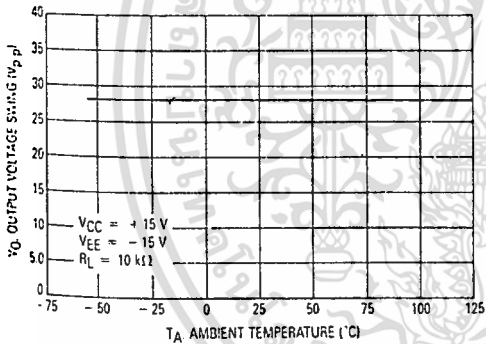


FIGURE 4 — OUTPUT VOLTAGE SWING versus LOAD RESISTANCE

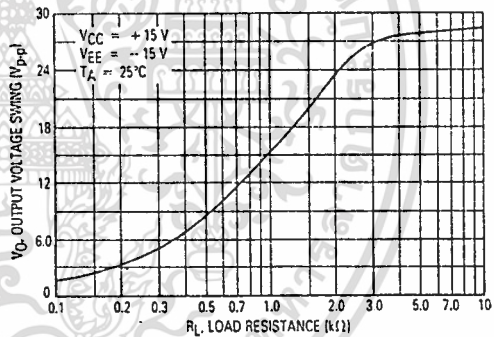


FIGURE 5 — OUTPUT VOLTAGE SWING versus FREQUENCY

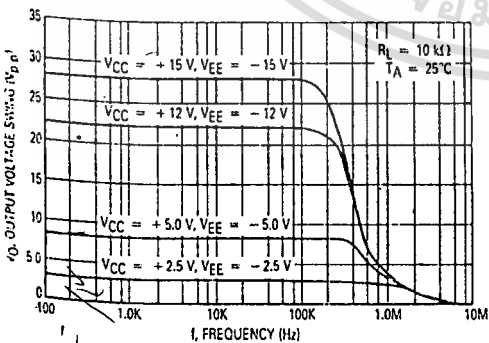
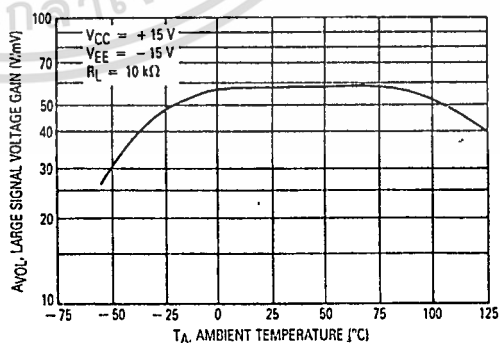


FIGURE 6 — LARGE SIGNAL VOLTAGE GAIN versus TEMPERATURE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL061, TL062, TL064

2

FIGURE 7 — OPEN-LOOP VOLTAGE GAIN AND PHASE versus FREQUENCY

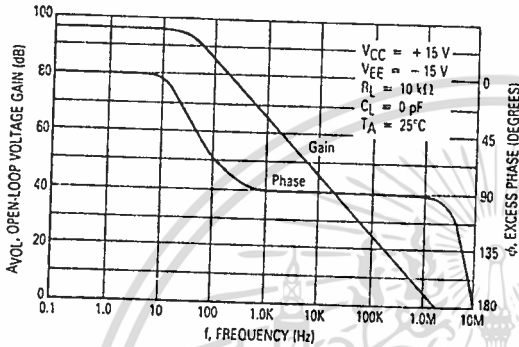


FIGURE 8 — SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER versus SUPPLY VOLTAGE

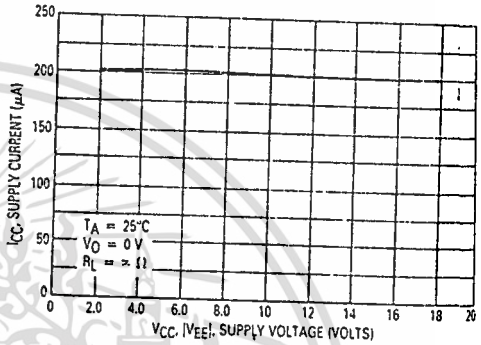


FIGURE 9 — SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER versus TEMPERATURE

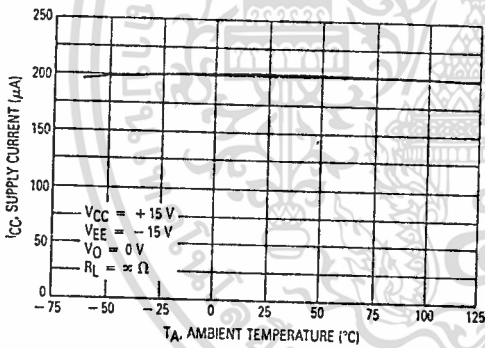


FIGURE 10 — TOTAL POWER DISSIPATION versus TEMPERATURE

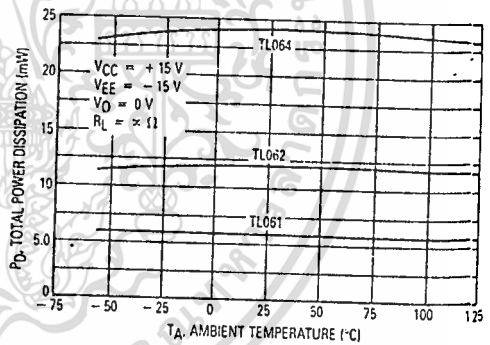


FIGURE 11 — COMMON-MODE REJECTION versus TEMPERATURE

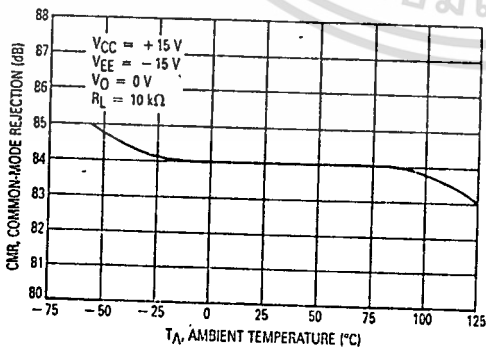
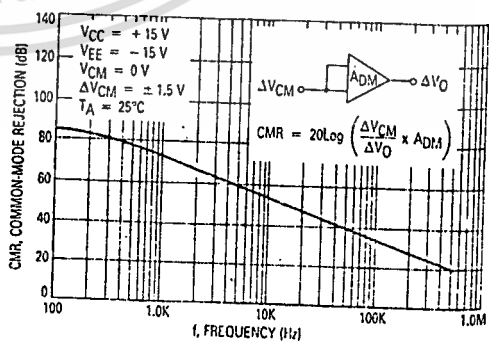


FIGURE 12 — COMMON-MODE REJECTION versus FREQUENCY



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL061, TL062, TL064

FIGURE 13 — POWER SUPPLY REJECTION versus FREQUENCY

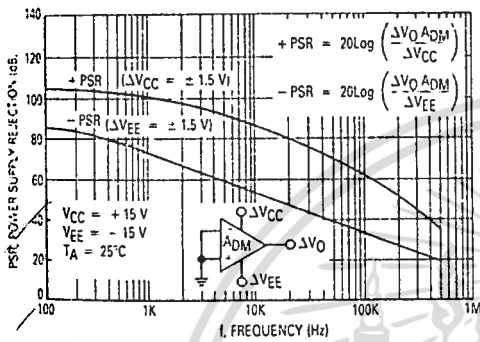


FIGURE 14 — NORMALIZED GAIN BANDWIDTH PRODUCT, SLEW RATE AND PHASE MARGIN versus TEMPERATURE

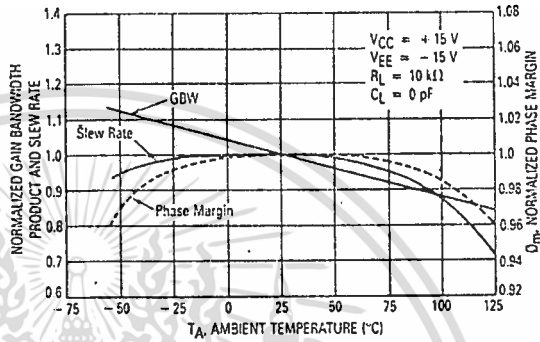


FIGURE 15 — INPUT BIAS CURRENT versus TEMPERATURE

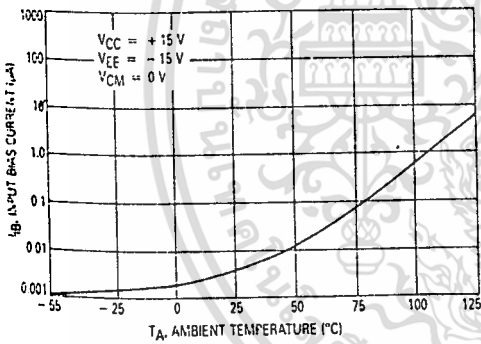


FIGURE 16 — INPUT NOISE VOLTAGE versus FREQUENCY

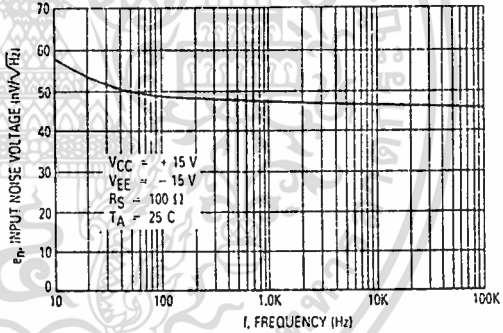


FIGURE 17 — SMALL SIGNAL RESPONSE

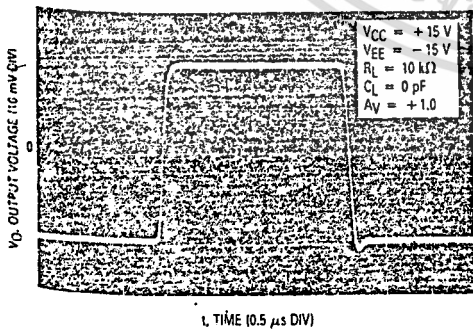
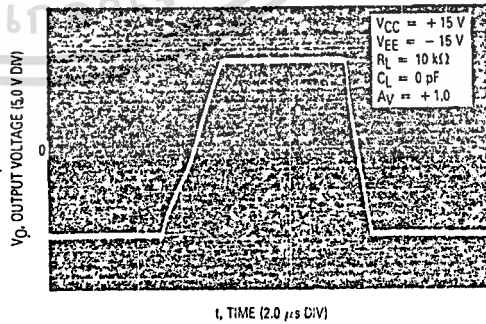


FIGURE 18 — LARGE SIGNAL RESPONSE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MC7900**  
**Series**

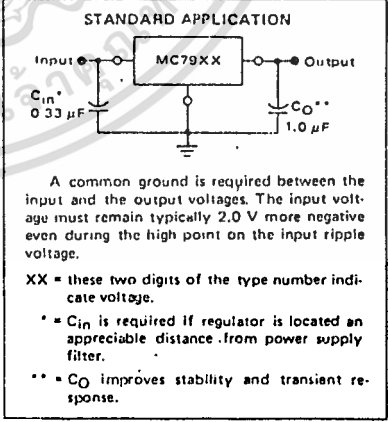
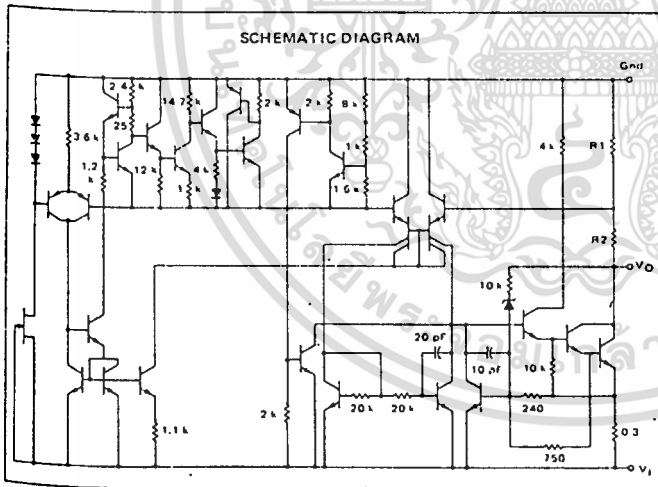
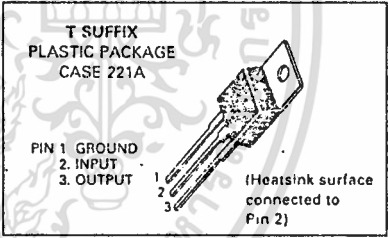
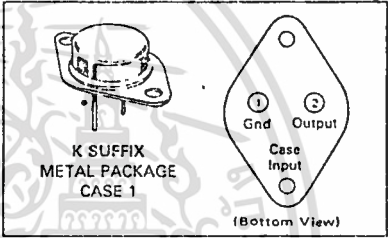
**THREE-TERMINAL  
 NEGATIVE VOLTAGE REGULATORS**

The MC7900 Series of fixed output negative voltage regulators are intended as complements to the popular MC7800 Series devices. These negative regulators are available in the same seven-voltage options as the MC7800 devices. In addition, one extra voltage option commonly employed in MECL systems is also available in the negative MC7900 Series.

Available in fixed output voltage options from -5.0 to -24 volts, these regulators employ current limiting, thermal shut-down, and safe-area compensation — making them remarkably rugged under most operating conditions. With adequate heat-sinking they can deliver output currents in excess of 1.0 ampere.

- No External Components Required
- Internal Thermal Overload Protection
- Internal Short-Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe-Area Compensation
- Available in 2% Voltage Tolerance (See Ordering Information)

**THREE-TERMINAL  
 NEGATIVE FIXED  
 VOLTAGE REGULATORS**



**ORDERING INFORMATION**

Device	Output Voltage Tolerance	Tested Operating Junction Temp. Range	Package
MC79XXCK MC79XXACK*	4% 2%	$T_J = 0^\circ C \text{ to } +125^\circ C$	Metal Power**
MC79XXCT MC79XXACT*	4% 2%		Plastic Power
MC79XXBT#	4%	$T_J = -40^\circ C \text{ to } +125^\circ C$	

XX indicates nominal voltage.  
 \*2% output voltage tolerance available in 5, 12 and 15 volt devices.  
 \*\*Metal power package available in 5, 12 and 15 volt devices.  
 #Automotive temperature range selections are available with special test conditions and additional tests in 5, 12 and 15 volt devices. Contact your local Motorola sales office for information.

DEVICE TYPE / NOMINAL OUTPUT VOLTAGE	
MC7905	5.0 Volts
MC7905 2	5.2 Volts
MC7906	6.0 Volts
MC7908	*8.0 Volts
MC7912	12 Volts
MC7915	15 Volts
MC7918	18 Volts
MC7924	24 Volts

## MC7900 Series

### MAXIMUM RATINGS ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Input Voltage ( $-5.0\text{ V} \geq V_O \geq -18\text{ V}$ ) (24 V)	$V_I$	-35 -40	Vdc
Power Dissipation Plastic Package $T_A = +25^\circ\text{C}$ Derate above $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_C = +25^\circ\text{C}$ Derate above $T_C = +95^\circ\text{C}$ (See Figure 1)	$P_D$ $1/R_{\theta JA}$ $P_D$ $1/R_{\theta JC}$	Internally Limited 15.4 Internally Limited 200	Watts mW/°C Watts mW/°C
Metal Package $T_A = +25^\circ\text{C}$ Derate above $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_C = +25^\circ\text{C}$ Derate above $T_C = +65^\circ\text{C}$	$P_D$ $1/R_{\theta JA}$ $P_D$ $1/R_{\theta JC}$	Internally Limited 22.2 Internally Limited 182	Watts mW/°C Watts mW/°C
Storage Junction Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +150	°C
Junction Temperature Range	$T_J$	0 to +150	°C

### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient — Plastic Package — Metal Package	$R_{\theta JA}$	65 45	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Case — Plastic Package — Metal Package	$R_{\theta JC}$	5.0 5.5	°C/W

### MC7905C ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_I = -10\text{ V}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	-4.8	-5.0	-5.2	Vdc
Line Regulation (Note 1) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 100\text{ mA}$ ) $-7.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -25\text{ Vdc}$ $-8.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -12\text{ Vdc}$ ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ ) $-7.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -25\text{ Vdc}$ $-8.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -12\text{ Vdc}$	$\text{Reg}_{line}$	— —	7.0 2.0	50 25	mV
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ ) (Note 1) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$	$\text{Reg}_{load}$	— —	11 4.0	100 50	mV
Output Voltage $-7.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -20\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ , $P \leq 15\text{ W}$	$V_O$	-4.75	—	-5.25	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	4.3	8.0	mA
Input Bias Current Change $-7.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -25\text{ Vdc}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	$\Delta I_{IB}$	— —	— —	1.3 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$e_{on}$	—	40	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection ( $I_O = 20\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ )	RR	—	70	—	dB
Dropout Voltage $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Average Temperature Coefficient of Output Voltage $I_O = 5.0\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$	$\Delta V_O / \Delta T$	—	-1.0	—	mV/°C

Note.

- 1 Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC7900 Series

**MC7905AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_i = -10\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	-4.9	-5.0	-5.1	Vdc
Line Regulation (Note 1) -8.0 Vdc $\geq V_i \geq -12\text{ Vdc}$ ; $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ -8.0 Vdc $\geq V_i \geq -12\text{ Vdc}$ ; $I_O = 1.0\text{ A}$ -7.5 Vdc $\geq V_i \geq -25\text{ Vdc}$ ; $I_O = 500\text{ mA}$ -7.0 Vdc $\geq V_i \geq -20\text{ Vdc}$ ; $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$	Reg <sub>line</sub>	—	2.0 7.0 7.0 6.0	25 50 50 50	mV
Load Regulation (Note 1) 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$ 250 mA $\leq I_O \leq 750\text{ mA}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	Reg <sub>load</sub>	—	11 4.0 9.0	100 50 100	mV
Output Voltage -7.5 Vdc $\geq V_i \geq -20\text{ Vdc}$ , 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ , $P \leq 15\text{ W}$	$V_O$	-4.80	—	-5.20	Vdc
Input Bias Current	$I_{IB}$	—	4.4	8.0	mA
Input Bias Current Change -7.5 Vdc $\geq V_i \geq -25\text{ Vdc}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$	$\Delta I_{IB}$	—	—	1.3 0.5 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , 10 Hz $\leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$e_{on}$	—	40	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection ( $I_O = 20\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ )	RR	—	70	—	dB
Dropout Voltage $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$	$V_i - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Average Temperature Coefficient of Output Voltage $I_O = 5.0\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$	$\Delta V_O / \Delta T$	—	-1.0	—	mV/ $^\circ\text{C}$

**MC7905.2C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_i = -10\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	-5.0	-5.2	-5.4	Vdc
Line Regulation (Note 1) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 100\text{ mA}$ ) -7.2 Vdc $\geq V_i \geq -25\text{ Vdc}$ -8.0 Vdc $\geq V_i \geq -12\text{ Vdc}$ ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ ) -7.2 Vdc $\geq V_i \geq -25\text{ Vdc}$ -8.0 Vdc $\geq V_i \geq -12\text{ Vdc}$	Reg <sub>line</sub>	—	8.0 2.2	52 27	mV
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ ) (Note 1) 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ 250 mA $\leq I_O \leq 750\text{ mA}$	Reg <sub>load</sub>	—	12 4.5	105 52	mV
Output Voltage -7.2 Vdc $\geq V_i \geq -20\text{ Vdc}$ , 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ , $P \leq 15\text{ W}$	$V_O$	-4.95	—	-5.45	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	4.3	8.0	mA
Input Bias Current Change -7.2 Vdc $\geq V_i \geq -25\text{ Vdc}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	$\Delta I_{IB}$	—	—	1.3 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , 10 Hz $\leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$e_{on}$	—	42	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection ( $I_O = 20\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ )	RR	—	68	—	dB
Dropout Voltage $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$	$V_i - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Average Temperature Coefficient of Output Voltage $I_O = 5.0\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$	$\Delta V_O / \Delta T$	—	-1.0	—	mV/ $^\circ\text{C}$

Note:

1 Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC7900 Series

**MC7906C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = -11\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	-5.75	-6.0	-6.25	Vdc
Line Regulation (Note 1) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 100\text{ mA}$ ) $-8.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -25\text{ Vdc}$ $-9.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -13\text{ Vdc}$	$\text{Reg}_{\text{line}}$	—	9.0 3.0	60 30	mV
( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ ) $-8.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -25\text{ Vdc}$ $-9.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -13\text{ Vdc}$		—	43 10	120 60	
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ ) (Note 1) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$	$\text{Reg}_{\text{load}}$	—	13 5.0	120 60	mV
Output Voltage $-8.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -21\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ , $P \leq 15\text{ W}$	$V_O$	-5.7	—	-6.3	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{\text{IB}}$	—	4.3	8.0	mA
Input Bias Current Change $-8.0\text{ Vdc} \geq V_I \geq -25\text{ Vdc}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	$\Delta I_{\text{IB}}$	—	—	1.3 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$e_{\text{on}}$	—	45	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection ( $I_O = 20\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ )	RR	—	65	—	dB
Dropout Voltage $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Average Temperature Coefficient of Output Voltage $I_O = 5.0\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$	$\Delta V_O / \Delta T$	—	-1.0	—	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

**MC7908C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = -14\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	-7.7	-8.0	-8.3	Vdc
Line Regulation (Note 1) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 100\text{ mA}$ ) $-10.5\text{ Vdc} \geq V_I \geq -25\text{ Vdc}$ $-11\text{ Vdc} \geq V_I \geq -17\text{ Vdc}$	$\text{Reg}_{\text{line}}$	—	12 5.0	60 40	mV
( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ ) $-10.5\text{ Vdc} \geq V_I \geq -25\text{ Vdc}$ $-11\text{ Vdc} \geq V_I \geq -17\text{ Vdc}$		—	50 22	160 80	
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ ) (Note 1) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$	$\text{Reg}_{\text{load}}$	—	26 9.0	160 80	mV
Output Voltage $-10.5\text{ Vdc} \geq V_I \geq -23\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ , $P \leq 15\text{ W}$	$V_O$	-7.6	—	-8.4	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{\text{IB}}$	—	4.3	8.0	mA
Input Bias Current Change $-10.5\text{ Vdc} \geq V_I \geq -25\text{ Vdc}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	$\Delta I_{\text{IB}}$	—	—	1.0 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$e_{\text{on}}$	—	52	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection ( $I_O = 20\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ )	RR	—	62	—	dB
Dropout Voltage $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Average Temperature Coefficient of Output Voltage $I_O = 5.0\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$	$\Delta V_O / \Delta T$	—	-1.0	—	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

Note:

- 1 Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC7900 Series

**MC7915C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = -23\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	-14.4	-15	-15.6	Vdc
Line Regulation (Note 1) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 100\text{ mA}$ ) -17.5 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ -20 Vdc $\geq V_I \geq -26\text{ Vdc}$	Reg <sub>line</sub>	—	14 6.0	150 75	mV
( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ ) -17.5 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ -20 Vdc $\geq V_I \geq -26\text{ Vdc}$		—	57 27	300 150	
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ ) (Note 1) 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ 250 mA $\leq I_O \leq 750\text{ mA}$	Reg <sub>load</sub>	—	68 25	300 150	mV
Output Voltage -17.5 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ , 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ , $P \leq 15\text{ W}$	$V_O$	-14.75	—	-15.75	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	4.4	8.0	mA
Input Bias Current Change -17.5 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	$\Delta I_{IB}$	—	—	1.0 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , 10 Hz $\leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$e_{on}$	—	90	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection ( $I_O = 20\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ )	RR	—	60	—	dB
Dropout Voltage $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Average Temperature Coefficient of Output Voltage $I_O = 5.0\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$	$\Delta V_O / \Delta T$	—	-1.0	—	mV/ $^\circ\text{C}$

**MC7915AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = -23\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	-14.7	-15	-15.3	Vdc
Line Regulation (Note 1) -20 Vdc $\geq V_I \geq -26\text{ Vdc}$ , $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ -20 Vdc $\geq V_I \geq -26\text{ Vdc}$ , $I_O = 1.0\text{ A}$ -17.9 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ -17.5 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ , $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$	Reg <sub>line</sub>	—	27 57 57 57	75 150 150 150	mV
Load Regulation (Note 1) 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ 250 mA $\leq I_O \leq 750\text{ mA}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	Reg <sub>load</sub>	—	68 25 40	150 75 150	mV
Output Voltage -17.9 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ , 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ , $P \leq 15\text{ W}$	$V_O$	-14.4	—	-15.6	Vdc
Input Bias Current	$I_{IB}$	—	4.4	8.0	mA
Input Bias Current Change -17.5 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$	$\Delta I_{IB}$	—	—	0.8 0.5 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , 10 Hz $\leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$e_{on}$	—	90	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection ( $I_O = 20\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ )	RR	—	60	—	dB
Dropout Voltage $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Average Temperature Coefficient of Output Voltage $I_O = 5.0\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$	$\Delta V_O / \Delta T$	—	-1.0	—	mV/ $^\circ\text{C}$

Note:

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC7900 Series

**MC7912C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = -19\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	-11.5	-12	-12.5	Vdc
Line Regulation (Note 1) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 100\text{ mA}$ ) -14.5 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ -16 Vdc $\geq V_I \geq -22\text{ Vdc}$ ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ ) -14.5 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ -16 Vdc $\geq V_I \geq -22\text{ Vdc}$	Reg <sub>line</sub>	—	13 6.0	120 60	mV
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ ) (Note 1) 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ 250 mA $\leq I_O \leq 750\text{ mA}$	Reg <sub>load</sub>	—	46 17	240 120	mV
Output Voltage -14.5 Vdc $\geq V_I \geq -27\text{ Vdc}$ , 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ , $P \leq 15\text{ W}$	$V_O$	-11.4	—	-12.6	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	4.4	8.0	mA
Input Bias Current Change -14.5 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	$\Delta I_{IB}$	—	—	1.0 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , 10 Hz $\leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$e_{on}$	—	75	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection ( $I_O = 20\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ )	RR	—	61	—	dB
Dropout Voltage $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Average Temperature Coefficient of Output Voltage $I_O = 5.0\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$	$\Delta V_O / \Delta T$	—	-1.0	—	mV/ $^\circ\text{C}$

**MC7912AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = -19\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	-11.75	-12	-12.25	Vdc
Line Regulation (Note 1) -16 Vdc $\geq V_I \geq -22\text{ Vdc}$ , $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ -16 Vdc $\geq V_I \geq -22\text{ Vdc}$ , $I_O = 1.0\text{ A}$ -14.8 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ -14.5 Vdc $\geq V_I \geq -27\text{ Vdc}$ , $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$	Reg <sub>line</sub>	—	6.0 24 24 13	60 120 120 120	mV
Load Regulation (Note 1) 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ 250 mA $\leq I_O \leq 750\text{ mA}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	Reg <sub>load</sub>	—	46 17 35	150 75 150	mV
Output Voltage -14.8 Vdc $\geq V_I \geq -27\text{ Vdc}$ , 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ , $P \leq 15\text{ W}$	$V_O$	-11.5	—	-12.5	Vdc
Input Bias Current	$I_{IB}$	—	4.4	8.0	mA
Input Bias Current Change -15 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$	$\Delta I_{IB}$	—	—	0.8 0.5 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , 10 Hz $\leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$e_{on}$	—	75	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection ( $I_O = 20\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ )	RR	—	61	—	dB
Dropout Voltage $I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Average Temperature Coefficient of Output Voltage $I_O = 5.0\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$	$\Delta V_O / \Delta T$	—	-1.0	—	mV/ $^\circ\text{C}$

**Note:**

- Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC7900 Series

**MC7918C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = -27\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	-17.3	-18	-18.7	Vdc
Line Regulation (Note 1)	$\text{Reg}_{\text{line}}$				mV
( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 100\text{ mA}$ )		—	25	180	
-21 Vdc $\geq V_I \geq -33\text{ Vdc}$		—	10	90	
-24 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$					
( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ )		—	90	360	
-21 Vdc $\geq V_I \geq -33\text{ Vdc}$		—	50	180	
-24 Vdc $\geq V_I \geq -30\text{ Vdc}$					
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ ) (Note 1)	$\text{Reg}_{\text{load}}$				mV
5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$		—	110	360	
250 mA $\leq I_O \leq 750\text{ mA}$		—	55	180	
Output Voltage	$V_O$	-17.1	—	-18.9	Vdc
-21 Vdc $\geq V_I \geq -33\text{ Vdc}$ , 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ , $P \leq 15\text{ W}$					
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_B$	—	4.5	8.0	mA
Input Bias Current Change	$\Delta I_B$	—	—	1.0	mA
-21 Vdc $\geq V_I \geq -33\text{ Vdc}$		—	—	0.5	
5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$					
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , 10 Hz $\leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$e_{\text{on}}$	—	110	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection ( $I_O = 20\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ )	RR	—	59	—	dB
Dropout Voltage	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
$I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$					
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	$\Delta V_O / \Delta T$	—	-1.0	—	mV/°C
$I_O = 5.0\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$					

**MC7924C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = -33\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	23	-24	-25	Vdc
Line Regulation (Note 1)	$\text{Reg}_{\text{line}}$				mV
( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 100\text{ mA}$ )		—	31	240	
-27 Vdc $\geq V_I \geq -38\text{ Vdc}$		—	14	120	
-30 Vdc $\geq V_I \geq -36\text{ Vdc}$					
( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ )		—	118	480	
-27 Vdc $\geq V_I \geq -38\text{ Vdc}$		—	70	240	
-30 Vdc $\geq V_I \geq -36\text{ Vdc}$					
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ ) (Note 1)	$\text{Reg}_{\text{load}}$				mV
5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$		—	150	480	
250 mA $\leq I_O \leq 750\text{ mA}$		—	85	240	
Output Voltage	$V_O$	-22.8	—	-25.2	Vdc
-27 Vdc $\geq V_I \geq -38\text{ Vdc}$ , 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ , $P \leq 15\text{ W}$					
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_B$	—	4.6	8.0	mA
Input Bias Current Change	$\Delta I_B$	—	—	1.0	mA
-27 Vdc $\geq V_I \geq -38\text{ Vdc}$		—	—	0.5	
5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$					
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , 10 Hz $\leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$e_{\text{on}}$	—	170	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection ( $I_O = 20\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ )	RR	—	56	—	dB
Dropout Voltage	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
$I_O = 1.0\text{ A}$ , $T_J = +25^\circ\text{C}$					
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	$\Delta V_O / \Delta T$	—	-1.0	—	mV/°C
$I_O = 5.0\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$					

Note

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MC7900 Series

## TYPICAL CHARACTERISTICS ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

FIGURE 1 – WORST CASE POWER DISSIPATION AS A FUNCTION OF AMBIENT TEMPERATURE

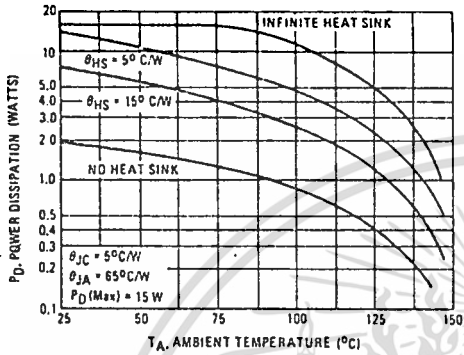


FIGURE 2 – WORST CASE POWER DISSIPATION AS A FUNCTION OF AMBIENT TEMPERATURE

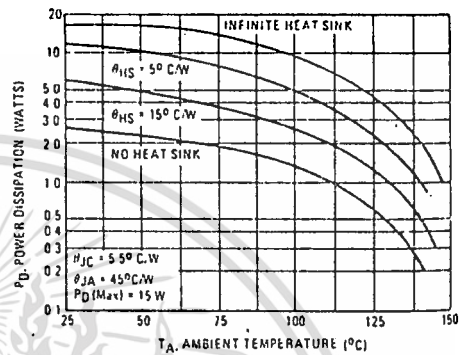


FIGURE 3 – PEAK OUTPUT CURRENT AS A FUNCTION OF INPUT-OUTPUT DIFFERENTIAL VOLTAGE

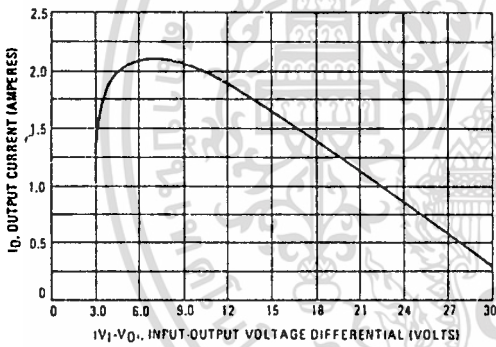


FIGURE 4 – RIPPLE REJECTION AS A FUNCTION OF FREQUENCY

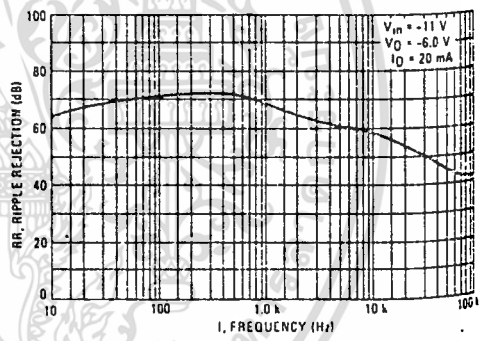


FIGURE 5 – RIPPLE REJECTION AS A FUNCTION OF OUTPUT VOLTAGES

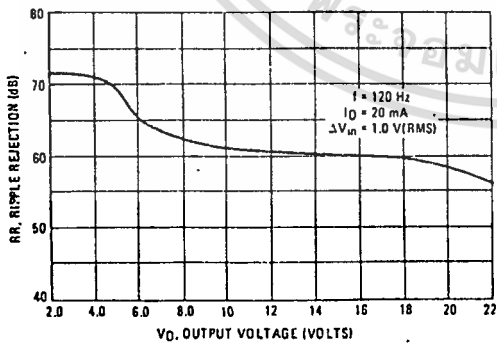
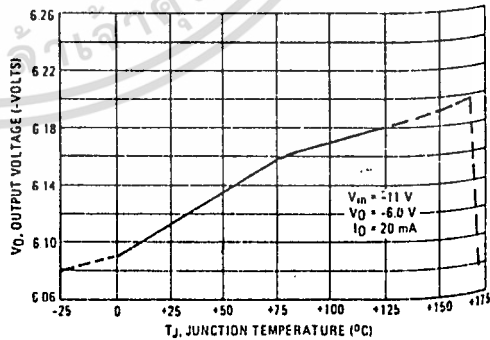


FIGURE 6 – OUTPUT VOLTAGE AS A FUNCTION OF JUNCTION TEMPERATURE



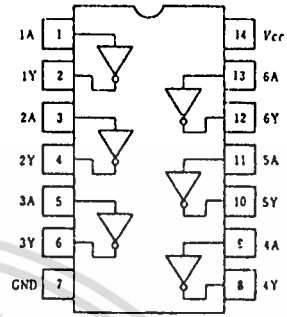
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# HD74HC04 ● Hex Inverters

## FEATURES

- High Speed Operation:  $t_{pd} = 7.5\text{ns typ.}$  ( $C_L = 50\text{pF}$ )
- High Output Current: Fanout of 10 LSTTL Loads
- Wide Operating Voltage:  $V_{CC} = 2 \sim 6\text{V}$
- Low Input Current:  $1\mu\text{A max.}$
- Low Quiescent Supply Current:  $I_{CC}(\text{static}) = 1\mu\text{A max.}$  ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

## PIN ARRANGEMENT



(Top View)

## DC CHARACTERISTICS

Item	Symbol	$V_{CC}(\text{V})$	Test Conditions	$T_a = 25^\circ\text{C}$			$T_a = -40 \sim +85^\circ\text{C}$		Unit			
				min	typ	max	min	max				
Input Voltage	$V_{IH}$	2.0		1.5	—	—	1.5	—	V			
		4.5		3.15	—	—	3.15	—				
		6.0		4.2	—	—	4.2	—				
	$V_{IL}$	2.0		—	—	0.5	—	0.5		V		
		4.5		—	—	1.35	—	1.35				
		6.0		—	—	1.8	—	1.8				
Output Voltage	$V_{OH}$	2.0	$V_{in} = V_{IH} \text{ or } V_{IL}$	$I_{OH} = -20\mu\text{A}$	1.9	2.0	—	1.9	—		V	
		4.5			4.4	4.5	—	4.4	—			
		6.0			5.9	6.0	—	5.9	—			
		4.5			$I_{OH} = -4\text{mA}$	4.18	—	—	4.13	—		
		6.0				$I_{OH} = -5.2\text{mA}$	5.68	—	—	5.63		—
		6.0					—	—	—	—		—
	$V_{OL}$	$V_{in} = V_{IH} \text{ or } V_{IL}$	$I_{OL} = 20\mu\text{A}$	2.0	—	0.0	0.1	—	0.1	V		
				4.5	—	0.0	0.1	—	0.1			
				6.0	—	0.0	0.1	—	0.1			
				4.5	$I_{OL} = 4\text{mA}$	—	—	0.26	—		0.33	
				6.0		$I_{OL} = 5.2\text{mA}$	—	—	0.26		—	0.33
				6.0			—	—	—		—	—
Input Current	$I_{in}$	6.0	$V_{in} = V_{CC} \text{ or } \text{GND}$	—	—	$\pm 0.1$	—	$\pm 1.0$	$\mu\text{A}$			
Quiescent Supply Current	$I_{CC}$	6.0	$V_{in} = V_{CC} \text{ or } \text{GND}, I_{in} = 0\mu\text{A}$	—	—	1.0	—	10	$\mu\text{A}$			

## AC CHARACTERISTICS ( $C_L = 50\text{pF}$ , Input $t_r = t_f = 6\text{ns}$ )

Item	Symbol	$V_{CC}(\text{V})$	Test Conditions	$T_a = 25^\circ\text{C}$			$T_a = -40 \sim +85^\circ\text{C}$		Unit	
				min	typ	max	min	max		
Propagation Delay Time	$t_{PLH}$	2.0		—	—	90	—	115	ns	
		4.5		—	7	18	—	23		
		6.0		—	—	15	—	20		
	$t_{PHL}$	2.0		—	—	90	—	115		ns
		4.5		—	8	18	—	23		
		6.0		—	—	15	—	20		
Output Rise Time	$t_{TLH}$	2.0	—	—	75	—	95	ns		
		4.5	—	5	15	—	19			
		6.0	—	—	13	—	16			
Output Fall Time	$t_{THL}$	2.0	—	—	75	—	95		ns	
		4.5	—	5	15	—	19			
		6.0	—	—	13	—	16			
Input Capacitance	$C_{in}$	—		—	5	10	—	10		pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



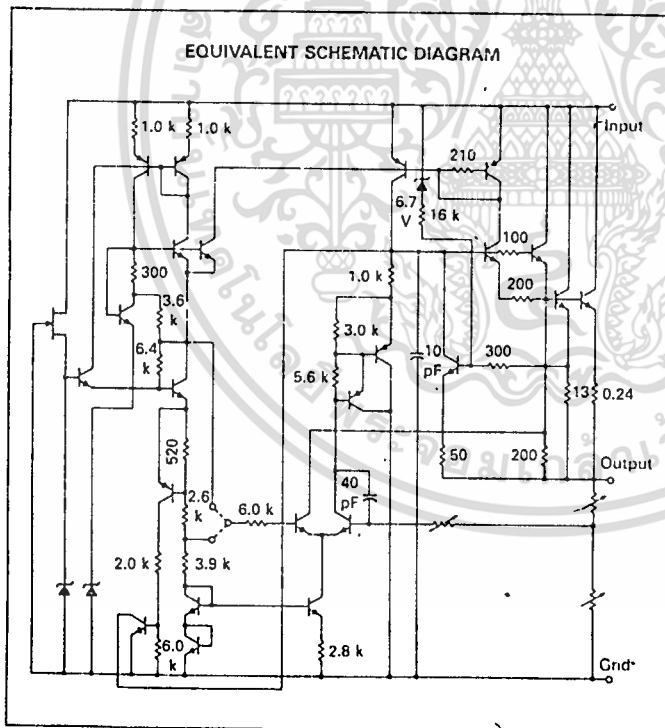
**THREE-TERMINAL MEDIUM CURRENT  
 POSITIVE VOLTAGE REGULATORS**

The MC78M00 Series positive voltage regulators are identical to the popular MC7800 Series devices, except that they are specified for only half the output current. Like the MC7800 devices, the MC78M00 three-terminal regulators are intended for local, on-card voltage regulation.

Internal current limiting, thermal shutdown circuitry and safe-area compensation for the internal pass transistor combine to make these devices remarkably rugged under most operating conditions. Maximum output current, with adequate heatsinking is 500 mA.

- No External Components Required
- Internal Thermal Overload Protection
- Internal Short-Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe-Area Compensation

**EQUIVALENT SCHEMATIC DIAGRAM**



TYPE NO./VOLTAGE		
MC78M05B,C 5.0 Volts	MC78M12B,C 12 Volts	MC78M20B,C 20 Volts
MC78M06B,C 6.0 Volts	MC78M15B,C 15 Volts	MC78M24D,C 24 Volts
MC78M08B,C 8.0 Volts	MC78M18B,C 18 Volts	

**MC78M00  
 Series**

**THREE-TERMINAL MEDIUM  
 CURRENT POSITIVE FIXED  
 VOLTAGE REGULATORS**

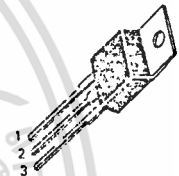
- PIN 1 INPUT  
 2. OUTPUT  
 3. GROUND



(Bottom View)

**G SUFFIX  
 METAL PACKAGE  
 CASE 79**  
 (Case connected to Pin 3)

**T SUFFIX  
 PLASTIC PACKAGE  
 CASE 221A**



(All 3 Plastic Types)  
 PIN 1. INPUT  
 2. GROUND  
 3. OUTPUT  
 (Heatsink surface connected to Pin 2)

**DT SUFFIX  
 PLASTIC PACKAGE  
 CASE 369A  
 (DPAK)**

**DT-1 SUFFIX  
 PLASTIC PACKAGE  
 CASE 369  
 (DPAK)**

**ORDERING INFORMATION**

Device	Tested Operating Junction Temp. Range	Package
MC78MXXCG*	$T_J$ 0°C to +125°C	Metal Can
MC78MXXCDT* MC78MXXCDT-1*		DPAK
MC78MXXCT	$T_J$ -40°C to +125°C	Plastic Power
MC78MXXBT#		Plastic Power

XX Indicates nominal voltage.  
 \* Available in 5, 8, 12 and 15 volt devices.  
 # Automotive temperature range selections are available with special test conditions and additional tests in 5, 8, 12 and 15 volt devices. Contact your local Motorola sales office for information.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC78M00 Series

### MAXIMUM RATINGS ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit	
Input Voltage (5.0 V–18 V) (20 V–24 V)	$V_I$	35 40	Vdc	
Power Dissipation (Package Limitation)				
Plastic Package, T Suffix				
$T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $T_A = 25^\circ\text{C}$	$P_D$ #JA	Internally Limited 70	$^\circ\text{C/W}$	
$T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $T_C = 110^\circ\text{C}$	$P_D$ #JC	Internally Limited 5.0	$^\circ\text{C/W}$	
Metal Package				
$T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $T_A = 25^\circ\text{C}$	$P_D$ #JA	Internally Limited 185	$^\circ\text{C/W}$	
$T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $T_C = 85^\circ\text{C}$	$P_D$ #JC	Internally Limited 25	$^\circ\text{C/W}$	
Operating Junction Temperature Range	MC78MXXC MC78MXXB	$T_J$	0 to +150 -40 to +150	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range		$T_{stg}$	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

### MC78M05B,C ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_I = 10\text{ V}$ , $I_O = 350\text{ mA}$ , $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$ , $P_D \leq 5.0\text{ W}$ unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	4.8	5.0	5.2	Vdc
Line Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $7.0\text{ Vdc} \leq V_I \leq 25\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ )	Regline	—	3.0	50	mV
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 500\text{ mA}$ ) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 200\text{ mA}$ )	Regload	—	20 10	100 50	mV
Output Voltage ( $7.0\text{ Vdc} \leq V_I \leq 25\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 200\text{ mA}$ ) ( $7.0\text{ Vdc} \leq V_I \leq 20\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$V_O$	4.75	—	5.25	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	3.2	6.0	mA
Quiescent Current Change ( $8.0\text{ Vdc} \leq V_I \leq 25\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ ) ( $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$\Delta I_{IB}$	—	—	0.8 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$V_n$	—	40	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection (T, DT and DT-1 suffixes only) ( $I_O = 100\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $8.0\text{ V} \leq V_I \leq 18\text{ V}$ ) ( $I_O = 300\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $8.0\text{ V} \leq V_I \leq 18\text{ V}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	RR	62 62	— 80	— —	dB
Dropout Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Short Circuit Current Limit ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $V_I = 35\text{ V}$ )	$I_{OS}$	—	50	—	mA
Average Temperature Coefficient of Output Voltage ( $I_O = 5.0\text{ mA}$ )	$\Delta V_O / \Delta T$	—	$\pm 0.2$	—	mV/ $^\circ\text{C}$
Peak Output Current ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	$I_O$	—	700	—	mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC78M00 Series

**MC78M06C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = 11\text{ V}$ ,  $I_O = 350\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$ ,  $P_D \leq 5.0\text{ W}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	5.75	6.0	6.25	Vdc
Line Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $8.0\text{ Vdc} \leq V_I \leq 25\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ )	Regline	—	5.0	50	mV
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 500\text{ mA}$ ) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 200\text{ mA}$ )	Regload	—	20 10	120 60	mV
Output Voltage ( $8.0\text{ Vdc} \leq V_I \leq 25\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 200\text{ mA}$ ) ( $8.0\text{ Vdc} \leq V_I \leq 21\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$V_O$	5.7	—	6.3	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	3.2	6.0	mA
Quiescent Current Change ( $9.0\text{ Vdc} \leq V_I \leq 25\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ ) ( $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$\Delta I_{IB}$	—	—	0.8 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$V_n$	—	45	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection (T suffix only) ( $I_O = 100\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $9.0\text{ V} \leq V_I \leq 19\text{ V}$ ) ( $I_O = 300\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $9.0\text{ V} \leq V_I \leq 19\text{ V}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	RR	59 59	— 80	—	dB
Dropout Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Short Circuit Current Limit ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $V_I = 35\text{ V}$ )	$I_{OS}$	—	50	—	mA
Average Temperature Coefficient of Output Voltage ( $I_O = 5.0\text{ mA}$ )	$\Delta V_O / \Delta T$	—	$\pm 0.2$	—	$\text{mV}/^\circ\text{C}$
Peak Output Current ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	$I_O$	—	700	—	mA

**MC78M08B,C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = 14\text{ V}$ ,  $I_O = 350\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$ ,  $P_D \leq 5.0\text{ W}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	7.7	8.0	8.3	Vdc
Line Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $10.5\text{ Vdc} \leq V_I \leq 25\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ )	Regline	—	6.0	50	mV
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 500\text{ mA}$ ) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 200\text{ mA}$ )	Regload	—	25 10	160 80	mV
Output Voltage ( $10.5\text{ Vdc} \leq V_I \leq 25\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 200\text{ mA}$ ) ( $10.5\text{ Vdc} \leq V_I \leq 23\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$V_O$	7.6	—	8.4	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	3.2	6.0	mA
Quiescent Current Change ( $10.5\text{ Vdc} \leq V_I \leq 25\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ ) ( $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$\Delta I_{IB}$	—	—	0.8 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$V_n$	—	52	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection (T suffix only) ( $I_O = 100\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $11.5\text{ V} \leq V_I \leq 21.5\text{ V}$ ) ( $I_O = 300\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $11.5\text{ V} \leq V_I \leq 21.5\text{ V}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	RR	56 56	— 80	—	dB
Dropout Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Short Circuit Current Limit ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $V_I = 35\text{ V}$ )	$I_{OS}$	—	50	—	mA
Average Temperature Coefficient of Output Voltage ( $I_O = 5.0\text{ mA}$ )	$\Delta V_O / \Delta T$	—	$\pm 0.2$	—	$\text{mV}/^\circ\text{C}$
Peak Output Current ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	$I_O$	—	700	—	mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC78M00 Series

**MC78M12B,C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = 19\text{ V}$ ,  $I_O = 350\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$ ,  $P_D \leq 5.0\text{ W}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	11.5	12	12.5	Vdc
Line Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $14.5\text{ Vdc} \leq V_I \leq 30\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ )	Regline	—	8.0	50	mV
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 500\text{ mA}$ ) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 200\text{ mA}$ )	Regload	—	25 10	240 120	mV
Output Voltage ( $14.5\text{ Vdc} \leq V_I \leq 27\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$V_O$	11.4	—	12.6	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	3.2	6.0	mA
Quiescent Current Change ( $14.5\text{ Vdc} \leq V_I \leq 30\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ ) ( $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$\Delta I_{IB}$	—	—	0.8 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$V_n$	—	75	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection (T, DT and DT-1 suffixes only) ( $I_O = 100\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $15\text{ V} \leq V_I \leq 25\text{ V}$ ) ( $I_O = 300\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $15\text{ V} \leq V_I \leq 25\text{ V}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	RR	55 55	— 80	— —	dB
Dropout Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Short Circuit Current Limit ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $V_I = 35\text{ V}$ )	$I_{OS}$	—	50	—	mA
Average Temperature Coefficient of Output Voltage ( $I_O = 5.0\text{ mA}$ )	$\Delta V_O / \Delta T$	—	$\pm 0.3$	—	$\text{mV}^\circ\text{C}$
Peak Output Current ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	$I_O$	—	700	—	mA

**MC78M15B,C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = 23\text{ V}$ ,  $I_O = 350\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$ ,  $P_D \leq 5.0\text{ W}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	14.4	15	15.6	Vdc
Input Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $17.5\text{ Vdc} \leq V_I \leq 30\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ )	Regline	—	10	50	mV
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 500\text{ mA}$ ) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 200\text{ mA}$ )	Regload	—	25 10	300 150	mV
Output Voltage ( $17.5\text{ Vdc} \leq V_I \leq 30\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$V_O$	14.25	—	15.75	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	3.2	6.0	mA
Quiescent Current Change ( $17.5\text{ Vdc} \leq V_I \leq 30\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ ) ( $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$\Delta I_{IB}$	—	—	0.8 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$V_n$	—	90	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection (T, DT and DT-1 suffixes only) ( $I_O = 100\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $18.5\text{ V} \leq V_I \leq 28.5\text{ V}$ ) ( $I_O = 300\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $18.5\text{ V} \leq V_I \leq 28.5\text{ V}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	RR	54 54	— 70	— —	dB
Dropout Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Short Circuit Current Limit ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $V_I = 35\text{ V}$ )	$I_{OS}$	—	50	—	mA
Average Temperature Coefficient of Output Voltage ( $I_O = 5.0\text{ mA}$ )	$\Delta V_O / \Delta T$	—	$\pm 0.3$	—	$\text{mV}^\circ\text{C}$
Peak Output Current ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	$I_O$	—	700	—	mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC78M00 Series

**MC78M18C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = 27\text{ V}$ ,  $I_O = 350\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$ ,  $P_D \leq 5.0\text{ W}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	17.3	18	18.7	Vdc
Line Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $21\text{ Vdc} \leq V_I \leq 33\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ )	Regline	—	10	50	mV
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 500\text{ mA}$ ) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 200\text{ mA}$ )	Regload	—	30 10	360 180	mV
Output Voltage ( $21\text{ Vdc} \leq V_I \leq 33\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$V_O$	17.1	—	18.9	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	3.2	6.5	mA
Quiescent Current Change ( $21\text{ Vdc} \leq V_I \leq 33\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ ) ( $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$\Delta I_{IB}$	—	—	0.8 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$V_n$	—	100	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection (T suffix only) ( $I_O = 100\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $22\text{ V} \leq V_I \leq 32\text{ V}$ ) ( $I_O = 300\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $22\text{ V} \leq V_I \leq 32\text{ V}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	RR	53 53	— 70	— —	dB
Dropout Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Short Circuit Current Limit ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $V_I = 35\text{ V}$ )	$I_{OS}$	—	50	—	mA
Average Temperature Coefficient of Output Voltage ( $I_O = 5.0\text{ mA}$ )	$\Delta V_O / \Delta T$	—	$\pm 0.3$	—	$\text{mV}^\circ\text{C}$
Peak Output Current ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	$I_O$	—	700	—	mA

**MC78M20C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = 29\text{ V}$ ,  $I_O = 350\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$ ,  $P_D \leq 5.0\text{ W}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	19.2	20	20.8	Vdc
Line Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $23\text{ Vdc} \leq V_I \leq 35\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ )	Regline	—	10	50	mV
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 500\text{ mA}$ ) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 200\text{ mA}$ )	Regload	—	30 10	400 200	mV
Output Voltage ( $23\text{ Vdc} \leq V_I \leq 35\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$V_O$	19	—	21	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	3.2	6.5	mA
Quiescent Current Change ( $23\text{ Vdc} \leq V_I \leq 35\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ ) ( $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$\Delta I_{IB}$	—	—	0.8 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$V_n$	—	110	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection (T suffix only) ( $I_O = 100\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $24\text{ V} \leq V_I \leq 34\text{ V}$ ) ( $I_O = 300\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $24\text{ V} \leq V_I \leq 34\text{ V}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	RR	52 52	— 70	— —	dB
Dropout Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Short Circuit Current Limit ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $V_I = 35\text{ V}$ )	$I_{OS}$	—	50	—	mA
Average Temperature Coefficient of Output Voltage ( $I_O = 5.0\text{ mA}$ )	$\Delta V_O / \Delta T$	—	$\pm 0.5$	—	$\text{mV}^\circ\text{C}$
Peak Output Current ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	$I_O$	—	700	—	mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC78M00 Series

**MC78M24C ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_I = 33\text{ V}$ ,  $I_O = 350\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$ ,  $P_D \leq 5.0\text{ W}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_O$	23	24	25	Vdc
Line Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $27\text{ Vdc} \leq V_I \leq 38\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ )	Reg <sub>line</sub>	—	10	50	mV
Load Regulation ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 500\text{ mA}$ ) ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 200\text{ mA}$ )	Reg <sub>load</sub>	—	30 10	480 240	mV
Output Voltage ( $27\text{ Vdc} \leq V_I \leq 38\text{ Vdc}$ , $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$V_O$	22.8	—	25.2	Vdc
Input Bias Current ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{IB}$	—	3.2	7.0	mA
Quiescent Current Change ( $27\text{ Vdc} \leq V_I \leq 38\text{ Vdc}$ , $I_O = 200\text{ mA}$ ) ( $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 350\text{ mA}$ )	$\Delta I_{IB}$	—	—	0.8 0.5	mA
Output Noise Voltage ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ )	$V_n$	—	170	—	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection (T suffix only) ( $I_O = 100\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $28\text{ V} \leq V_I \leq 38\text{ V}$ ) ( $I_O = 300\text{ mA}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $28\text{ V} \leq V_I \leq 38\text{ V}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	RR	50 50	— 70	—	dB
Dropout Voltage ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Short Circuit Current Limit ( $T_J = +25^\circ\text{C}$ )	$I_{OS}$	—	50	—	mA
Average Temperature Coefficient of Output Voltage ( $I_O = 5.0\text{ mA}$ )	$\Delta V_O / \Delta T$	—	$\approx 0.5$	—	$\text{mV}^\circ\text{C}$
Peak Output Current ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	$I_O$	—	700	—	mA

### DEFINITIONS

**Line Regulation** — The change in output voltage for a change in the input voltage. The measurement is made under conditions of low dissipation or by using pulse techniques such that the average chip temperature is not significantly affected.

**Load Regulation** — The change in output voltage for a change in load current at constant chip temperature.

**Maximum Power Dissipation** — The maximum total device dissipation for which the regulator will operate within specifications.

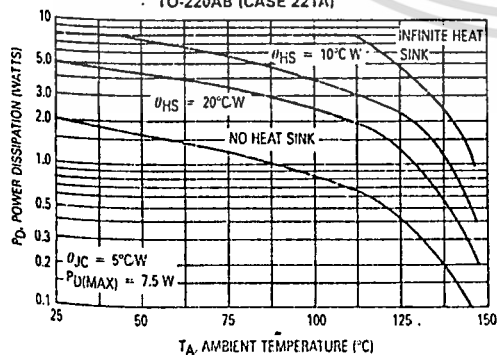
**Input Bias Current** — That part of the input current that is not delivered to the load.

**Output Noise Voltage** — The rms ac voltage at the output, with constant load and no input ripple, measured over a specified frequency range.

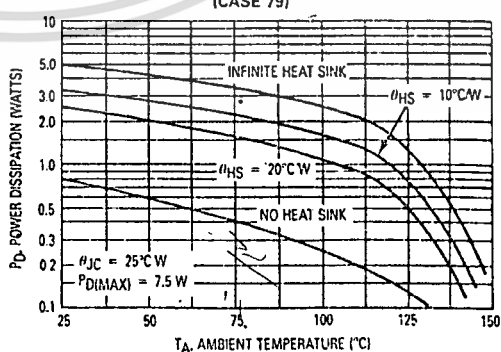
**Long Term Stability** — Output voltage stability under accelerated life test conditions with the maximum rated voltage listed in the devices' electrical characteristics and maximum power dissipation.

### TYPICAL PERFORMANCE CURVES

**FIGURE 1 — WORST CASE POWER DISSIPATION versus AMBIENT TEMPERATURE TO-220AB (CASE 221A)**



**FIGURE 2 — WORST CASE POWER DISSIPATION versus AMBIENT TEMPERATURE (CASE 79)**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความช่วยเหลือในหลาย ๆ ด้าน ทางคณะผู้จัดทำขอกล่าวขอบคุณบุคคลดังต่อไปนี้

บิดา-มารดาของคณะผู้จัดทำที่ให้ความช่วยเหลือด้านการเงิน

ผศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ วสันต์ อู่ยายโสม ม. มหานคร

คุณ สายัญ ศรีโหมค นศ.ปริญญาโท

และเพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจ คำแนะนำและช่วยเหลือด้านอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. C.F. Wagner and R.D.Evans, "Symmetrical Components", McGraw-Hill Book Company, Inc. New York and London, 1933.
2. Robert F. Coughlin and Frederick F. Driscoll, "Operational Amplifiers and Linear Intergrated Circuits", 3th, Prentice-Hall International Editions, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
3. William D. Stevenson, Jr. "Element of Power system Analysis", 4th, McGraw-hill Book Company. Singapore 1982.
4. ชำนาญ ห่อเกียรติ "การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์, 2532.
5. ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช, "การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง", บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2538.
6. วิบูล เขมรังษณุก์, "ทฤษฎีเครื่องวัดไฟฟ้าการวัดขนาดทางไฟฟ้า", โรงพิมพ์เจริญธรรม, 2528.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้