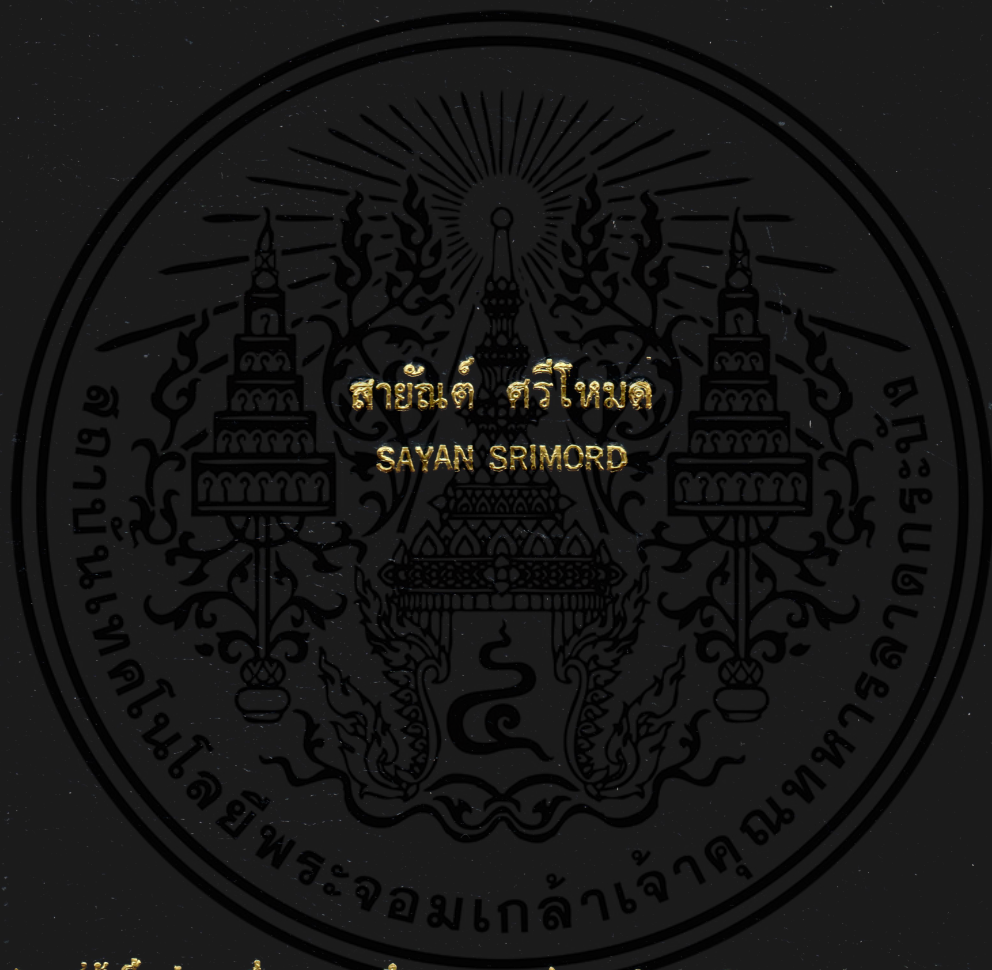


เครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

SYMMETRICAL COMPONENT CURRENTS MEASUREMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-189-4

เครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

SYMMETRICAL COMPONENT CURRENTS MEASUREMENT



สายัณต์ ศรีโหมด
SAYAN SRIMORD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2544

ISBN 974-648-189-4

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 39760
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ย. 2544

b.....
i.....

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYMMETRICAL COMPONENT CURRENTS MEASUREMENT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2001

ISBN 974-648-189-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

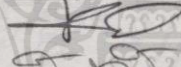
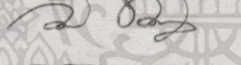
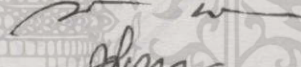
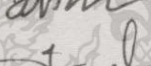
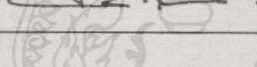
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า
SYMMETRICAL COMPONENT CURRENTS MEASUREMENT
ชื่อนักศึกษา นายสายัณต์ ศรีโหมด
รหัสประจำตัว 39061001
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
รศ.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.พิพัฒน์	เลาหสงคราม	
ผศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
รศ.ศิริวัฒน์	โปธิเวชกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 19 เมษายน 2544 เวลา 11.00 -12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัครชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....17.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ. ๒๕๔๔..

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า
นักศึกษา	นายสาธิต ศรีโหมค
รหัสประจำตัว	39061001
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

บทคัดย่อ

วิธีการองค์ประกอบสมมาตรได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่อยู่ในสถานะที่ไม่สมดุลโดยทำการพิจารณาจากองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่างๆ แต่ในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่างๆ ในระบบไฟฟ้าที่ใช้งานจริงมีความลำบากและยุ่งยากมากเนื่องจากระบบไฟฟ้ามีการเชื่อมต่อโหลดอย่างซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการนำเสนอหลักการออกแบบและสร้างเครื่องมือที่ใช้วัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า โดยใช้การจัดเก็บข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟส และทำการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C535 ขนาด 8 บิต เพื่อลดขั้นตอนในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในรูปของเฟสเซอร์ และทำการจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่สมดุล เพื่อทดสอบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของระบบไฟฟ้า 3 เฟสจำลองกับค่าที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด ซึ่งประโยชน์ที่จะได้รับจากเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าก็คือสามารถนำค่าองค์ประกอบสมมาตรที่วัดได้เป็นตัวแสดงผลในเวลาจริงหรือนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์แนวทางในการสร้างอุปกรณ์ป้องกันเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟสในกรณีที่ทำงานในสถานะที่ไม่สมดุล

Thesis Title	Symmetrical Component Currents Measurement
Student	Mr.Sayan Srimord
Student ID.	39061001
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc.Prof Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

Symmetrical component method is used to analyze an unbalance condition of a power system by considering of sequences. However, in practical, it is difficult to calculate the sequences because the power system is connected with complex loads and variable loads. This thesis presents the principle of design and prototype assembling of measuring equipment for measuring the symmetrical components of currents in the system, by data acquisition and digital signal processing based on 8 bits microcontroller(80C535). Implementation of the presented equipment can reduce the complicate work on mathematics calculation in phasor from and unbalance phase condition of a power system model for testing the prototype and comparing the measured value with the results from mathematics calculation. The advantages of the equipment are capable of applications in power system symmetrical components both monitor and analysis including applications in research of protection equipment for three phase machine under unbalanced system conditions.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับแนวทางในการทำงานจัดสร้างต้นแบบ รวมถึงการทดสอบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแส จาก รศ. ศิริวัฒน์ โพรเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่องาม คุณแม่สมจิตร ศรีโหมค ที่ให้โอกาสในการศึกษาและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่-น้อง และเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีปทุม ทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ และเป็นกำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา

ขอขอบคุณพี่-น้อง และเพื่อนๆในห้องวิจัย(Staff 2) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ และเป็นกำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สายันต์ ศรีโหมค

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อสัญลักษณ์	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	3
1.4 แนวคิดในการวิจัย	3
1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	5
2.1 สาเหตุของการเกิดระบบไฟฟ้าไม่สมดุล	5
2.2 ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร	6
2.2.1 สมการในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบสมมาตร	7
2.3 ผลกระทบของระบบไฟฟ้าไม่สมดุล	8
2.3.1 ผลกระทบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสแบบซิงโครนัส	8
2.3.2 ผลกระทบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	9
2.4 ค่าความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า	10
2.5 การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตร	11
2.5.1 การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับศูนย์	12
2.5.2 การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับบวกและลำดับลบ	12

สารบัญ (ต่อ)

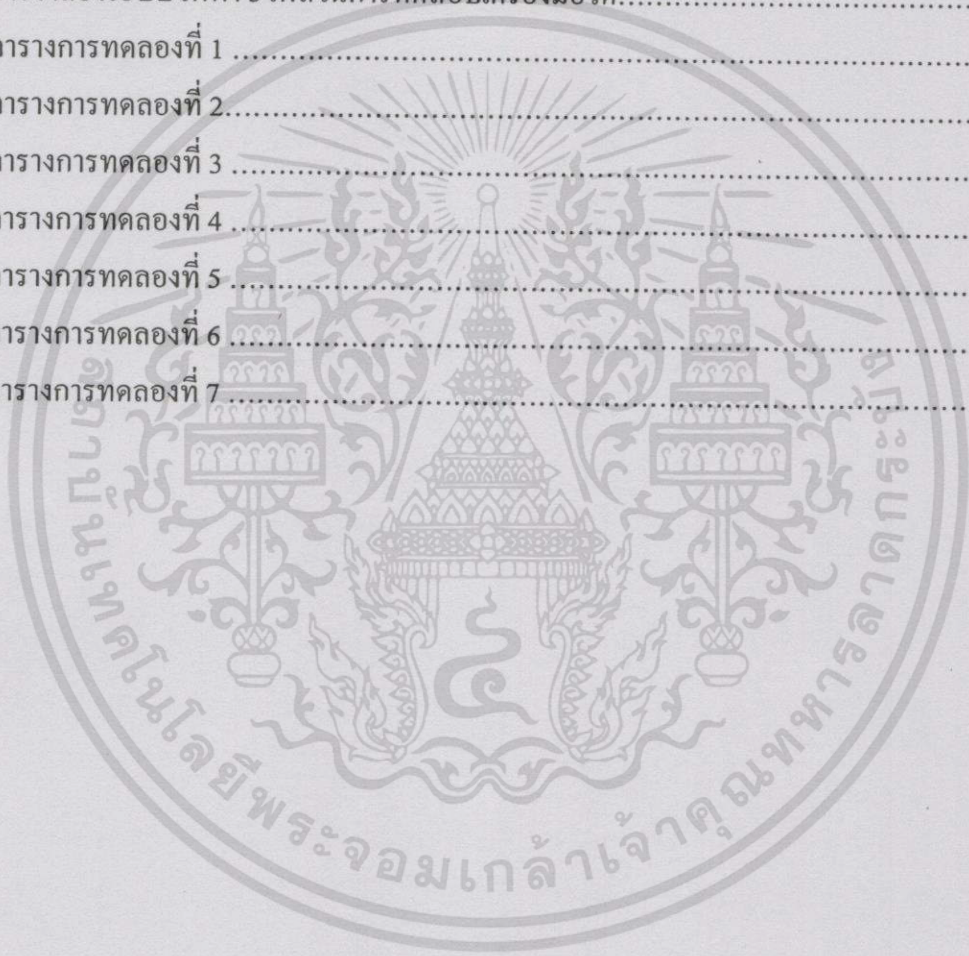
	หน้า
บทที่ 3 หลักการออกแบบเครื่องวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า	16
3.1 ทฤษฎีการจัดเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผล (Data Acquisition)	16
3.2 หลักการของเครื่องวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า	20
3.3 ส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า (Input Part)	22
3.3.1 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส (Current Sensor)	22
3.3.2 วงจรกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง (Active Lowpass Filter)	24
3.3.3. วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)	26
3.3.4. วงจรแปลงสัญญาณเต็มรูปคลื่น (Full-wave rectifier)	27
3.3.5. วงจรตรวจจับสัญญาณตัดผ่านศูนย์ (Zero-Crossing Detector)	27
บทที่ 4 หลักการออกแบบโครงสร้างโปรแกรมประมวลผลหาค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า	32
4.1 โครงสร้างโปรแกรมหลักของเครื่องมือวัด	32
4.2 โปรแกรมการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอล	33
4.2.1 การทำงานการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C535	33
4.2.2 การทำงานของไทเมอร์ 0 ในโหมดโหลดค่าใหม่ (Automatic Reload Mode)	35
4.2.3 หลักการ โปรแกรมการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอล	35
4.3 โปรแกรมในการหาค่ามุมต่างเฟส	37
4.3.1 การทำงานในภาคแคปเจอร์ ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C535	37
4.3.2 หลักการ โปรแกรมหาค่ามุมต่างเฟส	39
4.4 โปรแกรมหาค่าประสิทธิภาพ (R.M.S) ของสัญญาณกระแส	44
4.5 โปรแกรมการหาค่าฟังก์ชันตรีโกณมิติ (sin,cos) ของมุมต่างเฟส	44
4.5.1 การหาค่าฟังก์ชัน sin	47
4.5.2 การหาค่าฟังก์ชัน cos	49
4.6 โปรแกรมการคำนวณหาค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่าง ๆ	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดสอบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า	60
5.1. การทดลองและอุปกรณ์การทดลอง	60
5.1.1 การทดลองที่ 1. กรณีกระแสของระบบสมดุล	63
5.1.2 การทดลองที่ 2. กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล	64
5.1.3 การทดลองที่ 3. กรณีขนาดและมุมต่างเฟสกระแสของ ระบบไม่สมดุล(lagging P.F.)	65
5.1.4 การทดลองที่ 4. กรณีขนาดและมุมต่างเฟสกระแสของ ระบบไม่สมดุล(leading P.F.)	66
5.1.5 การทดลองที่ 5. กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล (Star –without neutral)	67
5.1.6 การทดลองที่ 6. กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล (Dynamic load)	68
5.1.7 การทดลองที่ 7. กรณีวัดค่าสัญญาณกระแสที่มีฮาร์มอนิกส์	69
5.2 ผลการทดลอง	70
5.3 ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัด	83
บทที่ 6. สรุป และ ข้อเสนอแนะ	88
6.1 ผลการวิจัย	88
6.2 คุณลักษณะเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า	91
6.3 แนวทางในการพัฒนา	91
เอกสารอ้างอิง	93
ภาคผนวก ก	95
ภาคผนวก ข	96
ภาคผนวก ค	104
ภาคผนวก ง	110
ภาคผนวก จ	119
ประวัติผู้เขียน	144

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลพิกัดอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส	23
3.2 ข้อมูลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส	23
4.1 สรุปรายละเอียดการหาค่าฟังก์ชัน sin ของมุมต่างเฟสในทั้ง 4 ควอดแดนต์	49
4.2 สรุปรายละเอียดการหาค่าฟังก์ชัน cos ของมุมต่างเฟสในทั้ง 4 ควอดแดนต์	51
5.1 การจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสในการทดสอบเครื่องมือวัด.....	61
5.2 ตารางการทดลองที่ 1	63
5.3 ตารางการทดลองที่ 2.....	64
5.4 ตารางการทดลองที่ 3	65
5.5 ตารางการทดลองที่ 4	66
5.6 ตารางการทดลองที่ 5	67
5.7 ตารางการทดลองที่ 6	69
5.8 ตารางการทดลองที่ 7	70



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การต่อใช้งาน โหลด 1 เฟส(ขนาดใหญ่)สาเหตุของระบบไฟฟ้าไม่สมดุล	5
2.2 องค์ประกอบสมมาตรลำดับต่าง ๆ	6
2.3 กราฟค่า Derating Factor	9
2.4 การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์.....	11
2.5 การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกและลำดับลบ.....	13
3.1 บล็อกไดอะแกรมระบบการจัดเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผล.....	17
3.2 ทฤษฎีการชักข้อมูล	18
3.3 บล็อกไดอะแกรมหลักการของเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตร.....	21
3.4 บล็อกไดอะแกรมส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า.....	22
3.5 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส (Model CSM-161)	23
3.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส [$V_{o/p}(m)$] กับค่าแรงดันเอาต์พุตจากการคำนวณ [$V_{o/p}(c)$]	24
3.7 การตอบสนองความถี่ของวงจรฟิลเตอร์แบบกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	24
3.8 วงจรกรองความถี่ต่ำตัดเคอร์เวอร์ทที่ให้ค่า -40เดซิเบล/เดคา และกราฟการตอบสนองความถี่ของวงจรนี้	25
3.9 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	26
3.10 วงจรแปลงสัญญาณเต็มรูปคลื่น	27
3.11 หลักการหาค่าเวลาต่างเฟสระหว่างเฟส a กับเฟส b	28
3.12 วงจรตรวจจับการเริ่มต้นของสัญญาณ	28
3.13 วงจรส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า	29
3.14 ลายทองแดงวงจรส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า	30
3.15 การลงอุปกรณ์วงจรส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า	30
4.1 โพลีชาร์ตโปรแกรมหลักการประมวลผล	33
4.2 โครงสร้างการทำงานในส่วนการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอลใน 80C535	34
4.3 แผนภาพแสดงการทำงานไทมเมอร์ 0 ในโหมดโหลดค่าใหม่	35
4.4 โพลีชาร์ตแสดงการทำงาน โปรแกรมการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอล	36
4.5 โครงสร้างการทำงานของภาคแคปเจอร์	38
4.6 โครงสร้างการทำงานภาคแคปเจอร์รีจิสเตอร์ CC1	38

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 โพลาร์ชาร์ตแสดงการทำงาน โปรแกรมการหาค่ามุมต่างเฟส	40
4.8 การหาพื้นที่ใต้กราฟโดยวิธีแบ่งพื้นที่ทั้งหมดออกเป็นพื้นที่เล็กๆ จำนวนหลายๆ ช่องที่มีความกว้างเท่าๆ กัน	44
4.9 โพลาร์ชาร์ตแสดงการทำงาน โปรแกรมหาค่าประสิทธิภาพของสัญญาณกระแส	46
4.10 โพลาร์ชาร์ตแสดงการทำงาน โปรแกรมหาค่าฟังก์ชัน sin ของมุมต่างเฟส	48
4.11 การแบ่งฟังก์ชัน sin และฟังก์ชัน cos ออกเป็น 4 ควอดแดนซ์	48
4.12 โพลาร์ชาร์ตแสดงการทำงาน โปรแกรมหาค่าฟังก์ชัน cos ของมุมต่างเฟส	50
4.13 บล็อกไดอะแกรมแสดงวิธีการคำนวณหาค่าองค์ประกอบสมมาตร	52
4.14 โพลาร์ชาร์ตแสดงการทำงาน โปรแกรมการหาผลลัพธ์ของการรวมทั้งส่วนจริง และส่วนจินตภาพ	55
4.15 โพลาร์ชาร์ตแสดงการทำงาน โปรแกรมการหาค่ารากที่ 2 ของตัวแปร	58
5.1 บล็อกไดอะแกรมของการจำลองระบบเพื่อทดสอบเครื่องมือวัด	60
5.2 ชุดStatic load (Incandescent lamp load , Inductance load , Capacitance load)	62
5.3 ชุดDynamic load (3-phase Induction Motor load)	62
5.4 วงจรการทดลองที่ 1.	63
5.5 วงจรการทดลองที่ 5.	67
5.6 วงจรการทดลองที่ 6.	68
5.7 วงจรการทดลองที่ 7.	69
5.8 กราฟแสดงผลการทดลองที่1.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด $[I_{p(m)}]$ กับค่าที่ได้จากการคำนวณ $[I_{p(c)}]$	71
5.9 กราฟแสดงผลการทดลองที่2.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด $[I_{p(m)}]$ กับค่าที่ได้จากการคำนวณ $[I_{p(c)}]$	72
5.10 กราฟแสดงผลการทดลองที่2.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด $[I_{n(m)}]$ กับค่าที่ได้จากการคำนวณ $[I_{n(c)}]$	72
5.11 กราฟแสดงผลการทดลองที่2.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด $[I_{z(m)}]$ กับค่าที่ได้จากการคำนวณ $[I_{z(c)}]$	73
5.12 กราฟแสดงผลการทดลองที่2.เปรียบเทียบค่าระดับความไม่สมดุล ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด $[\%ub_{(m)}]$ กับค่าที่ได้จากการคำนวณ $[\%ub_{(c)}]$	73

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 กราฟแสดงผลการทดลองที่3.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[Ip(m)]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[Ip(c)]	74
5.14 กราฟแสดงผลการทดลองที่3.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[In(m)]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[In(c)]	74
5.15 กราฟแสดงผลการทดลองที่3.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[Iz(m)]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[Iz(c)]	75
5.16 กราฟแสดงผลการทดลองที่3.เปรียบเทียบค่าระดับความไม่สมดุล ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[$\%ub_{(m)}$]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[$\%ub_{(c)}$]	75
5.17 กราฟแสดงผลการทดลองที่4.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[Ip(m)]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[Ip(c)]	76
5.18 กราฟแสดงผลการทดลองที่4.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[In(m)]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[In(c)]	76
5.19 กราฟแสดงผลการทดลองที่4.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[Iz(m)]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[Iz(c)]	77
5.20 กราฟแสดงผลการทดลองที่4.เปรียบเทียบค่าระดับความไม่สมดุล ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[$\%ub_{(m)}$]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[$\%ub_{(c)}$]	77
5.21 กราฟแสดงผลการทดลองที่5.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[Ip(m)]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[Ip(c)]	78
5.22 กราฟแสดงผลการทดลองที่5.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[In(m)]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[In(c)]	78
5.23 กราฟแสดงผลการทดลองที่5.เปรียบเทียบค่าระดับความไม่สมดุล ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[$\%ub_{(m)}$]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[$\%ub_{(c)}$]	79
5.24 กราฟแสดงผลการทดลองที่6.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[Ip(m)]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[Ip(c)]	80
5.25 กราฟแสดงผลการทดลองที่6.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[In(m)]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[In(c)]	80
5.26 กราฟแสดงผลการทดลองที่6.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[Iz(m)]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[Iz(c)]	81

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.27 กราฟแสดงผลการทดลองที่6.เปรียบเทียบค่าระดับความไม่สมดุล ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[$I_p(m)$]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[$I_p(c)$]	81
5.28 กราฟแสดงผลการทดลองที่7.เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[$I_p(m)$]กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[$I_p(c)$]	82
5.29 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 1.	83
5.30 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 2.	84
5.31 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 3.	84
5.32 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 4.	85
5.33 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 5.	85
5.34 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 6.	86
5.35 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 7.	86

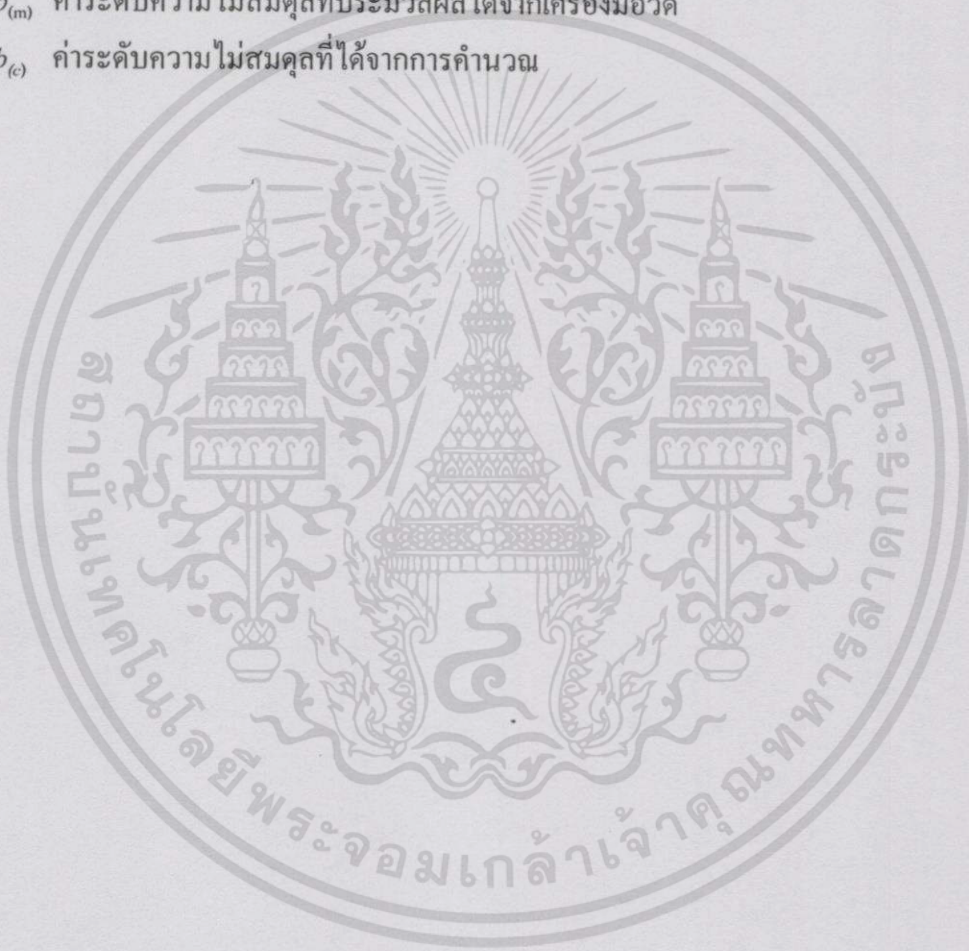
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

a	โอเปอเรเตอร์ (e^{j120})
V_0	ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ของแรงดัน
V_1	ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกของแรงดัน
V_2	ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบของแรงดัน
I_0	ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ของกระแส
I_1	ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกของกระแส
I_2	ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบของกระแส
%ub	เปอร์เซ็นต์ค่าระดับความไม่สมดุล
V_{Lavg}	ค่าเฉลี่ยของแรงดันไลน์
V_{Pavg}	ค่าเฉลี่ยของแรงดันเฟส
T_S	คาบเวลาการซึกข้อมูล
ω_s	ความถี่การซึกข้อมูล
ω_c	ความถี่การกัตออฟ
m	จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการซึกข้อมูลสัญญาณกระแส
$I(n)$	ค่าข้อมูลจากการซึกข้อมูลสัญญาณกระแสในครั้งที่ n
I_{RMS}	ค่าประสิทธิภาพผลของสัญญาณกระแส
θ_1	มุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่าง เฟส a กับเฟส b
θ_2	มุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่าง เฟส a กับเฟส c
$\theta_{(sub)}$	ค่ามุมต่างเฟสที่เก็บไว้ในหน่วยความจำแบบตารางข้อมูล
t_a	ค่าเวลาเริ่มต้นของสัญญาณกระแสเฟส a
t_b	ค่าเวลาเริ่มต้นของสัญญาณกระแสเฟส b
t_{a-b}	ค่าเวลาต่างเฟสระหว่างของสัญญาณกระแสเฟส a กับ b
t_{a-c}	ค่าเวลาต่างเฟสระหว่างของสัญญาณกระแสเฟส a กับ c
Z_a	โหลดเฟส a
Z_b	โหลดเฟส b
Z_c	โหลดเฟส c
Z_{ah}	โหลดฮาร์โมนิกส์เฟส a
Z_{bh}	โหลดฮาร์โมนิกส์เฟส b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Z_{ch} โหลดฮาร์โมนิกส์เฟส c
- $I_{p(m)}$ ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด
- $I_{p(c)}$ ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกที่ได้จากการคำนวณ
- $I_{n(m)}$ ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด
- $I_{n(c)}$ ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบที่ได้จากการคำนวณ
- $I_{z(m)}$ ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด
- $I_{z(c)}$ ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ที่ได้จากการคำนวณ
- $\%ub_{(m)}$ ค่าระดับความไม่สมดุลที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด
- $\%ub_{(c)}$ ค่าระดับความไม่สมดุลที่ได้จากการคำนวณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกิดสภาวะไม่สมดุลในระบบไฟฟ้า 3 เฟส เป็นปัญหาที่สำคัญอีกปัญหาหนึ่งในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ระดับแรงดันไฟฟ้าเกิดสภาวะไม่สมดุลมีผลทำให้กระแสที่จ่ายให้กับโหลด 3 เฟส เกิดสภาวะไม่สมดุลไปด้วย สาเหตุที่ทำให้ระบบไฟฟ้าไม่สมดุลอาจเกิดได้จากการไม่สมดุลของโหลด 3 เฟส ที่ต่อใช้งานอยู่หรืออาจเนื่องมาจากการใช้งานโหลด 1 เฟส ที่ต่อใช้งานร่วมกับโหลด 3 เฟส อาทิเช่น โหลดแสงสว่าง โหลดระบบปรับอากาศ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และอีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเกิดขัดข้อง เช่นแรงดันแต่ละเฟสหายไป 1 เฟส หรือ 2 เฟส หรือเกิดลัดวงจร(ฟอลต์)แบบไม่สมดุลขึ้นซึ่งก็จะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุลทางไฟฟ้าขึ้นได้

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในสภาวะสมดุลสามารถวิเคราะห์ได้เหมือนวงจรหนึ่งเฟส โดยเขียนเป็นวงจรสมมูลหนึ่งเฟส (Single Phase Equivalent Circuit) เพราะขนาดแรงดันและกระแสในแต่ละเฟสเท่ากัน แต่เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดไม่สมดุลจะไม่สามารถวิเคราะห์จากวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ และการวิเคราะห์โดยตรงจากวงจรของระบบก็ค่อนข้างยุ่งยากมากในทางคณิตศาสตร์เมื่อระบบมีการเชื่อมโยงกันอย่างซับซ้อน

วิธีองค์ประกอบสมมาตรนั้น เป็นวิธีที่สามารถจะแยกเฟสเซอร์ของระบบที่ไม่สมดุล N เฟสเซอร์เป็นระบบเฟสเซอร์ที่สมดุล N องค์ประกอบแทน ซึ่งจะทำให้เราสามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า 3 เฟสในสภาวะไม่สมดุลได้ด้วยการใช้วิธีองค์ประกอบสมมาตรดังกล่าวแยกเป็นระบบเฟสเซอร์ที่สมดุล 3 องค์ประกอบด้วยกัน ได้แก่ องค์ประกอบลำดับบวก, องค์ประกอบลำดับลบ, และองค์ประกอบลำดับศูนย์

วิธีองค์ประกอบสมมาตรถูกจึงนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะการศึกษาฟอลต์แบบไม่สมมาตรในระบบส่งจ่าย รวมถึงการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟสขณะทำงานในสภาวะที่ระบบไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งจากการวิเคราะห์ก็เป็นผลทำให้ได้แนวทางในการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นจากความผิดปกติของระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุล

จากประโยชน์ของการคำนวณหาค่าองค์ประกอบสมมาตรเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากรณีที่ระบบไม่สมดุล แต่การคำนวณก็ยังมี ความยุ่งยากเนื่องจากระบบไฟฟ้ามีการเชื่อมต่อโหลดอย่างซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จึงได้มีการพัฒนาการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรในระบบใช้งานจริงแทนการคำนวณซึ่งทำให้ลดเวลาและให้

ผลจริงในเวลานั้นๆ โดยในปี 1933 C.F.WAGNER ,R.D.EVANS ได้นำเสนอหลักการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตร[1] ด้วยการประมวลผลสัญญาณกระแสจากวงจรการเลื่อนเฟส (Phase Shift) โดยอุปกรณ์ประเภทพาสซีส(R,L,C) หรือเป็นการประมวลผลในรูปแบบของสัญญาณอะนาล็อก หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาวิธีการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรในรูปแบบต่างๆมากมาย[2-3] เพื่อให้สามารถวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรในระบบใช้งานจริงได้ถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งต่อมาก็ได้มีการประยุกต์ใช้หลักการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรในงานต่างๆ อาทิเช่นใช้เป็นอุปกรณ์ในการป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสในกรณีจ่ายโหลดไม่สมดุลหรือเกิดลัดวงจรแบบไม่สมดุลขึ้นในระบบส่งจ่าย โดยในการป้องกันพิจารณาจากค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเรียกว่า Negative-Sequence Overcurrent Relay[4] และในการป้องกันระบบไฟฟ้าก็ยังมีมีการประยุกต์ใช้ Negative-Sequence Overcurrent Relay สำหรับการลัดวงจรแบบไม่สมดุล(Unsymmetrical Fault)[5] โดยในการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของรีเลย์ยังคงเป็นการวัดในรูปแบบของสัญญาณอะนาล็อก และยังประยุกต์ใช้หลักการวัดในอุปกรณ์การป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสในกรณีที่ทำงานในสภาวะแหล่งจ่ายไม่สมดุล โดยในการป้องกันพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุลของกระแส (%Unbalance Level) ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุลของกระแสนั้นสามารถคำนวณจากอัตราส่วนองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบและลำดับบวกของกระแสไฟฟ้า[1] ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุลใช้วิธีการหาค่าแบบเปรียบเทียบกับกราฟ(Unbalance Contours)[6] ซึ่งใช้ได้เฉพาะในกรณีที่ระบบไฟฟ้า 3 เฟสมีการต่อโหลดแบบ 3 สาย(Without Neutral) จากประโยชน์ที่กล่าวมาข้างต้นของการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตร ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล่งเห็นประโยชน์ที่จะได้รับจึงได้นำเสนอการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแส ซึ่งประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นส่วนประกอบหลักเพื่อใช้ในการประมวลผลหาค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่าง ๆ จากค่ากระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส โดยสามารถแสดงค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับและค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุลของกระแส [7-8] สำหรับการต่อโหลดแบบต่างๆในระบบใช้งานจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาและออกแบบหลักการวัด ค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าลำดับต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C535 ในการประมวลผล
2. เพื่อศึกษาและออกแบบโปรแกรมการประมวลผล เพื่อหาค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าลำดับต่าง ๆ ตามวิธีการทางคณิตศาสตร์ตัวเลขเชิงซ้อน(Complex Number)
3. เพื่อสร้างเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าลำดับต่าง ๆ ในระบบใช้งานจริงแทนการคำนวณที่ยุ่งยากและลำบากสำหรับระบบไฟฟ้าที่ซับซ้อนซับซ้อนขึ้นประโยชน์ด้านการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แต่งขึ้นเพื่อการศึกษาและใช้งานเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ในกรณีที่ระบบไฟฟ้า 3 เฟสเกิดสถานะไม่สมดุลของกระแสในแต่ละเฟสนั้น เราสามารถจะแตกระบบที่ไม่สมดุลนี้เป็นระบบที่สมดุลซึ่งแบ่งออกเป็น 3 องค์ประกอบด้วยกัน คือ 1.กระแสองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก 2.กระแสองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ และ 3. กระแสองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ ในการหาค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 องค์ประกอบนี้ สามารถคำนวณได้จากค่าเฟสเซอร์(ขนาดและมุมต่างเฟส) ของสัญญาณกระแสทั้ง 3 เฟส โดยถ้ากำหนดให้กระแสในเฟส a เป็นเฟสอ้างอิง(reference) และด้วยการใช้ค่าโอเปอเรเตอร์ a ($1\angle 120^\circ$) ก็จะทำให้เราได้สมการสำหรับการประมวลผลหาค่าขนาดองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 องค์ประกอบเขียนอยู่ในเทอมของเฟสเซอร์กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส $[I_{012}] = [A]^{-1}[I_{abc}]$

1.4 แนวคิดในการวิจัย

จากสมการในการประมวลผลหาค่าขนาดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสทั้ง 3 องค์ประกอบในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะทำการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า โดยการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลแบบดิจิทัลตามสมการดังกล่าวข้างต้น เพื่อหาค่าองค์ประกอบสมมาตรจากค่าเฟสเซอร์ของกระแสทั้ง 3 เฟสในระบบใช้งานจริง

1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบและสร้าง เครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟส ที่ใช้วัดในระบบใช้งานจริง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผล
2. ทำการทดลองเพื่อทดสอบการใช้งานเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า โดยให้มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ที่มาในการทำวิทยานิพนธ์ สมมุติฐานของการศึกษา แนวคิดในการวิจัย จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รายละเอียดโดยรวมของบทต่าง ๆ ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง สาเหตุของการเกิดระบบไฟฟ้าไม่สมดุล พื้นฐานทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรที่ประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาระบบไฟฟ้า 3 เฟสในกรณีที่ระบบไม่สมดุล ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับ

อุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดไม่สมดุล ค่ามาตรฐานในการกำหนดค่าระดับความไม่สมดุลของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไฟฟ้า และแนวทางในการสร้างเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าจากการประมวลผลของสัญญาณกระแสในแต่ละเฟส

บทที่ 3 กล่าวถึง หลักการและการออกแบบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า ประกอบไปด้วย หลักการของเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า ทฤษฎีการนำข้อมูลเพื่อประมวลผล (Data Acquisition) หลักการและรายละเอียดการสร้างส่วนรับสัญญาณป้อนเข้าของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแส

บทที่ 4 กล่าวถึง หลักการและการออกแบบโครงสร้างโปรแกรมในการคำนวณค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าในลำดับต่าง ๆ ประกอบไปด้วย โครงสร้างโปรแกรมหลักของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตร โครงสร้างไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C535 หลักการและรายละเอียดการออกแบบโปรแกรมหลักต่าง ๆ ในการประมวลผล

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง เครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ ของกระแสไฟฟ้า โดยวัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด โดยนำผลที่ได้จากการประมวลผลของเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ซึ่งการทดลองจะจำลองระบบไฟฟ้าในสภาวะโหลดต่าง ๆ ที่ง่ายต่อการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดและจากการคำนวณในทางทฤษฎีและการสรุปผลการทดลองเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ ของกระแสไฟฟ้า

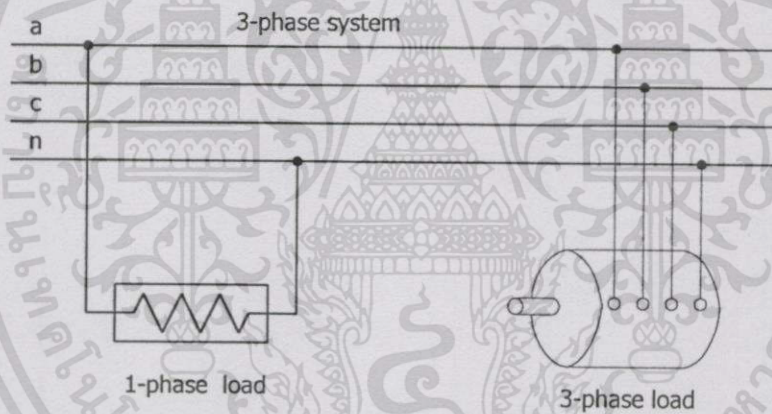
บทที่ 6 สรุปและเสนอแนะ กล่าวถึง สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ปัญหาและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการวิจัย คุณลักษณะเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตร แนวทางในการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยเนื้อหาจะประกอบไปด้วย 1.สาเหตุของการเกิดระบบไฟฟ้าไม่สมดุล 2.พื้นฐานทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรที่ประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาหาระบบไฟฟ้า 3 เฟสในกรณีที่ระบบไม่สมดุล 3.ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดไม่สมดุล 4.มาตรฐานในการกำหนดค่าระดับความไม่สมดุลของระบบ 5.แนวทางในการสร้างเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าจากการประมวลผลของสัญญาณกระแสในแต่ละเฟส

2.1 สาเหตุของการเกิดระบบไฟฟ้าไม่สมดุล



รูปที่ 2.1 การต่อใช้งาน โหลด 1 เฟส(ขนาดใหญ่) สาเหตุของระบบไฟฟ้าไม่สมดุล

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ระดับของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบต้องมีขนาดเท่ากันทั้ง 3 เฟส และค่ามุมต่างเฟสของสัญญาณต้องห่างเท่ากัน 120 องศาในแต่ละเฟส จึงจะเรียกว่าระบบไฟฟ้าที่สมดุล แต่ถ้าระบบไฟฟ้ามีระดับแรงดันหรือกระแสและค่ามุมต่างเฟสไม่เท่ากันตามที่กล่าวมาข้างต้น เราจะเรียกว่าระบบไฟฟ้านั้นเกิดการไม่สมดุล โดยปกติแล้วระบบไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะที่สมดุล แต่ก็อาจจะมีสาเหตุทำให้ระบบเกิดไม่สมดุลขึ้นได้ อาทิเช่น ในระบบส่งจ่ายอาจมีการต่อโหลด 1 เฟสขนาดใหญ่(โหลดแสงสว่าง,ระบบปรับอากาศ) ซึ่งเป็นโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้งานอยู่ตลอดเวลา(ดังรูปที่ 2.1) จึงเป็นสาเหตุทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งระดับแรงดันที่ไม่เท่ากันนี้ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งและขนาดของโหลด 1 เฟสที่ต่อใช้งาน[9] เมื่อค่าแรงดันในแต่ละเฟสของระบบไม่เท่ากันจึงส่งผลทำให้ค่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลด 3 เฟสที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าเกิดไม่สมดุลขึ้นได้และอีกสาเหตุหนึ่งก็อาจเกิดจากระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขัดข้องในกรณีลัดวงจร(ฟอลต์)แบบไม่สมดุลเช่น ลัดวงจรแบบไลน์กับกราวด์ หรือลัดวงจรแบบไลน์กับไลน์และแรงดันในแต่ละเฟสหายไป 1 เฟสหรือ 2 เฟส

2.2 ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร

ในกรณีที่ระบบไฟฟ้าสมดุล เราสามารถวิเคราะห์ระบบจากวงจรสมมูล 1 เฟสได้เพราะค่าแรงดันและกระแสในแต่ละเฟสมีค่าเท่ากันทุกเฟส แต่จะแตกต่างกันที่มุมต่างเฟส โดยในแต่ละเฟสจะห่างกันไป 120 องศา แต่ถ้าระบบไฟฟ้าเกิดไม่สมดุล การวิเคราะห์จากวงจรสมมูล 1 เฟสนั้นทำไม่ได้เพราะค่าแรงดันหรือกระแสและมุมต่างเฟสของสัญญาณมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละเฟส หรือจะทำการวิเคราะห์โดยตรงจากวงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟสก็ทำได้ยาก ในการคำนวณคณิตศาสตร์ เพราะในระบบใช้งานจริงมีการเชื่อมต่อดังกล่าวกันอย่างซับซ้อน ในปีค.ศ. 1918 Dr.Charles L. Fortescue ได้เผยแพร่งานวิจัยเรื่อง “Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks.” [10] ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาระบบ N เฟสที่ไม่สมดุลด้วยการวิเคราะห์จากระบบ N เฟสที่สมดุล ซึ่งระบบ N เฟสที่สมดุลนี้เราจะเรียกว่า องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) การใช้ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่สมดุลด้วยระบบ 3 เฟสที่สมดุลจะประกอบไปด้วยระบบเฟสเซอร์ที่สมดุล 3 ระบบ(รูปที่ 2.2) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบสมมาตรลำดับต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก (Positive-Sequence Component) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟส ที่มีขนาดเท่ากันและมุมต่างเฟสห่างกัน 120 องศา และมีลำดับเฟสเหมือนเฟสเซอร์ของระบบเดิม(ระบบที่ไม่สมดุล)

2. องค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ (Negative-Sequence Component) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟส ที่มีขนาดเท่ากันและมุมต่างเฟสห่างกัน 120 องศา โดยมีลำดับเฟสตรงกันข้ามกับเฟสเซอร์ของระบบเดิม(ระบบที่ไม่สมดุล)

3. องค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ (Zero-Sequence Component) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟส ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมต่างเฟสตรงกัน(Inphase)

2.2.1 สมการในการวิเคราะห์ห่องค์ประกอบสมมาตร

ค่าแรงดันหรือกระแสในระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่สมดุลสามารถหาได้จากค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ จากสมการดังนี้

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \quad (2.1)$$

$$V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 \quad (2.2)$$

$$V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \quad (2.3)$$

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 \quad (2.4)$$

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \quad (2.5)$$

$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 \quad (2.6)$$

เมื่อ I_a, I_b, I_c และ V_a, V_b, V_c เป็นค่ากระแสและแรงดันของระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุล

$$a \text{ (Operator)} = e^{j120} = -0.5 + j0.866$$

V_0, I_0 เป็นค่าแรงดันและกระแสองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์

V_1, I_1 เป็นค่าแรงดันและกระแสองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก

V_2, I_2 เป็นค่าแรงดันและกระแสองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ

และจากสมการ(2.1) ถึง (2.6) ก็สามารถทำการหาค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่าง ๆ ได้ จากค่าแรงดันและกระแสของระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุลได้ดังสมการดังนี้

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (2.7)$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + a V_b + a^2 V_c) \quad (2.8)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2 V_b + a V_c) \quad (2.9)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภา... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (2.11)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (2.12)$$

2.3 ผลกระทบของระบบไฟฟ้าไม่สมดุล

เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดไม่สมดุลขึ้น จะมีผลกระทบต่อการทำงานและสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟสที่ต่อใช้งานอยู่กับระบบ ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟสที่ใช้งานในระบบส่วนใหญ่ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสแบบซิงโครนัส(3-phase Synchronous Generator) และมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (3-phase Induction Motor)

2.3.1 ผลกระทบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสแบบซิงโครนัส

กรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสให้กับ โหลด 3 เฟสในสถานะที่สมดุล กระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น(Reaction Field) โดยที่สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้มีความเร็วรอบคงที่และมีทิศทางสนามแม่เหล็กหมุนเช่นเดียวกับสนามแม่เหล็กหลักที่เกิดจากโรเตอร์(Synchronous Speed) แต่เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสให้กับ โหลด 3 เฟสที่ไม่สมดุล ก็เกิดผลกระทบกับการทำงานของเครื่องกำเนิด โดยสามารถวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นได้จากทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า ดังนี้

1. องค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับบวก ก็สามารถพิจารณาผลของการเกิดสนามแม่เหล็กได้เช่นเดียวกับกรณีโหลดสมดุลปกติ

2. องค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับศูนย์ ส่วนนี้ไม่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นได้ เพราะผลรวมของสนามแม่เหล็กหักล้างกัน

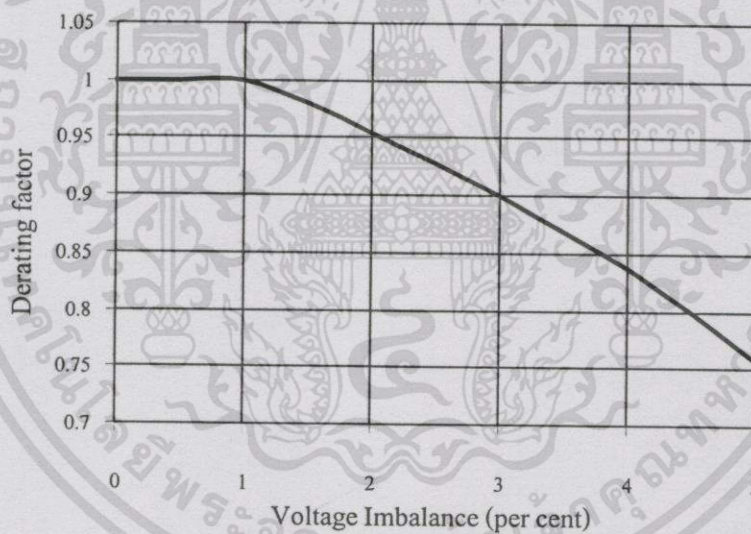
3. องค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับลบ การเกิดสนามแม่เหล็กก็เช่นเดียวกับองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก แต่ทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนจะตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ ลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสขึ้นภายในแกนเหล็กของโรเตอร์ โดยค่าความถี่ของกระแสที่โรเตอร์เป็น 2 เท่าของความถี่ปกติ ซึ่งทำให้ค่าการสูญเสียจากกระแสไหลวน(Eddy Current) มีค่าสูงมากขึ้นกว่าในกรณีปกติ และโรเตอร์จะมีความร้อนมากขึ้นจนอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเครื่องกำเนิดได้[4]

ตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม(มอก.)ที่มอก.868-2532 เรื่อง “เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ(ไม่รวมตัวคั่นกำลัง)”[11] ระบุไว้ว่าถ้าการใช้งานเครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัสจ่ายโหลดในสถานะสมดุลค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับลบและองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับศูนย์ต้องไม่มากกว่าร้อยละ 5 ขององค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับบวก($I_2 \text{ or } I_0 / I_1 < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ผลกระทบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเกิดไม่สมดุลขึ้นจะส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เกิดสภาวะไม่สมดุลขึ้นด้วย เปอร์เซ็นต์การไม่สมดุลของกระแสในมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าอาจจะมากกว่า 10 เท่าของเปอร์เซ็นต์การไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ [6] การวิเคราะห์ผลกระทบของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟสในสภาวะแหล่งจ่ายไม่สมดุลนี้ก็สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีองค์ประกอบสมมาตรเช่นเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส โดยการพิจารณาผลกระทบจากกระแสองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับลบที่ขดลวดสเตเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในลักษณะตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสขึ้นที่โรเตอร์ด้วยความถี่สูงเท่ากับ $(2-s)f$ (เมื่อ f คือความถี่ของสัญญาณทางสเตเตอร์และ s คือค่าสลลิป) กระแสเหนี่ยวนำในโรเตอร์นี้ส่งผลให้เกิดความร้อนเพิ่มมากขึ้นในโรเตอร์ ความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์จะมีค่าน้อยลง[12]



รูปที่ 2.3 กราฟค่า Derating Factor

ตามมาตรฐาน IEC892(1987)[13] ได้กำหนดค่าการลด(Derating Factor) พิกัดกำลังของโหลดมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานในสภาวะแหล่งจ่ายไม่สมดุล โดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์การไม่สมดุลของแหล่งจ่ายแรงดัน (ดังรูปกราฟที่ 2.3) แต่ถ้าค่าเปอร์เซ็นต์การไม่สมดุลของแรงดันมีค่ามากกว่า 5% การป้องกันมอเตอร์ควรพิจารณาจากค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับลบแทน และตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม(มอก.)ที่มอก.867-2532 เรื่อง "มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส"[14] ได้กำหนดไว้ว่าในการทำงานในสภาวะสมดุลค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับลบต้องไม่เกินร้อยละ 2.5 ขององค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับ

บวกกับเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาเห็นได้ว่า เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดสถานะที่ไม่สมดุล ทำให้เกิดการสูญเสียในด้านความร้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีอายุการใช้งานลดลงกว่าปกติ หรือถ้าระบบไฟฟ้าไม่สมดุลรุนแรงมาก อาทิเช่นเฟสใดเฟสหนึ่งหายไป ก็อาจทำให้เกิดความเสียหายกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ในทันที โดยในการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางในการป้องกันเครื่องจักรกลไฟฟ้าเมื่อต้องทำงานในระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุลสามารถที่จะวิเคราะห์จากทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร ทั้งนี้การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรก็จะ เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในอุปกรณ์การป้องกันของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำงานในสถานะที่ระบบไม่สมดุล

2.4 ค่าความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า

ค่าความไม่สมดุลของแรงดันหรือค่ากระแสไฟฟ้า(ในที่ยกตัวอย่างเป็นแรงดัน) ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส สามารถกำหนดค่าได้ 3 วิธีด้วยกันคือ

1 ตามมาตรฐานของ National Electrical Manufacturers Association (NEMA) จะคิดเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของระบบ โดยคำนวณจากค่าแรงดันไลน์ตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ Voltage Unbalance} &= \frac{\text{ค่าสูงสุดของผลต่างแรงดันไลน์กับค่าเฉลี่ยของแรงดันไลน์}}{\text{ค่าเฉลี่ยของแรงดันไลน์}} \times 100\% \\ &= \frac{\text{Max} \left[\left| V_{ab} - V_{Lavg} \right|, \left| V_{bc} - V_{Lavg} \right|, \left| V_{cd} - V_{Lavg} \right| \right]}{V_{Lavg}} \times 100\% \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\text{เมื่อ } V_{Lavg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (2.14)$$

ยกตัวอย่างเช่น $V_{ab} = 380V, V_{bc} = 390V, V_{ca} = 375V,$
 ค่าเฉลี่ยของแรงดันไลน์ $= \frac{380 + 390 + 375}{3} = 381.67 \text{ V.}$
 ค่าสูงสุดของแรงดันไลน์จากค่าเฉลี่ยของแรงดัน $= 8.33 \text{ V.}$
 เพราะฉะนั้นเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดัน $= \frac{8.33}{381.67} \times 100\% = 2.81 \%$

2 ตามมาตรฐานของ IEEE Std 141-1993 จะคิดเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของระบบ โดยคำนวณจากค่าแรงดันในแต่ละเฟสตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ Voltage Unbalance} &= \frac{\text{ค่าสูงสุดของผลต่างแรงดันเฟสกับค่าเฉลี่ยของแรงดันเฟส}}{\text{ค่าเฉลี่ยของแรงดันเฟส}} \times 100\% \\ &= \frac{\text{Max} \left[\left| V_a - V_{Pavg} \right|, \left| V_b - V_{Pavg} \right|, \left| V_c - V_{Pavg} \right| \right]}{V_{Pavg}} \times 100\% \end{aligned} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } V_{Pavg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (2.16)$$

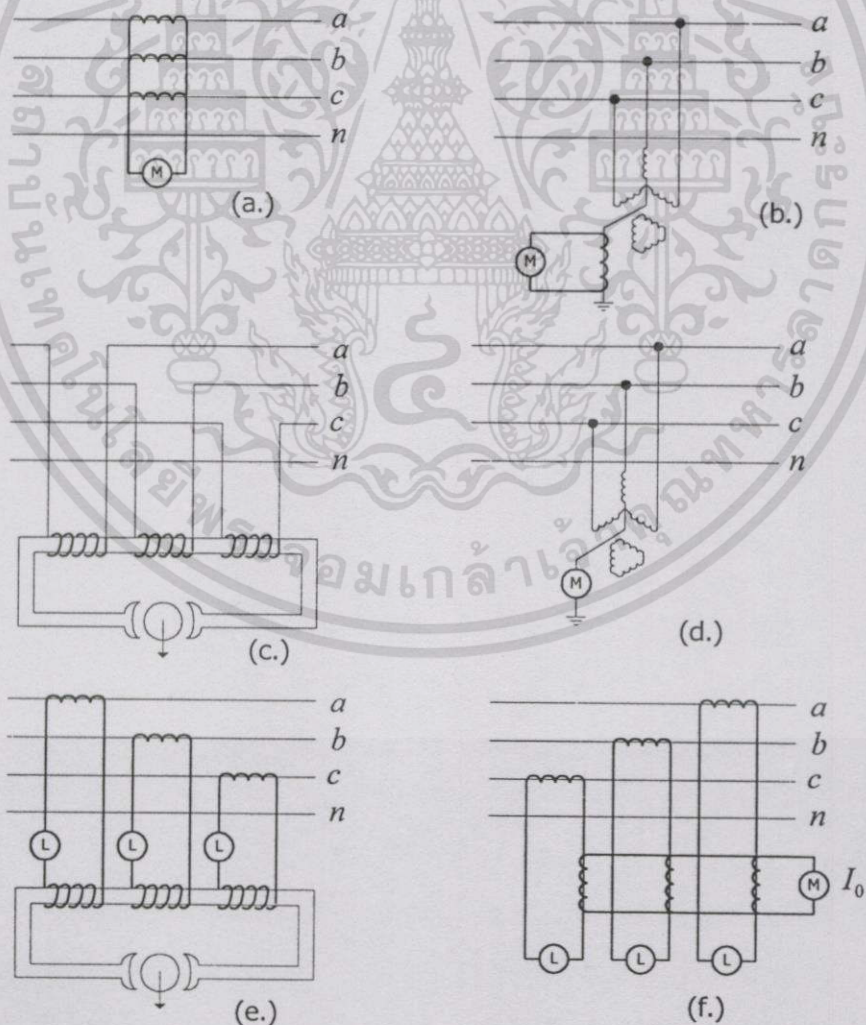
3 กำหนดจากทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรของแรงดันหรือกระแส[1] ดังสมการ

$$\% \text{ Voltage Unbalance or Unbalance level} = \frac{\text{Negative - Sequence Voltage}}{\text{Positive - Sequence Voltage}} \times 100\% \quad (2.17)$$

$$= \frac{V_2}{V_1} \times 100\% \quad (2.18)$$

2.5 การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตร

ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่าง ๆ สามารถหาได้จากการคำนวณวงจรสมมูลลำดับต่าง ๆ ของวงจรไฟฟ้า (Sequence Network) ซึ่งในวงจรสมมูลนี้จะประกอบไปด้วยค่าอิมพีแดนซ์ลำดับต่าง ๆ (Sequence Impedance) ของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบ ซึ่งในทางปฏิบัติค่อนข้างจะยุ่งยากใน



รูปที่ 2.4 การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณเพราะวงจรไฟฟ้าที่ใช้งานจริงมีโหลดต่อใช้งานอยู่อย่างซับซ้อน และมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา C.F.Wagner และ R.D.Evans ได้ให้แนวทางในการสร้างเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่าง ๆ โดยใช้อุปกรณ์พาสซีฟ(RLC)และกัลวานอมิเตอร์[1] ซึ่งต่อมาก็ได้ประยุกต์ใช้การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรในอุปกรณ์ป้องกันกระแสองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับลบ(Negative Over Current Relay) สำหรับป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าในกรณีที่ทำงานในสถานะที่ระบบไฟฟ้าไม่สมดุล

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะแนวทางในการสร้างเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสของ C.F.Wagner และ R.D.Evans เท่านั้น

2.5.1 การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับศูนย์

ค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับศูนย์ สามารถกำหนดได้จากค่าเฟสเซอร์ของกระแสไลน์ดังสมการ

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.19) ข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับศูนย์สามารถวัดค่าได้จากแอมป์มิเตอร์ โดยคุณสมบัตินี้หนึ่งในสามของกระแสไลน์ ดังรูป 2.4 {(a),(c),(e) และ (f)} หรือวัดค่ากระแสนิวทรัล(neutral) หรือกราวด์(ground) ดังรูป 2.4 {(b) และ (d)}

2.5.2 การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับบวกและลำดับลบ

ค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับบวก สามารถกำหนดได้จากค่าเฟสเซอร์ของกระแสไลน์ดังสมการ

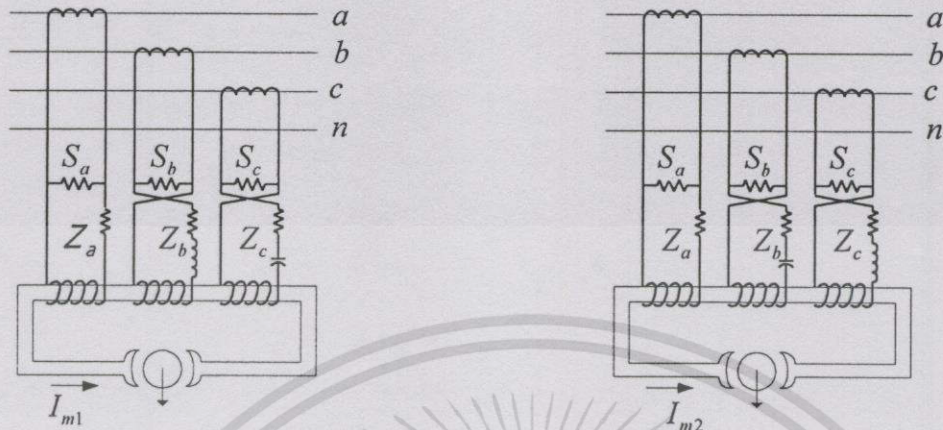
$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (2.20)$$

เช่นเดียวกันค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับลบ ก็กำหนดได้จากค่าเฟสเซอร์ของกระแสไลน์ดังสมการ

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.20) จะเห็นได้ว่าการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับบวก ต้องหาผลรวมของกระแสในเฟส a, เฟส b และเฟส c โดยให้กระแสแต่ละเฟส ต้องมีมุมต่างเฟสเลื่อนไปจากเดิมเป็น $0^\circ, 120^\circ$ และ 240° ในเฟส a, เฟส b และเฟส c ตามลำดับ จากรูป 2.5(a)

แสดงให้เห็นแนวทางในการสร้างเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับบวก ที่ใช้การคำนวณค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$\frac{S_b}{Z_a + S_b} = \frac{S_a}{Z_a + S_a} e^{-j60^\circ}$ $\frac{S_b}{Z_a + S_b} = \frac{S_a}{Z_a + S_a} e^{+j60^\circ}$ $\frac{S_a}{Z_a + S_a} = Ke^{j0^\circ}$ $\frac{S_b}{Z_b + S_b} = Ke^{-j60^\circ}$ $\frac{S_c}{Z_c + S_c} = Ke^{j60^\circ}$	$\frac{S_b}{Z_a + S_b} = \frac{S_a}{Z_a + S_a} e^{+j60^\circ}$ $\frac{S_c}{Z_c + S_c} = \frac{S_a}{Z_a + S_a} e^{-j60^\circ}$ $\frac{S_a}{Z_a + S_a} = Ke^{j0^\circ}$ $\frac{S_b}{Z_b + S_b} = Ke^{j60^\circ}$ $\frac{S_c}{Z_c + S_c} = Ke^{-j60^\circ}$
--	--

(a) positive sequence

(b) negative sequence

รูปที่ 2.5 การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกและลำดับลบ

ค่าอิมพีแดนซ์จากอุปกรณ์พาสซีฟ มาช่วยในการเลื่อนเฟสของกระแส ซึ่งจากวงจรของเครื่องมือวัด จะได้ว่าค่ากระแสที่ทำให้เกิดการแสดงผลของกัลวานอมิเตอร์ (I_{m1}) ดังสมการ

$$I_{m1} = \frac{S_a}{Z_a + S_a} I_a - \frac{S_b}{Z_b + S_b} I_b - \frac{S_c}{Z_c + S_c} I_c \quad (2.22)$$

เมื่อ Z_a, Z_b, Z_c เป็นค่าอิมพีแดนซ์ภายในของมิเตอร์ (ใช้ในการเลื่อนเฟส) เฟส a , เฟส b และเฟส c ตามลำดับ

S_a, S_b, S_c เป็นค่าอิมพีแดนซ์ขยายย่านการวัด

ในการวิเคราะห์วงจรการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรนี้ ผลของค่ามิวชวลอินดักแตนซ์ ระหว่างขดลวดมิเตอร์ในแต่ละเฟสจะไม่ทำการพิจารณา เพราะว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Z_a, Z_b, Z_c จากสมการ (2.22) สามารถจัดสมการได้ใหม่ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{m1} = K_a I_a - K_b I_b - K_c I_c \quad (2.23)$$

เมื่อ K_a, K_b, K_c เป็นสัมประสิทธิ์ของ I_a, I_b, I_c ตามลำดับ

ทำการเปรียบเทียบสมการ (2.22) กับ(2.23) ในการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก จะได้ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ K_a, K_b, K_c ดังนี้

$$K_a = K \quad (2.24)$$

$$K_b = -aK = Ke^{-j60^\circ} \quad (2.25)$$

$$K_c = -a^2K = Ke^{j60^\circ} \quad (2.26)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่ใดๆ ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าการออกแบบเครื่องม้าวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับบวกให้มีประสิทธิภาพตามรูปวงจรที่ 2.5(a) คือ

1. คุณสมบัติของ C.T. (Current Transformer) ต้องมีเหมือนกันทั้ง 3 เฟส
2. ค่ากระแสในขดลวดกัลวานอมิเตอร์เฟส a ต้องมีเฟสตรงกัน (inphase) กับค่ากระแสในไลน์เฟส a , ค่ากระแสในขดลวดกัลวานอมิเตอร์เฟส b ต้องมีเฟสล้าหลัง (lag) กับค่ากระแสในไลน์เฟส b อยู่ 60° และค่ากระแสในขดลวดกัลวานอมิเตอร์เฟส c ต้องมีเฟสนำหน้า (lead) กับค่ากระแสในไลน์เฟส c อยู่ 60° โดยคำนวณหาอิมพีแดนซ์ในเฟสต่างๆอย่างเหมาะสมดังสมการ(2.24),(2.25),(2.26)

สำหรับการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสลำดับลบ จากสมการ(2.21) ก็จะพิจารณาได้เช่นเดียวกันกับการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก โดยจากสมการ (2.22) เมื่อเป็นการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบจะได้สมการดังนี้

$$I_{m2} = K_a I_a - K_b I_b - K_c I_c \quad (2.27)$$

$$K_a = K \quad (2.28)$$

$$K_b = -a^2K = Ke^{j60^\circ} \quad (2.29)$$

$$K_c = -aK = Ke^{-j60^\circ} \quad (2.30)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ในส่วน Z_b, S_b และ Z_c, S_c ก็จะสลับกันดังรูปวงจร 2.5(b)

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดไม่สมดุลขึ้น จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า 3 เฟสที่ต่อใช้งานอยู่ โดยเฉพาะเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟสซึ่งเราสามารถวิเคราะห์ระบบไม่สมดุลและผลกระทบโดยใช้วิธีองค์ประกอบสมมาตร เพราะฉะนั้นการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรจึงมีความสำคัญในการศึกษาระบบไม่สมดุล โดยเฉพาะการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสซึ่งมีผลกับการสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส ในบทต่อไปจะกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงหลักการของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรจากการประมวลผลในรูปแบบของสัญญาณ
ดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการออกแบบเครื่องวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของ กระแสไฟฟ้า

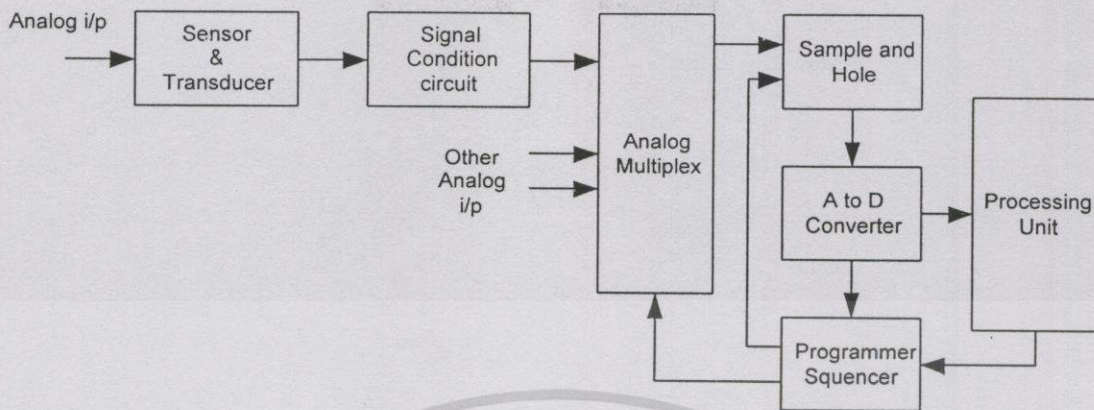
การวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสในระบบไฟฟ้า จากแนวคิดของ C.F.Wagner และ R.D.Evans โดยใช้อุปกรณ์ฟาสซิส (R,L,C) ทำหน้าที่ในการเลื่อนเฟส (Phase Shifts) ของเฟสเซอร์กระแสในแต่ละเฟส ตามสมการหาค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดจากสาเหตุต่าง ๆ อาทิเช่น ปัญหาสัญญาณกระแสมีฮาร์มอนิก, อุณหภูมิแวดล้อมในขณะทำการวัด เป็นต้น ดังนั้นในการพัฒนาการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงนำหลักการวัดในรูปแบบของการประมวลผลในรูปแบบสัญญาณดิจิทัล โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผลเพื่อหาค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ จากค่ากระแสของระบบไฟฟ้า 3 เฟส

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการนำข้อมูลเพื่อประมวลผล (Data Acquisition), หลักการของเครื่องมือวัด, หลักการและรายละเอียดการสร้างส่วนรับสัญญาณป้อนเข้าของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแส

3.1 ทฤษฎีการจัดเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผล (Data Acquisition)

การจัดเก็บข้อมูลทางกายภาพ (เช่น อุณหภูมิ, ความดัน หรือ แรงดันไฟฟ้า ฯลฯ) โดยการรับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) หรืออุปกรณ์แปลงรูปของพลังงาน (Transducer) ซึ่งเป็นข้อมูลสัญญาณอะนาล็อกแล้วแปลงสัญญาณให้เป็นข้อมูลที่คอมพิวเตอร์สามารถนำไปประมวลผลและวิเคราะห์ต่อไปได้หรือรูปแบบของสัญญาณดิจิทัลนั่นเอง กระบวนการในการเชื่อมต่อระหว่างข้อมูลในรูปของสัญญาณอะนาล็อกกับการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ ในรูปของสัญญาณดิจิทัลที่กล่าวมาข้างต้นนี้เรียกว่าระบบการจัดเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผล (Data Acquisition System) ซึ่งสามารถแสดงดังบล็อกไดอะแกรมดังรูป 3.1 กระบวนการในการจัดเก็บข้อมูลด้านกายภาพแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การตรวจวัดสภาพตัวแปรทางกายภาพ (Analog Input) โดยอาศัยอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) หรืออุปกรณ์แปลงรูปของพลังงาน (Transducer)



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมระบบการจับเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผล

2. การปรับแต่งสัญญาณ (Signal Conditioning Circuit) คือ การนำสัญญาณที่เกิดจากการตรวจวัดของอุปกรณ์ตรวจจับหรืออุปกรณ์เปลี่ยนแปลงรูปของพลังงาน ซึ่งเป็นสัญญาณทางไฟฟ้ามาปรับแต่งให้เหมาะสมก่อนที่จะนำสัญญาณไปประมวลผล (ดังรูป 3.1) รูปแบบการปรับแต่งสัญญาณอาจจะประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

2.1 การบัฟเฟอร์สัญญาณ (Buffering) วงจรบัฟเฟอร์ใช้เป็นวงจรปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างสัญญาณอินพุตกับวงจรในส่วนต่างๆที่รับสัญญาณอินพุตไปประมวลผลต่อ

2.2 การกรองสัญญาณ (Filtering) ในสภาวะการทำงานจริงการประมวลผลสัญญาณอาจผิดพลาดไปได้ เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนปะปนเข้ามาพร้อมกับสัญญาณที่เราสนใจ จึงมีความจำเป็นต้องมีวงจรที่ใช้ป้องกันสัญญาณรบกวนหรือวงจรกรองความถี่ อาทิเช่น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter) , วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass Filter) หรือ วงจรกรองเฉพาะย่านความถี่ (Band-pass Filter)

2.3 การเปลี่ยนระดับสัญญาณ (Signal Level Change) เป็นส่วนในการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันหรือขนาดของสัญญาณให้เหมาะสมต่อการใช้งาน อาจจะใช้วงจรลดทอน หรือ วงจรขยายสัญญาณ

2.4 การเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณ (Signal Conversion) ใช้ปรับเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประมวลผล

2.5 การปรับแต่งให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) เป็นส่วนที่แก้ไขการไม่เป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับ หรืออุปกรณ์เปลี่ยนแปลงรูปพลังงานให้กลับมาเป็นเชิงเส้น

3. การเปลี่ยนสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Conversion) คือส่วนที่ทำการแปลงสัญญาณจากส่วนการปรับแต่งสัญญาณซึ่งเป็นสัญญาณอะนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อจะได้นำสัญญาณในรูปแบบดิจิทัลเข้าเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์เพื่อ

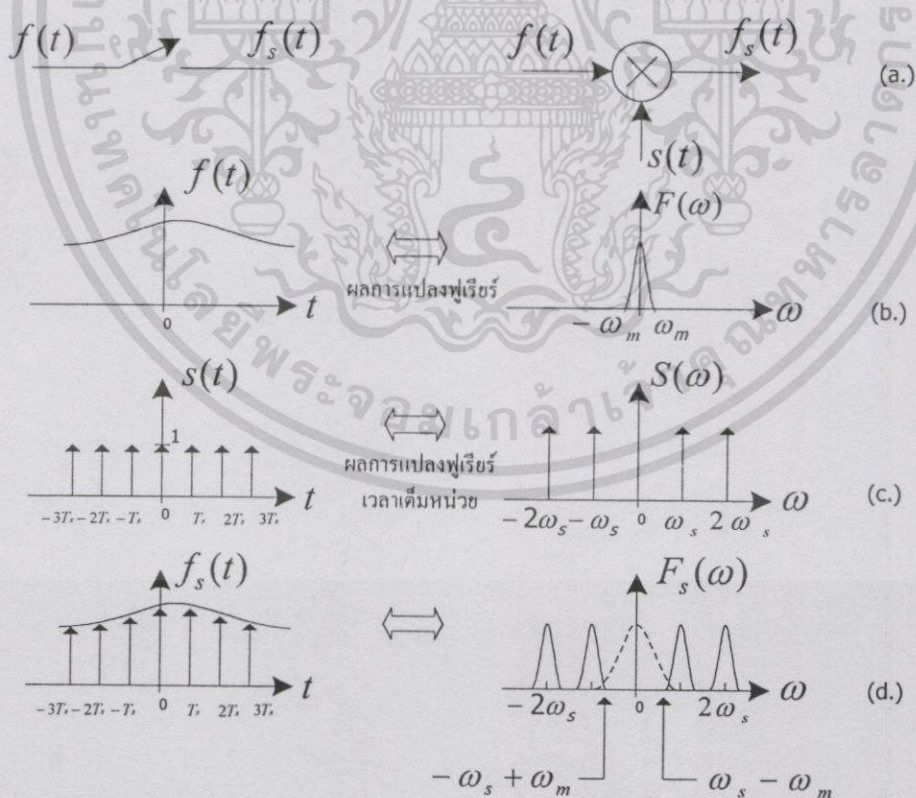
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมวลผลต่อไป ข้อกำหนดที่สำคัญในทางปฏิบัติสำหรับการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลก็คือ

3.1 ความละเอียดของการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล (Resolution) จะบ่งบอกได้จากจำนวนบิตของค่าดิจิทัล ถ้าจำนวนบิตยิ่งมากค่าดิจิทัลก็จะสามารถแทนรายละเอียดของสัญญาณอะนาล็อกได้ละเอียดมากเช่นกัน

3.2 อัตราการซ้กข้อมูล (Sampling Rate) หรือความถี่การซ้กข้อมูล เป็นค่าที่บ่งบอกว่ากระบวนการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล นั้นสามารถแปลงข้อมูลของสัญญาณอะนาล็อกได้อย่างครบถ้วน คือ ยังมีอัตราการซ้กข้อมูลมากเท่าใด ก็จะยังสามารถแสดงข้อมูลของสัญญาณอะนาล็อกได้แม่นยำมากขึ้นเท่านั้น ทฤษฎีที่สำคัญที่จะบอกว่าควรใช้อัตราการซ้กข้อมูลเท่าไรจึงจะเพียงพอที่จะสามารถแปลงข้อมูลของสัญญาณอะนาล็อกได้อย่างครบถ้วนคือทฤษฎีบทการซ้กข้อมูล(Sampling Theorem)

3.2.1 ทฤษฎีบทการซ้กข้อมูล (Sampling Theorem) ถ้าสัญญาณเวลาต่อเนื่องหรือสัญญาณอะนาล็อก $f(t)$ เป็นสัญญาณแถบความถี่จำกัด (Band-limited Signal) คือเป็นสัญญาณที่มีองค์ประกอบเชิงความถี่เฉพาะความถี่ในย่านหนึ่ง รอบ ๆ $\omega = 0$ เท่านั้น ดังแสดงในรูป 3.2 (b) กล่าวคือ $F(\omega)$ จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ $|\omega| > \omega_m$ หรือสัญญาณมีความถี่ไม่เกิน f_m



รูปที่ 3.2 ทฤษฎีการซ้กข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(เมื่อ $\omega_m = 2\pi f_m$) เมื่อทำการซัดข้อมูลอย่างสม่ำเสมอ โดยมีคาบการซัดข้อมูล T_s จะทำให้ได้สัญญาณเวลาเต็มหน่วย(ลำดับข้อมูล)หรือสัญญาณที่ได้จากการซัดข้อมูล $f_s(t) = f(NT_s)$ โดยที่สัญญาณเวลาเต็มหน่วย $f_s(t)$ จะมีข้อมูลทั้งหมดของสัญญาณ $f(t)$ อยู่ครบเมื่อองค์ประกอบเชิงความถี่ของ $f_s(t)$ หรือสเปกตรัม $F_s(\omega)$ ไม่เกิดการเหลื่อมล้ำขององค์ประกอบสเปกตรัมที่ติดกัน (ดังรูปที่ 3.2 d.) กล่าวคือ

$$\omega_s - \omega_m \geq \omega_m$$

$$\omega_s \geq 2\omega_m$$

หรือจะกล่าวได้ว่า

$$f_s \geq 2f_m \quad (3.1)$$

เพราะฉะนั้นความถี่ในการซัดข้อมูลจะต้องสูงกว่า 2 เท่าของความถี่สัญญาณอะนาล็อกที่ต้องการนำมาประมวลผล จึงจะได้ลำดับที่มีข้อมูลในการซัดตัวอย่างครบถ้วน และถ้าทำการซัดข้อมูลในอัตราการซัดข้อมูลที่ต่ำเกินไปจะทำให้ได้ลำดับที่มีข้อมูลของสัญญาณไม่ครบถ้วน เมื่อหาองค์ประกอบเชิงความถี่ $F_s(\omega)$ จะทำให้เกิดการเหลื่อมล้ำของสเปกตรัมที่ติดกันทำให้รูปร่างของสเปกตรัมผิดไปดังรูปที่ 3.2(d) (สเปกตรัมที่แสดงด้วยเส้นประ) และถ้ามีสัญญาณความถี่สูงกว่า $\omega_s - \omega_m$ ปะปนเข้ามากับสัญญาณที่เราสนใจก็จะทำให้การซัดข้อมูลตัวอย่างไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นหรือเกิดการเหลื่อมล้ำขององค์ประกอบสเปกตรัมที่ติดกัน ดังนั้นในทางปฏิบัติจะมีวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) เพื่อป้องกันสัญญาณความถี่สูงที่อาจทำให้ข้อมูลในการซัดตัวอย่างผิดพลาดไป ซึ่งในการออกแบบวงจรความถี่ต่ำผ่านจะเป็นไปตามเงื่อนไข 2 ข้อ คือ

1. วงจรกรองนี้จะไม่ลดทอนองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า ω_m เมื่อ ω_m คือช่วงความถี่สูงสุดขององค์ประกอบสัญญาณที่เราสนใจ
2. เพื่อป้องกันสัญญาณความถี่สูงที่อาจทำให้ข้อมูลในการซัดตัวอย่างผิดพลาด วงจรกรองจะต้องลดทอนองค์ประกอบสัญญาณที่มีความถี่ $|\omega| \geq \omega_s - \omega_m$

กล่าวโดยสรุปว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่เหมาะสมจะต้องมีคุณสมบัติ ดังสมการ

$$\omega_m \leq \omega_c \leq \omega_s - \omega_m \quad (3.2)$$

เมื่อ ω_c = ความถี่ในการคัตออฟของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากทฤษฎีการจับเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผล (Data Acquisition) ที่กล่าวมาข้างต้น ก็จะเป็นเงื่อนไขในการออกแบบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า โดยที่เครื่องมือวัดได้ประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล จากการซัดข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้าของระบบ ซึ่งจะกล่าวหลักการออกแบบเครื่องมือวัดโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 หลักการของเครื่องวัดองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

จากสมการในการประมวลผล เพื่อหาค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าการคำนวณต้องพิจารณาในรูปของเฟสเซอร์สัญญาณกระแสคือขนาดของสัญญาณกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส และมุมต่างเฟสของสัญญาณกระแส ซึ่งการประมวลผลสามารถวิเคราะห์ได้ตามสมการดังนี้

$$\text{จาก } I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (3.3)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (3.4)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (3.5)$$

ให้กระแสในเฟส a เป็นจุดอ้างอิง จะได้ว่า $I_a \angle 0^\circ$, $I_b \angle \theta_1$, $I_c \angle \theta_2$

เมื่อ $\theta_1 =$ มุมต่างเฟสระหว่างเฟส a กับเฟส b

$\theta_2 =$ มุมต่างเฟสระหว่างเฟส a กับเฟส c

จากรูปแบบของโพลาร์ (Polar form)

$$R \angle \theta = R \cos \theta + jR \sin \theta$$

เพราะฉะนั้น สมการที่ (3.3), (3.4) และ (3.5) จะได้ว่า

$$I_{a0} = \frac{1}{3}[(I_a + I_b \cos \theta_1 + I_c \cos \theta_2) + j(I_b \sin \theta_1 + I_c \sin \theta_2)] \quad (3.6)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}[(I_a + I_b \cos \theta_{11} + I_c \cos \theta_{22}) + j(I_b \sin \theta_{11} + I_c \sin \theta_{22})] \quad (3.7)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}[(I_a + I_b \cos \theta_{12} + I_c \cos \theta_{21}) + j(I_b \sin \theta_{12} + I_c \sin \theta_{21})] \quad (3.8)$$

$$\text{เมื่อให้ } \theta_{11} = \theta_1 + \frac{2\pi}{3}$$

$$\theta_{12} = \theta_1 + \frac{4\pi}{3}$$

$$\theta_{21} = \theta_2 + \frac{2\pi}{3}$$

$$\theta_{22} = \theta_2 + \frac{4\pi}{3}$$

จากความสัมพันธ์

$$|A + jB| = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (3.9)$$

เพราะฉะนั้น

$$|I_{a0}| = \frac{1}{3} \sqrt{(I_a + I_b \cos \theta_1 + I_c \cos \theta_2)^2 + (I_b \sin \theta_1 + I_c \sin \theta_2)^2} \quad (3.10)$$

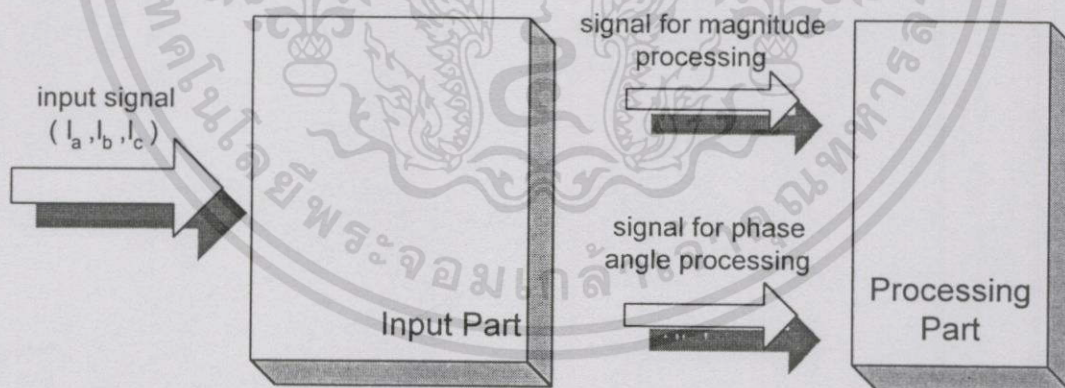
$$|I_{a1}| = \frac{1}{3} \sqrt{(I_a + I_b \cos \theta_{11} + I_c \cos \theta_{22})^2 + (I_b \sin \theta_{11} + I_c \sin \theta_{22})^2} \quad (3.11)$$

$$|I_{a2}| = \frac{1}{3} \sqrt{(I_a + I_b \cos \theta_{12} + I_c \cos \theta_{21})^2 + (I_b \sin \theta_{12} + I_c \sin \theta_{21})^2} \quad (3.12)$$

$$\%ub = \frac{|I_{a2}|}{|I_{a1}|} \times 100\% \quad (3.13)$$

จากสมการ (3.10),(3.11),(3.12) แสดงขนาดของกระแสองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก, กระแสองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ, กระแสองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ ที่อยู่ในเทอมของเฟสเซอร์ของกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสและสมการ(3.13) แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้า

เพราะฉะนั้นการจัตุสร้างเครื่องวัดค่าองค์ประกอบสมมาตร จะทำการออกแบบเพื่อนำค่าเฟสเซอร์ของกระแสในแต่ละเฟส (ขนาดและมุมต่างเฟสของสัญญาณกระแส) มาทำการประมวลผลตามสมการ (3.10),(3.11),(3.12) และ (3.13) การศึกษาเพื่อออกแบบเครื่องมือวัดจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่(ดังรูปที่ 3.3) ดังนี้



รูปที่3.3 บล็อกไดอะแกรมหลักการของเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตร

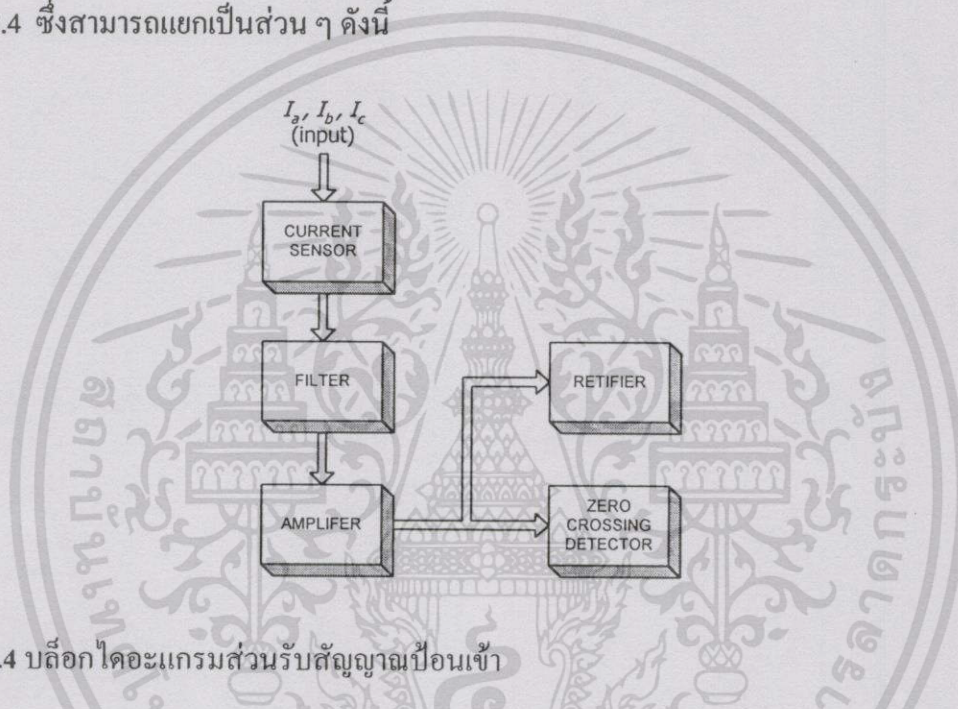
1. ส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า (Input Part) จะเป็นส่วนที่รับค่าสัญญาณกระแสจากระบบไฟฟ้าแล้วแปลงค่าสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะส่งไปประมวลผล (Signal Conditioning Circuit) การออกแบบในส่วนรับสัญญาณป้อนเข้าจะให้เอาท์พุทออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1. สัญญาณกระแสเพื่อประมวลผลหาขนาดของกระแสในแต่ละเฟส และส่วนที่ 2. สัญญาณการเริ่มต้นของกระแสในแต่ละเฟสเพื่อประมวลผลหาค่ามุมต่างเฟสของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ส่วนประมวลผล (Processing Part) จะเป็นส่วนที่รับสัญญาณเอาท์พุทจากส่วนรับสัญญาณป้อนเข้ามาประมวลผลเพื่อหาค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าในลำดับต่าง ๆ ในส่วนประมวลผลจะประยุกต์ใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นตัวทำหน้าที่ในการประมวลผลโดยทำการเขียนโปรแกรม เพื่อประมวลผลตามสมการ (3.10),(3.11), (3.12) และ (3.13)

3.3 ส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า (Input Part)

การออกแบบส่วนรับสัญญาณป้อนเข้าในแต่ละเฟส สามารถแสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรม รูปที่ 3.4 ซึ่งสามารถแยกเป็นส่วน ๆ ดังนี้



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า

3.3.1 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส (Current Sensor)

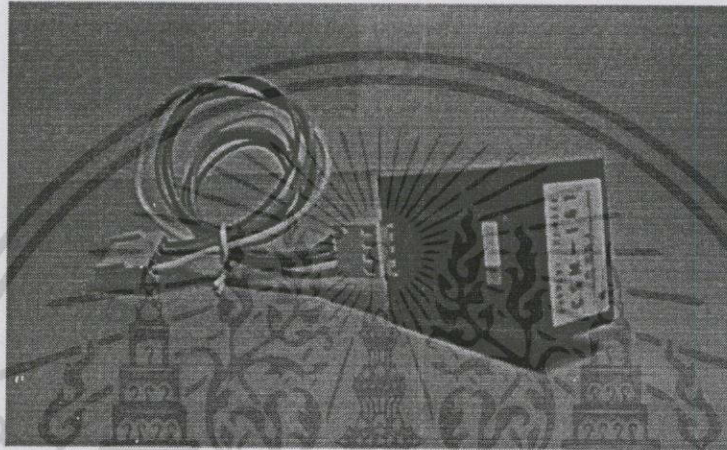
อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส จะทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณกระแสในแต่ละเฟส แล้วเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกัน ในการวิจัยเครื่องมือวัดนี้จะเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแสแบบ Hall Device ซึ่งมีข้อดีดังนี้

1. สามารถเปลี่ยนสัญญาณกระแสเป็นสัญญาณแรงดันที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกัน
2. การเปลี่ยนแปลงสัญญาณมีความเป็นเชิงเส้น (linearity)
3. ย่านตอบสนองความถี่ในการใช้งานกว้าง (response frequency band)

อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแสแบบ Hall Device ที่เลือกใช้เป็นรุ่น CSM -161 แสดงดังรูปที่ 3.5 มีพิกัดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพิกัดอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส(Hall Device Model CSM-161)

Rated detected current	75 A _{peak}
Rated output voltage	4 V _{peak} ± 3.5%
Frequency	DC -30 KHz
Linearity	1 Max (%/F.S)



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส (Model CSM -161)

การทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแสเพื่อหาค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนในการแปลงสัญญาณสามารถทำได้โดยการจ่ายกระแสผ่านอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแสและทำการวัดค่าแรงดันที่เอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส ซึ่งในการออกแบบเครื่องมือวัดจะทำการพันขดลวดทางด้านอินพุตของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแสเป็น 10 รอบ จึงทำให้อัตราส่วนในการแปลงสัญญาณเป็น $7.5A_{peak} / 4V_{peak} = 1.875$ ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลการทดสอบดังตารางที่ 3.2 และกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส [$V_{o/p}(m)$] กับค่าแรงดันเอาต์พุตจากการคำนวณ [$V_{o/p}(c)$] รูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส(Hall Device Model CSM-161)

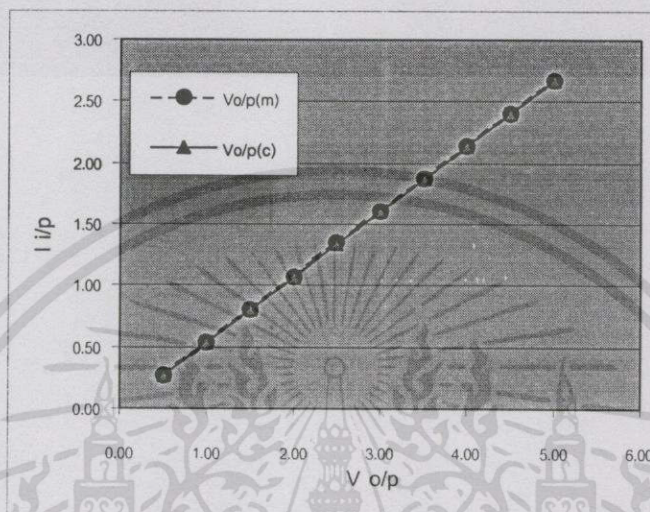
Current Input (A.) $I_{i/p}$	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	
Voltage Output(V.)	$V_{o/p}(m)$	0.265	0.534	0.804	1.073	1.345	1.602	1.870	2.130	2.400	2.666
	$V_{o/p}(c)$	0.267	0.533	0.800	1.067	1.333	1.600	1.867	2.133	2.400	2.667
% error	0.62	-0.13	-0.50	-0.59	-0.88	-0.13	-0.18	0.16	0.00	0.02	

เมื่อ $I_{i/p}$ = กระแสด้านอินพุตของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส
 $V_{o/p}(m)$ = แรงดันด้านเอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{o/p}(c) = \frac{I_{i/p}}{\text{Ratio Current Sensor}}$$

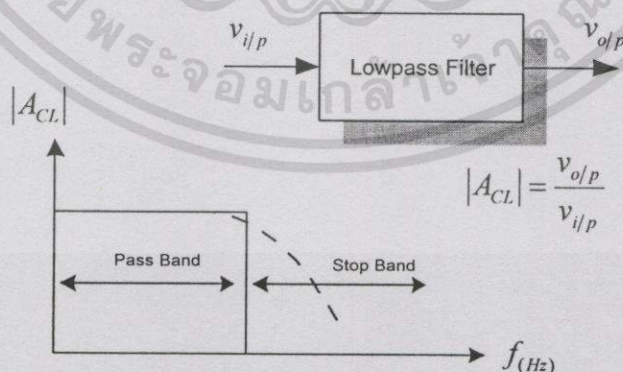
= แรงดันจากการคำนวณทางด้านเอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส $[V_{o/p}(m)]$ กับค่าแรงดันเอาต์พุตจากการคำนวณ $[V_{o/p}(c)]$

3.3.2 วงจรกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง (Active Lowpass Filter)

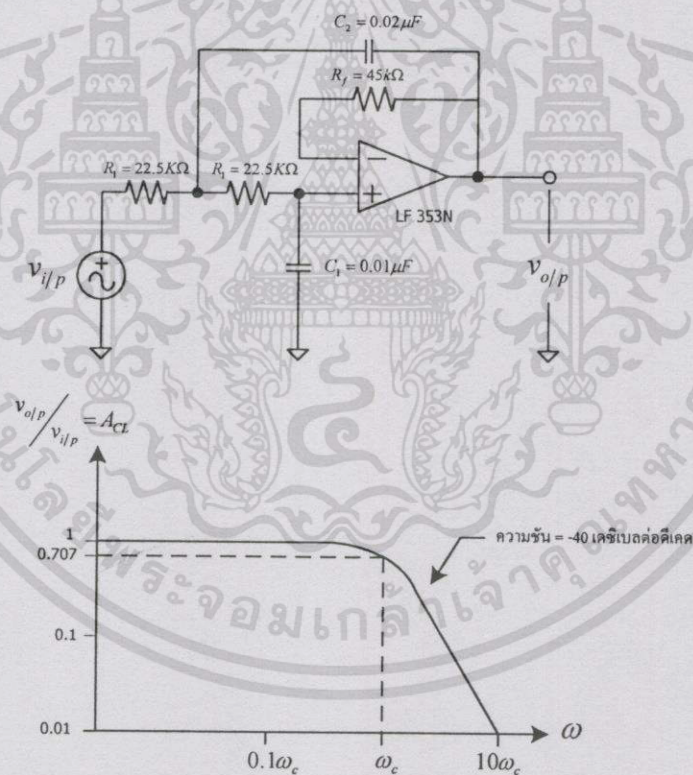
เนื่องจากสัญญาณรบกวนความถี่สูง อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการนำค่าสัญญาณไปประมวลผล ดังนั้นจึงต้องมีวงจรที่ใช้ในการลดทอนสัญญาณในช่วงที่ความถี่สูงมาช่วยกำจัดสัญญาณรบกวน คือวงจรแบบกรองความถี่ต่ำ (Active Lowpass Filter)



รูปที่ 3.7 การตอบสนองความถี่ของวงจรฟิลเตอร์แบบกรองความถี่ต่ำผ่าน

วงจรแบบกรองความถี่ต่ำ ยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดัน D.C ไปจนถึงความถี่คัตออฟ (Cut-Off Frequency) แทนด้วยเครื่องหมาย f_c ความถี่คัตออฟคือ ความถี่ ณ ที่อัตราขยายของวงจรมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของอัตราขยายปกติ ถ้ามีสัญญาณที่มีความถี่สูงเกิน f_c ผ่านวงจรจะลดทอนขนาดของสัญญาณความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมาก ๆ จากรูปที่ 3.7 เส้นทึบแสดงถึงผลในทางอุดมคติและเส้นประแสดงถึงผลของวงจรในทางความจริง ในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้เราเรียกว่า ช่วงผ่าน (Pass Band) และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่า ช่วงลดทอน (Stop Band)

ในการสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำ ในที่นี้เลือกใช้วงจรบัตเตอร์เวิร์ทแบบที่มีค่าความชันในการลดลงของอัตราขยายเป็น -40 เดซิเบล/เดคาเด ซึ่งมีความหมายว่า ในช่วงที่ความถี่มีค่าตั้งแต่ ω_c ขึ้นไป ค่าของอัตราขยายจะมีค่าลดลง 40 เดซิเบล ในขณะที่ความถี่เพิ่มขึ้น 10 เท่า ดังรูปที่ 3.8 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำบัตเตอร์เวิร์ทที่ให้ค่า -40 เดซิเบล/เดคาเด และกราฟการตอบสนองความถี่ของวงจรนี้



รูปที่ 3.8 วงจรกรองความถี่ต่ำบัตเตอร์เวิร์ทที่ให้ค่า -40 เดซิเบล/เดคาเด และกราฟการตอบสนองความถี่ของวงจรนี้

ขั้นตอนในการออกแบบวงจร เริ่มจากการกำหนดค่าความถี่คัตออฟ f_c เท่ากับ 500 Hz (ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขสมการ 3.2) จากนั้นจึงคำนวณหาค่า R_f จากสมการ

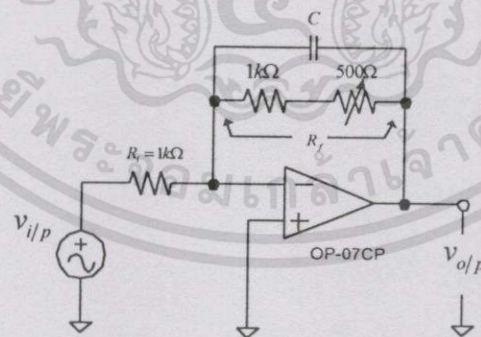
$$R_1 = \frac{0.707}{\omega_c C_1} \quad (3.14)$$

โดยกำหนดให้ค่า C เท่ากับ $0.01 \mu F$ เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{0.707}{\omega_c C_1} \\ &= \frac{0.707}{(6.28)(500)(0.01 \cdot 10^{-6})} \\ &= 22.5 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

3.3.3. วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

จากหัวข้อ 3.3.1 จะเห็นได้ว่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส (Current Sensor) มีพีคเพียง 4 V(peak) ในขณะที่ค่าระดับแรงดันอ้างอิงที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล (A to D Converter) ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่า 0 ถึง 5 V. ดังนั้นจึงต้องมีการขยายสัญญาณแรงดันเพิ่มขึ้น เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงดันอ้างอิงจากส่วนการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้วงจขยายสัญญาณ และอีกจุดประสงค์หนึ่งของการขยายสัญญาณก็เพื่อใช้ในการปรับแต่งขนาดของสัญญาณในการปรับเทียบ (Calibrate) กับเครื่องมือวัดมาตรฐาน



รูปที่ 3.9 วงจขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

จากรูปที่ 3.9 แสดงวงจขยายแบบกลับเฟส ซึ่งมีอัตราขยายแบบลูปปิด (A_{CL}) ดังสมการ

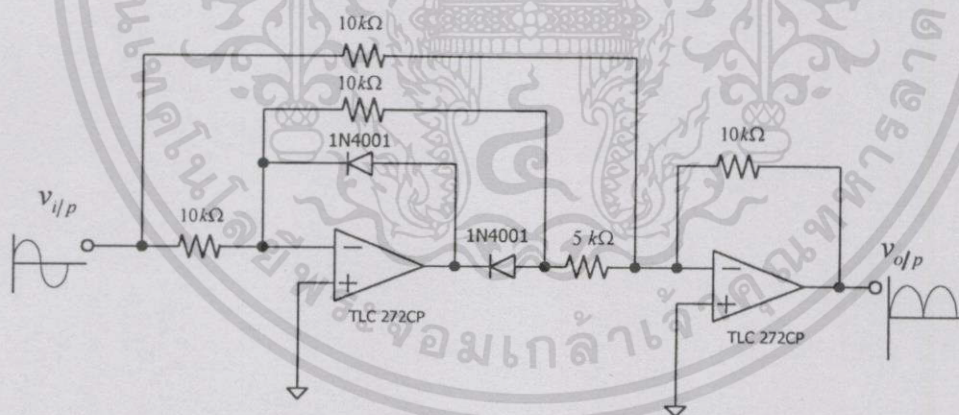
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 A_{CL} &= \frac{-V_o}{E_i} \\
 &= \frac{-R_f}{R_i}
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

ซึ่งอัตราขยายของวงจรจะขึ้นอยู่กับ R_f และ R_i เท่านั้น ในการออกแบบกำหนดอัตราขยายของวงจร (A_{CL}) เท่ากับ $1.25 (\pm 20 \%)$ และกำหนดค่า R_i เท่ากับ $1 \text{ K}\Omega$ ดังนั้นจึงคำนวณหาค่า R_f จากสมการ (3.15) ซึ่งจะได้ R_f เท่ากับ $1 \text{ K}\Omega - 1.5 \text{ K}\Omega$

3.3.4. วงจรแปลงสัญญาณเต็มรูปคลื่น (Full-wave rectifier)

ค่าระดับแรงดันอ้างอิงที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่า 0 ถึง +5 V. แต่สัญญาณกระแสจากไลน์ในแต่ละเฟสที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณจะมีระดับแรงดันอยู่ในย่าน -5 V. ถึง +5 V. คือเป็นสัญญาณฟังก์ชันไซน์ที่มีทั้งซีกบวกและลบ จากจุดนี้จึงใช้วงจรแปลงสัญญาณเต็มรูปคลื่นทำการเปลี่ยนระดับของสัญญาณกระแสให้อยู่ในระดับบวกเสมอ ดังรูป 3.10 แสดงวงจรแปลงสัญญาณเต็มรูปคลื่นและรูปสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจร สัญญาณเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณเต็มรูปคลื่นจะไปทำการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและจึงทำการประมวลผลเพื่อหาค่าขนาดของกระแสในแต่ละเฟสต่อไป

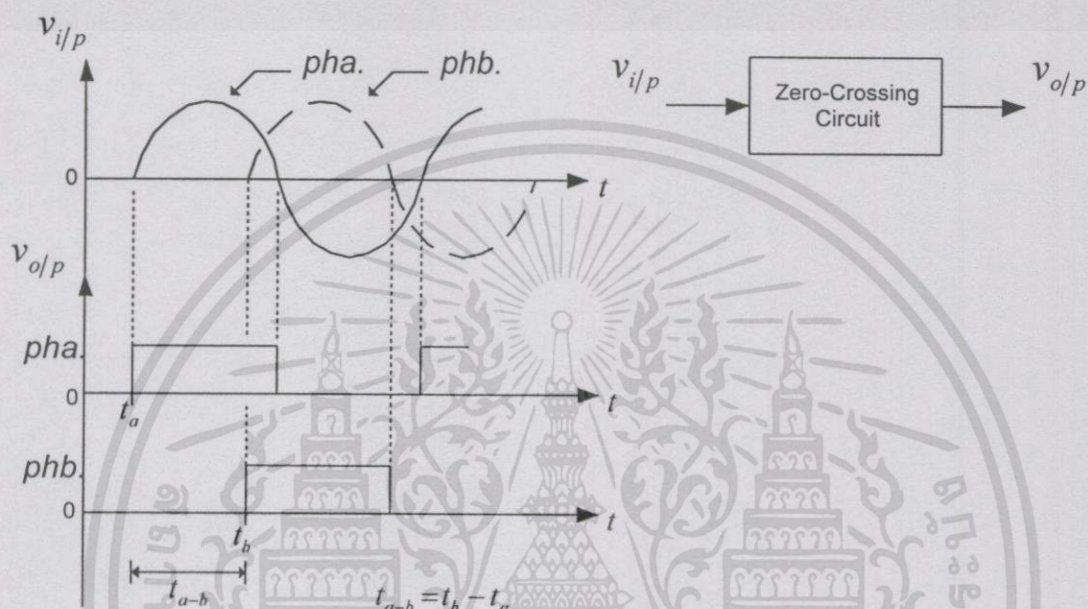


รูปที่ 3.10 วงจรแปลงสัญญาณเต็มรูปคลื่น

3.3.5. วงจรตรวจจับสัญญาณตัดผ่านศูนย์ (Zero-Crossing Detector)

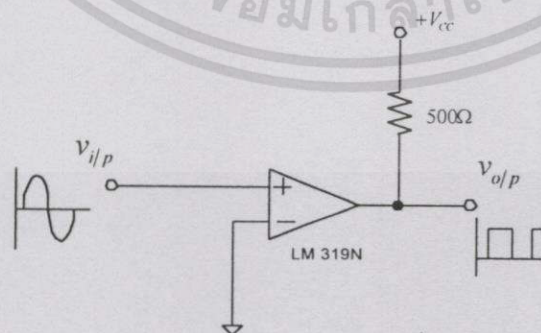
ในการหาค่ามุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่างเฟส a กับเฟส b และระหว่างเฟส a กับเฟส c นั้น จะใช้การประมวลผลจากการทำงานในภาคแคปเจอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องทำการรับสัญญาณการเริ่มต้นของกระแสในแต่ละเฟส และทำการหาค่าเวลาต่างเฟส โดยการเปรียบเทียบเวลาการเริ่มต้นของระดับสัญญาณกระแส

ระหว่างเฟส a กับเฟส b และระหว่างเฟส a กับเฟส c จากวงจรตรวจจับสัญญาณตัดผ่านศูนย์แล้ว จึงนำค่าเวลาต่างเฟสมาประมวลผลหามุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสดังรูป 3.11 แสดงหลักการหาค่าเวลาต่างเฟสจากสัญญาณของวงจรตรวจจับสัญญาณตัดผ่านศูนย์ และในการประมวลผลเพื่อหามุมต่างเฟสจะกล่าวรายละเอียดในบทต่อไป



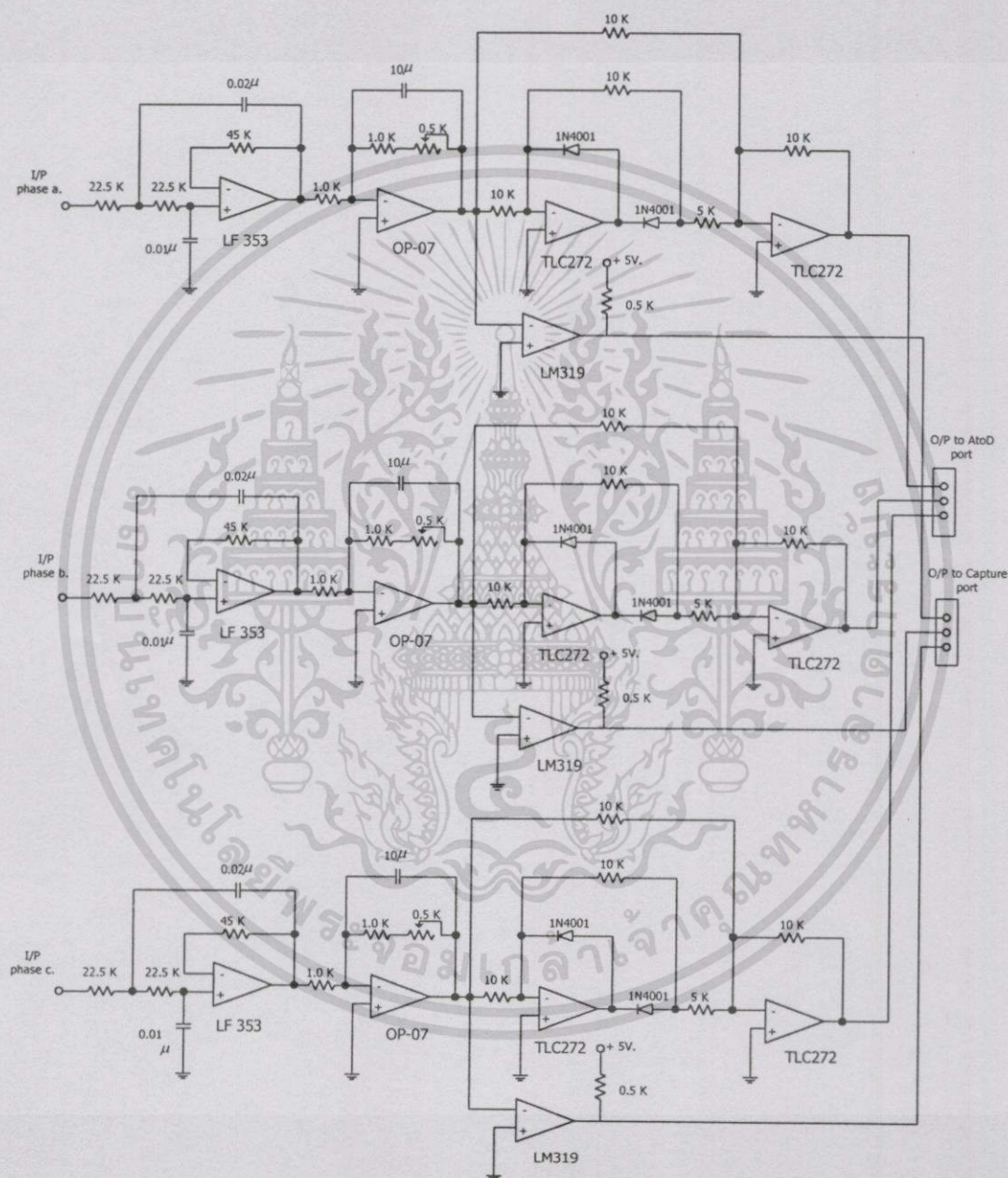
รูปที่ 3.11 หลักการหาค่าเวลาต่างเฟสระหว่างเฟส a กับเฟส b

วงจรที่ใช้ตรวจสอบการเริ่มต้นของระดับสัญญาณกระแสในแต่เฟส คือวงจรตรวจจับสัญญาณตัดผ่านศูนย์ ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็น 0 กับ 5 โวลต์ ซึ่งเป็นระดับสัญญาณดิจิตอล ในการออกแบบเลือกใช้ไอซีเบอร์ 319N เป็นไอซีคอมพาราเตอร์ความเร็วสูง

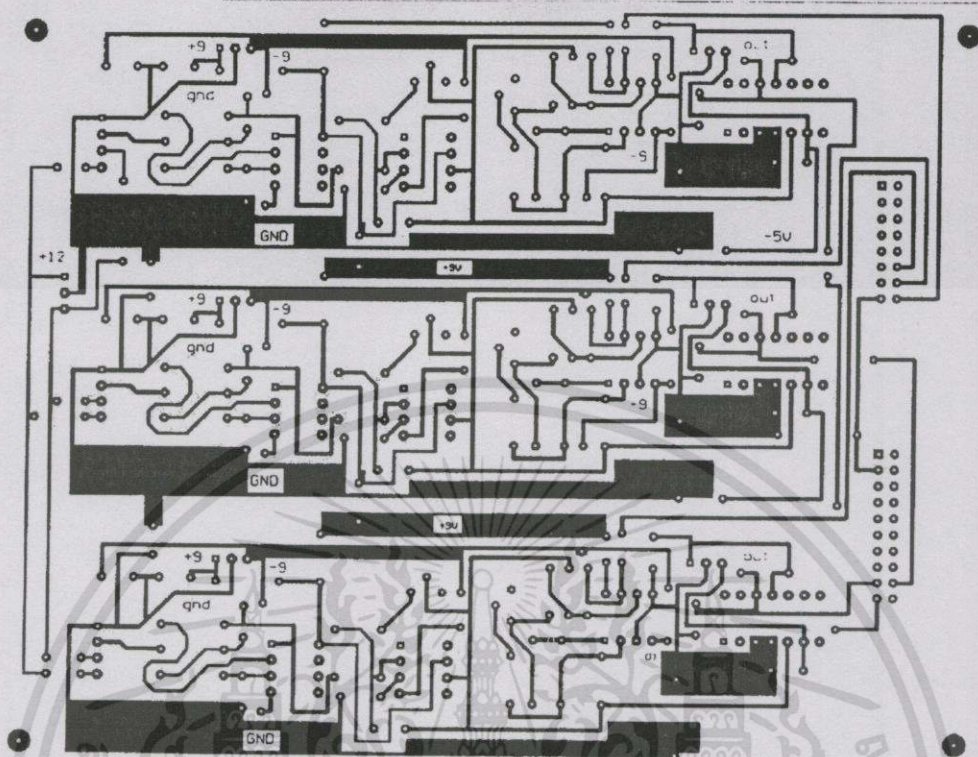


รูปที่ 3.12 วงจรตรวจจับการเริ่มต้นของสัญญาณ

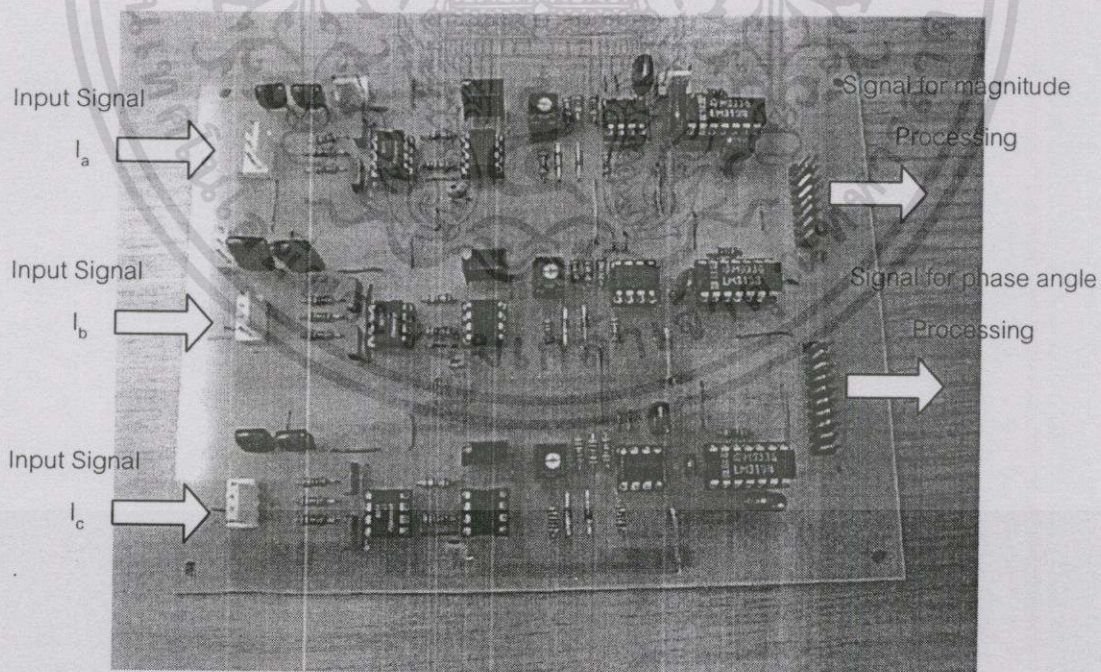
จากวงจรในส่วนต่างๆ ที่ได้ออกแบบดังกล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถเขียนเป็นวงจรรวมใน ส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า(Input part) ได้ดังรูปที่ 3.13 รูปลายทองแดงวงจรและการลงอุปกรณ์วงจร ส่วนรับสัญญาณป้อนเข้าแสดงดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ (รูปคลื่นสัญญาณอินพุตและเอาต์ พูทของวงจรส่วนรับสัญญาณป้อนเข้าแสดงดังภาคผนวกค.)



รูปที่ 3.13 วงจรส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า(Input part)



รูปที่ 3.14 ลายทองแดงวงจรส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า(Input part)



รูปที่ 3.15 การลงอุปกรณ์วงจรส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า(Input part)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเนื้อหาที่กล่าวมาทั้งหมดในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่าเป็นหลักการของเครื่องมือวัดและรายละเอียดในการออกแบบ , การจัดสร้างส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า (Input Part) หรือ วงจรการปรับแต่งสัญญาณ (Signal Conditioning Circuit) ตามหลักทฤษฎีการจับเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผล (Data Acquisition) ก่อนที่จะนำเอาสัญญาณกระแสทั้ง 3 เฟส ไปประมวลผลในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัล โดยการประมวลผลจะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ 80C535 ขนาด 8 บิต ทำการเขียนโปรแกรมประมวลผลตามสมการ(3.10),(3.11),(3.12) และ (3.13) เพื่อหาค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ ซึ่งในบทต่อไปก็จะกล่าวถึงแนวคิดและรายละเอียดในการออกแบบโปรแกรม สำหรับการประมวลผล



บทที่ 4

หลักการออกแบบโครงสร้างโปรแกรมประมวลผลค่า องค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

เครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่าง ๆ ของกระแสไฟฟ้าใช้การประมวลผลในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัล โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ SAB 80C535 ขนาด 8 บิต ทำหน้าที่ในการประมวลผล ส่วนประมวลผลจะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณเอาต์พุตจากส่วนรับสัญญาณป้อนเข้ามาทำการประมวลผลตามสมการ(3.10),(3.11),(3.12)และ(3.13)เพื่อหาค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ และค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้า ไมโครคอนโทรลเลอร์ SAB 80C535 มีคุณลักษณะการทำงานที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้เป็นส่วนประมวลผลของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรอยู่ 2 ประการ คือ

1. ภาคการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (A to D Converter) ซึ่งอาศัยรีจิสเตอร์พิเศษ (Special Function Register:SFR) ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล จึงทำให้ลดความยุ่งยากในการเชื่อมต่อและการควบคุม การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลกับอุปกรณ์ภายนอก

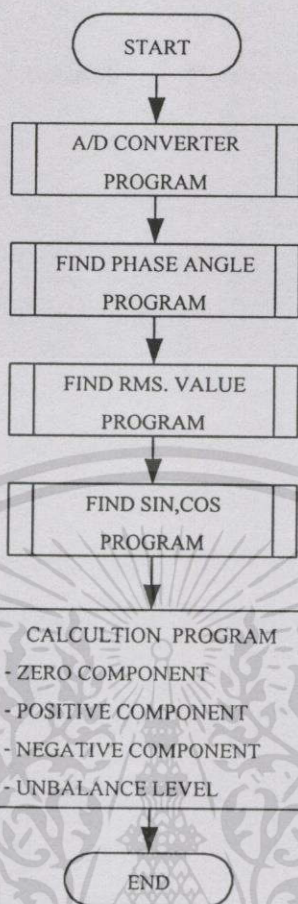
2. ภาคการทำงานแคปเจอร์และไทมเมอร์ (Capture/Timer Mode) ซึ่งถูกประยุกต์ใช้ในการรับสัญญาณการเริ่มต้นของกระแสในแต่ละเฟส และเก็บค่าเวลาต่างเฟสของสัญญาณเพื่อใช้ในการประมวลผลหาค่ามุมต่างเฟสของสัญญาณกระแส

ในบทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างโปรแกรมหลักของเครื่องมือวัด หลักการออกแบบโปรแกรมการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล(A to D Converter), โปรแกรมการหาค่ามุมต่างเฟส , โปรแกรมหาค่าประสิทธิภาพ(RMS.)ของสัญญาณกระแส, โปรแกรมการหาค่าฟังก์ชันตรีโกณมิติ(sin,cos)ของมุมต่างเฟส และ โปรแกรมในการประมวลผลค่าองค์ประกอบสมมาตร

4.1 โครงสร้างโปรแกรมหลักของเครื่องมือวัด

การเขียนโปรแกรมเพื่อประมวลผลค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ จากข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส มีโปรแกรมหลักในการประมวลผล แสดงดังโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 4.1 การเขียนโปรแกรมใช้ภาษาแอสเซมบลี (Assembly) ตามคู่มือการใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C535 [14-15] และทำการพัฒนาโปรแกรมการประมวลผลผ่านโปรแกรมโมนิเตอร์ (MON535) บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

โดยรายละเอียดโครงสร้างของโปรแกรมหลักแต่ละโปรแกรม ในการประมวลผลมีดังนี้



รูปที่ 4.1 โพลีชาร์ต โปรแกรมหลักการประมวลผล

4.2 โปรแกรมการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล

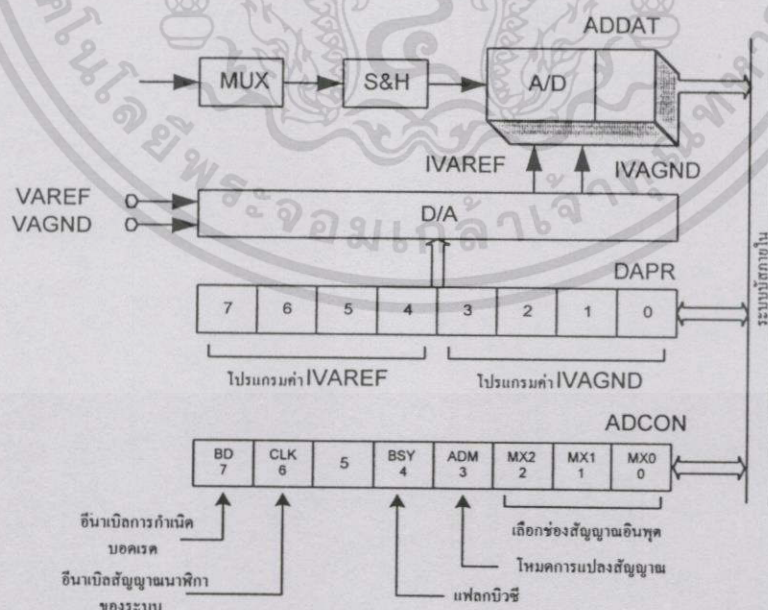
โปรแกรมแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล จะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณอะนาล็อกของสัญญาณกระแสจากวงจรแปลงสัญญาณเต็มรูปคลื่น (FullWave Rectifier) เป็นข้อมูลดิจิทัล โดยใช้โครงสร้างการทำงานในส่วนของ การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลร่วมกับการทำงานของไทเมอร์ 0 ในโหมดโหลดค่าใหม่ (Automatic Reload) ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งไทเมอร์ 0 จะเข้ามาเป็นฐานเวลาในการซั๊กข้อมูล (Sampling) จากผลลัพธ์ของกระบวนการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล

4.2.1 การทำงานการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C535

การควบคุมการทำงานของ การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล จะใช้รีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษ(SFR) 2 ตัว เป็นตัวควบคุมคือ

1. รีจิสเตอร์ ADCON (A-D Converter Control Register) เป็นรีจิสเตอร์หลักในการควบคุมการทำงานการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล หน้าที่การทำงานของแต่ละบิตใน ADCON จะถูกใช้งานแตกต่างกันออกไป(รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.2) โดยบิต 0,1 และ 2 ทำหน้าที่ในการควบคุมวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexer) เพื่อเลือกช่องสัญญาณอะนาล็อกที่จะนำมาประมวลผลในบิตที่ 3 ของรีจิสเตอร์ ADCON ทำหน้าที่กำหนดโหมดการทำงานการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล โดยถ้าให้บิตนี้มีค่าเป็น “0” กระบวนการการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลจะหยุดการทำงานทุกครั้งเมื่อเสร็จสิ้นการแปลงสัญญาณในแต่ละครั้ง แต่ถ้ากำหนดบิตนี้ให้มีค่าเป็น “1” กระบวนการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลจะทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ในบิตที่4 ของรีจิสเตอร์ ADCON ทำงานเป็นแฟลค BUSY ซึ่งสามารถทำการอ่านได้เพียงอย่างเดียว ถ้าบิตนี้มีค่าเป็น “1” จะหมายถึงกระบวนการแปลงสัญญาณยังไม่เสร็จสิ้นและเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแปลงสัญญาณแล้วบิตนี้จะมีค่ากลับเป็น “0” อีกครั้ง แฟลค BUSY มีประโยชน์ในการตรวจสอบการทำงานของการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลว่าเสร็จสิ้นหรือยัง กระบวนการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลใช้เวลาประมาณ 14 แมคชีนไซเคิล(Machine Cycle)[15] หรือใช้เวลา 14 ไมโครวินาที (เมื่อใช้คริสตอลความถี่ 12 เมกะเฮิรตซ์)

2. รีจิสเตอร์ ADDAT (A-to-D Converter data register) จะเป็นรีจิสเตอร์ที่เก็บค่าผลลัพธ์จากการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลในแต่ละครั้งของการซักข้อมูลสัญญาณ ซึ่งเราสามารถอ่านผลลัพธ์ได้จากรีจิสเตอร์นี้ และนำค่าดิจิทัลของสัญญาณไปเก็บไว้ในหน่วยความจำ(RAM)เพื่อนำไปใช้ประมวลผลในโปรแกรมต่อไป

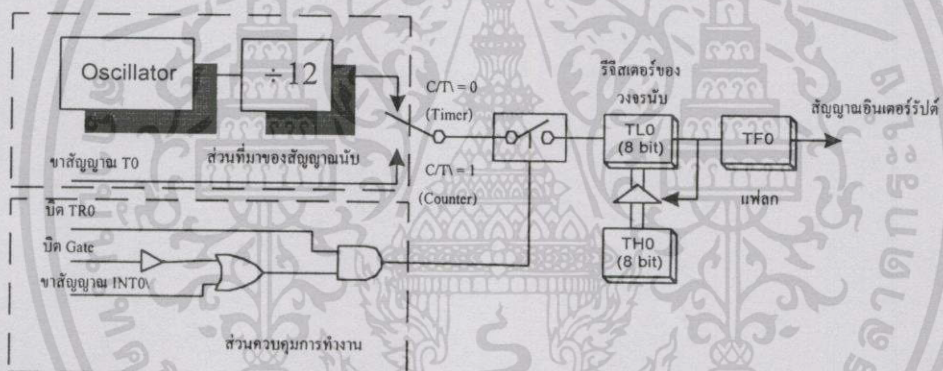


รูปที่ 4.2 โครงสร้างการทำงานในส่วนการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลใน80C535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทำงานของไทมเมอร์ 0 ในโหมดโหลดค่าใหม่ (Automatic Reload Mode)

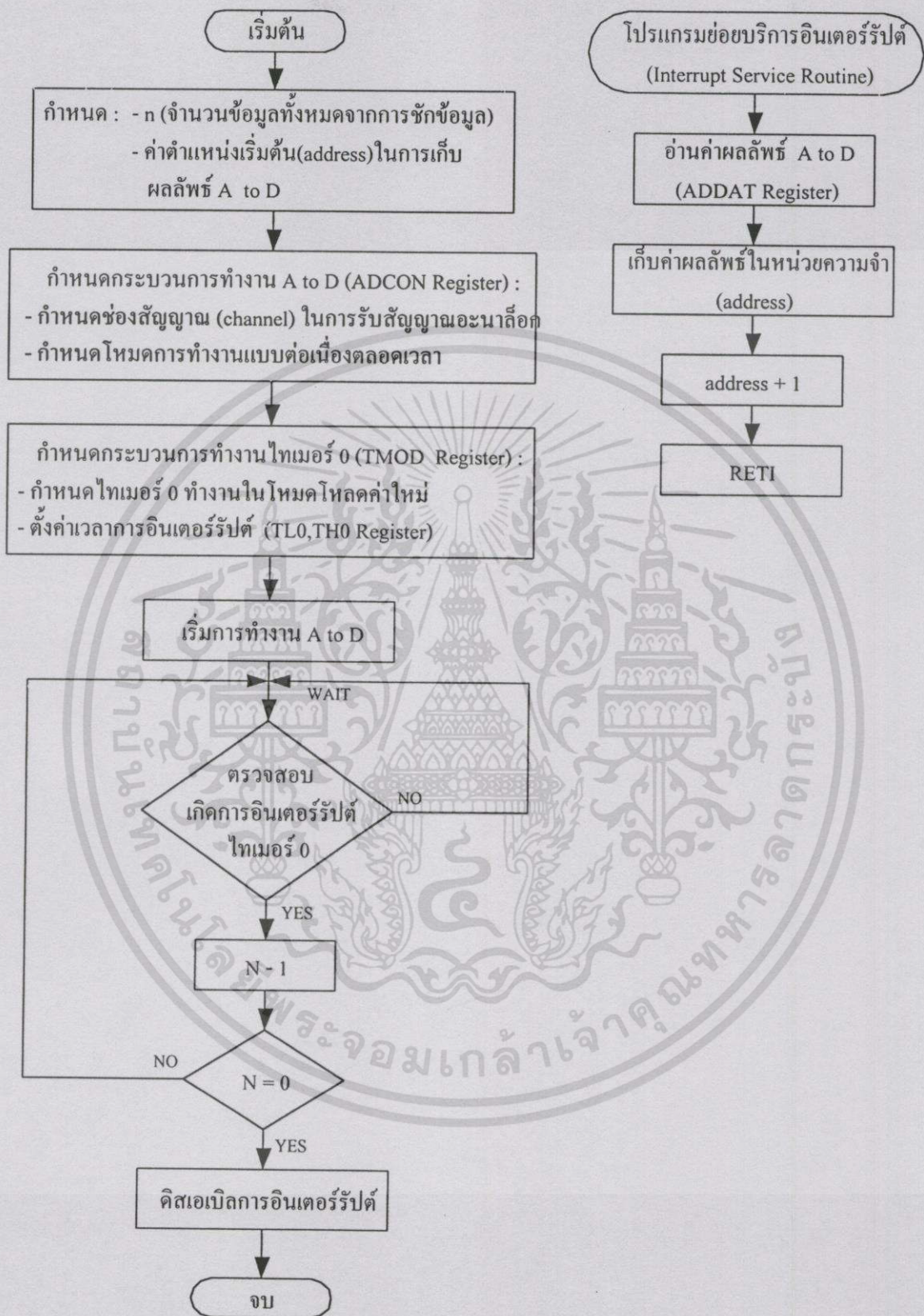
ในการตั้งค่าเวลาสำหรับการซัดตัวอย่างข้อมูล (Sampling rate) สัญญาณกระแสในแต่ละเฟสจะใช้ฐานเวลาจากการอินเตอร์รัปต์ของไทมเมอร์ 0 ในไมโครโปรเซสเซอร์ 80C535 ในโหมดโหลดค่าใหม่ (แสดงหลักการการทำงานดังรูปที่ 4.3) ซึ่งหลักการการทำงานของโหมดนี้จะอาศัยรีจิสเตอร์ TLO เป็นตัวนับขนาด 8 บิต และรีจิสเตอร์ TH0 ใช้สำหรับทำหน้าที่เก็บค่าเริ่มต้นของการนับไว้ สัญญาณนาฬิกาภายในไมโครโปรเซสเซอร์เป็นจังหวะในการนับของไทมเมอร์ 0 เมื่อรีจิสเตอร์ TLO นับจนเกิดโอเวอร์โฟลว์จากค่า 0FFH เป็น 00H ก็จะเกิดการอินเตอร์รัปต์จากไทมเมอร์ 0 และระบบก็จะทำการนำค่าจากรีจิสเตอร์ TH0 กลับมาใส่รีจิสเตอร์ TLO ให้โดยอัตโนมัติ (Automatic Reload) จึงทำให้เวลาในการสร้างการอินเตอร์รัปต์ในแต่ละครั้งมีค่าเท่ากันทุกครั้งตามค่าที่กำหนดในรีจิสเตอร์ TLO และ TH0 เพราะฉะนั้นเวลาในการซัดตัวอย่างข้อมูลจึงมีค่าเท่ากันทุกครั้งและสามารถกำหนดค่าเวลาได้จากการใส่ข้อมูลให้รีจิสเตอร์ TLO และ TH0



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการทำงานของไทมเมอร์ 0 ในโหมดโหลดค่าใหม่

4.2.3 หลักการโปรแกรมการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

หลักการของโปรแกรมการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลของสัญญาณกระแส จะกำหนดให้โปรแกรมทำการแปลงสัญญาณกระแสทีละเฟส โดยเริ่มจาก เฟส a , เฟส b และเฟส c ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายหลักการของโปรแกรมในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลในแต่ละเฟส ดังโฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมรูปที่ 4.4 โดยโปรแกรมจะเริ่มจากการกำหนดค่าจำนวนครั้งของข้อมูลที่ต้องการซัดตัวอย่าง (n) และกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในรีจิสเตอร์ ADCON คือกำหนดช่องสัญญาณอนาล็อก (Channel) ในการรับค่าสัญญาณกระแสจากส่วนรับสัญญาณป้อนเข้ามาประมวลผลและกำหนดค่าโหมดในการทำงานของกระบวนการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลในลักษณะทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ในลำดับต่อไปจะเป็นการ



รูปที่ 4.4 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงาน โปรแกรมการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล

กำหนดโหมดการทำงานของไทเมอร์ให้ทำงานในโหมดโพลค่าใหม่โดยกำหนดค่าในรีจิสเตอร์ TMOD[15] และทำการกำหนดคาบเวลาในการอินเตอร์รัปต์ โดยการป้อนค่าในรีจิสเตอร์ TLO และ TH0 วิธีคิดคาบเวลาในการอินเตอร์รัปต์ สามารถพิจารณาได้จากสัญญาณนาฬิกาภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีความถี่เท่ากับ 1 MHz (ใช้คริสตอล 12 MHz) ดังนั้นในการนับของไทเมอร์ 1 ครั้งซึ่งใช้เวลา 1 คาบของสัญญาณนาฬิกาภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะได้เท่ากับ $1 \mu\text{S}$ เพราะฉะนั้นถ้ากำหนดให้คาบในการซักรข้อมูล (Sampling Rate) เท่ากับ $78 \mu\text{S}$ (ต้องการข้อมูล 256 ค่า ใน 1 คาบของรูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ความถี่ 50 Hz) ก็จะต้องกำหนดค่าในรีจิสเตอร์ TLO และ TH0 เป็น FFH-04EH = B1H

จากนั้นจึงเริ่มต้นกระบวนการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งกระบวนการแปลงสัญญาณจะทำงานอย่างต่อเนื่อง โดยมีช่วงเวลาในการทำงาน (Conversion Time) แปลงสัญญาณ $14 \mu\text{S}$ ตามที่กล่าวมาข้างต้น และเมื่อเกิดการอินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์ 0 ซึ่งใช้เวลา $78 \mu\text{S}$ ก็มีการเก็บค่าผลลัพธ์ของสัญญาณดิจิทัลจากรีจิสเตอร์ ADDAT เก็บไว้ในหน่วยความจำ จนกระทั่งมีการซักรข้อมูลครบตามจำนวน (n) ที่ได้ตั้งเอาไว้ โดยในการทดสอบเครื่องมือวัดจะกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 256 ค่า

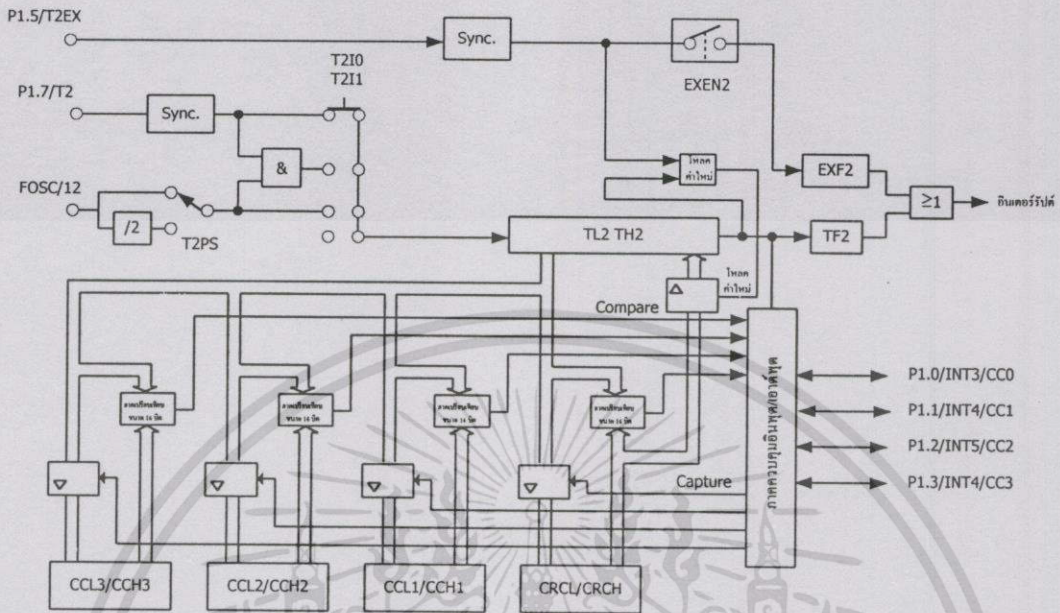
4.3 โปรแกรมในการหาค่ามุมต่างเฟส

การหาค่ามุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่างเฟส a เทียบกับเฟส b และเฟส a เทียบกับเฟส c นั้น สามารถประมวลผลได้จากค่าเวลาต่างเฟสของสัญญาณกระแส ซึ่งเราจะอาศัยการทำงานในภาคแคปเจอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์มาทำการเก็บค่าเวลาเริ่มต้นของสัญญาณกระแส โดยการตรวจสอบสัญญาณจากวงจรตรวจจับสัญญาณตัดผ่านศูนย์ (Zero-Crossing Detector) จากวงจรส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า(Input Part)

4.3.1 การทำงานในภาคแคปเจอร์ ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C535

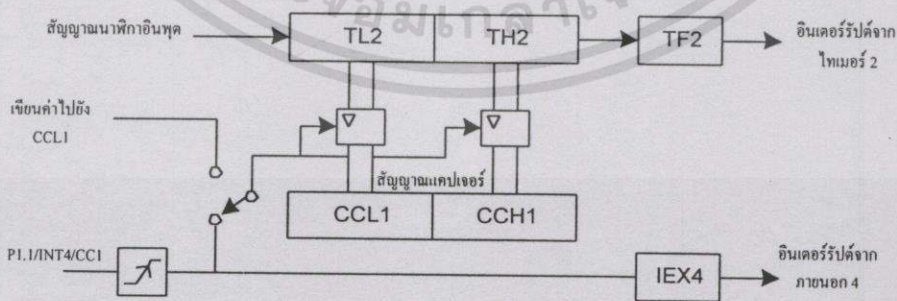
การทำงานในภาคแคปเจอร์ สามารถแสดงโครงสร้างโดยรวมดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะมีองค์ประกอบหลักอยู่ 2 ส่วนคือ 1. ไทเมอร์ 2 (TL2, TH2) และ 2. รีจิสเตอร์ ขนาด 16 บิต 4 ตัว คือ CCL1/CCH1, CCL2/CCH2, CCL3/CCH3 และ CRCL/CRCH ซึ่งเราเรียกว่าแคปเจอร์รีจิสเตอร์ (Capture Register) หลักการทำงานของภาคแคปเจอร์ก็คือ แคปเจอร์รีจิสเตอร์จะทำหน้าที่เก็บค่าไทเมอร์ 2 อย่างทันทีทันใดเมื่อได้รับสัญญาณแคปเจอร์จากภายนอก หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าเวลาในไทเมอร์ 2 จะถูกบันทึกอย่างทันทีที่มีเหตุการณ์(สัญญาณแคปเจอร์)ที่กำหนดไว้เกิดขึ้นแต่ไทเมอร์ 2 ยังคงทำงานต่อไปเรื่อย ๆ ไม่มีหยุด การกำหนดเหตุการณ์ที่จะให้เกิดการแคปเจอร์ สามารถกำหนดได้จากโหมดการทำงานของแคปเจอร์โหมดจากรีจิสเตอร์ CCEN(Capture/Compare Enable

Register)[15] ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 2 โหมดการทำงานก็คือ โหมด 0 และโหมด 1 ในที่นี้ใช้การทำงานในโหมด 0 จึงจะขอกว่าถึงเฉพาะโหมดนี้เท่านั้น



รูปที่ 4.5 โครงสร้างการทำงานของภาคแคปเจอร์

ในโหมด 0 สามารถแสดงโครงสร้างการทำงานดังรูป 4.6 (ในที่นี้จะเลือกเฉพาะแคปเจอร์รีจิสเตอร์ CC1 มาอธิบายเป็นตัวอย่างเท่านั้น ซึ่ง CC2 และ CC3 ก็มีโครงสร้างเหมือนกัน) ถ้ามีสัญญาณที่ขอบขึ้น (rising edge) ของขาพอร์ต P1.1 (P1.1/INT4/CC1) ซึ่งกำหนดให้ถูกใช้เป็นสัญญาณแคปเจอร์ เมื่อสัญญาณนี้ถูกตรวจสอบพบ สถานะบิตต่าง ๆ ในไทเมอร์ 2 ในขณะนั้นจะถูกบันทึกเก็บไว้ในแคปเจอร์รีจิสเตอร์ทันที (CCL1 และ CCH1) ในขณะเดียวกันบิตแฟล็ก IEX4 ในรีจิสเตอร์ IRCON(Interrupt Request Control Register)[15] จะถูกเซต



รูปที่ 4.6 โครงสร้างการทำงานของภาคแคปเจอร์รีจิสเตอร์ CC1

4.3.2 หลักการโปรแกรมหาค่ามุมต่างเฟส

จากหลักการในภาคแคปเจอร์โหมด 0 ที่อธิบายมาข้างต้นก็ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าเวลาต่างเฟสของสัญญาณกระแส โดยให้สัญญาณจากวงจรตรวจจับสัญญาณตัดผ่านศูนย์ของสัญญาณกระแสเฟส a, เฟส b และ เฟส c เชื่อมต่ออยู่กับขาพอร์ต P1.1(CC1) , P1.2(CC2) และ P1.3 (CC3)ตามลำดับหรือถูกกำหนดให้เป็นสัญญาณแคปเจอร์ โครงสร้างหลักการของโปรแกรมสามารถอธิบายดังรูป 4.7 แสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมหาค่ามุมต่างเฟส ซึ่งเริ่มจากการหาเวลาต่างเฟสของสัญญาณกระแสในเฟส a กับเฟส b โดยการกำหนดการทำงานของแคปเจอร์ในโหมด 0 ของ CC1ในรีจิสเตอร์ CCEN และเริ่มต้นการนับของไทเมอร์2 เมื่อมีสัญญาณแคปเจอร์จากขาพอร์ต P1.1(แฟลคแสดงการอินเตอร์รัปต์ IEX4 = 1) เวลาในไทเมอร์2 จะถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ 16 บิต CCL1 และ CCH1 ในลำดับต่อมากำหนดค่าการทำงานของแคปเจอร์ในโหมด 0 ของ CC2 ในรีจิสเตอร์ CCEN และเมื่อมีสัญญาณแคปเจอร์จากขาพอร์ต P1.2(แฟลคแสดงการอินเตอร์รัปต์ IEX5 = 1) เวลาในไทเมอร์ 2 จะถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ CCL2 และ CCH2 เพราะฉะนั้นเราจะได้ค่าเวลาเริ่มต้นเฟสของสัญญาณกระแสในเฟส a และ เฟส b จากแคปเจอร์รีจิสเตอร์ CCL1, CCH1 และ CCL2, CCH2 ตามลำดับ แต่ในการรอสัญญาณแคปเจอร์หรือสัญญาณเริ่มต้นเฟสของสัญญาณกระแสในแต่ละเฟส จำเป็นต้องมีการตรวจสอบการนับของไทเมอร์2 เพราะในกรณีที่ไม่มีสัญญาณแคปเจอร์เข้ามาเนื่องจากกระแสในเฟสนั้น ๆ มีค่าเป็นศูนย์ จะทำให้โปรแกรมทำการรอนกว่าจะมีสัญญาณเกิดขึ้น ซึ่งเป็นการประมวลผลที่ผิดพลาด

ดังนั้นเมื่อต้องการหาค่าเวลาต่างเฟสจากข้อมูลค่าเวลาเริ่มต้นเฟสของสัญญาณกระแสก็สามารถหาได้จากการเปรียบเทียบค่าในแคปเจอร์รีจิสเตอร์ทั้ง 2 ชุดดังกล่าวข้างต้นและจึงนำค่าเวลาต่างเฟสมาทำการหาค่ามุมต่างเฟส โดยการพิจารณาจากสมมติฐานของสัญญาณกระแสในระบบซึ่งมีความถี่เท่ากับ 50 Hz เพราะฉะนั้นสัญญาณกระแสจะมีคาบเท่ากับ

$$T = \frac{1}{f} \quad (4.1)$$

$$= \frac{1}{50} = 20 \text{ mS}$$

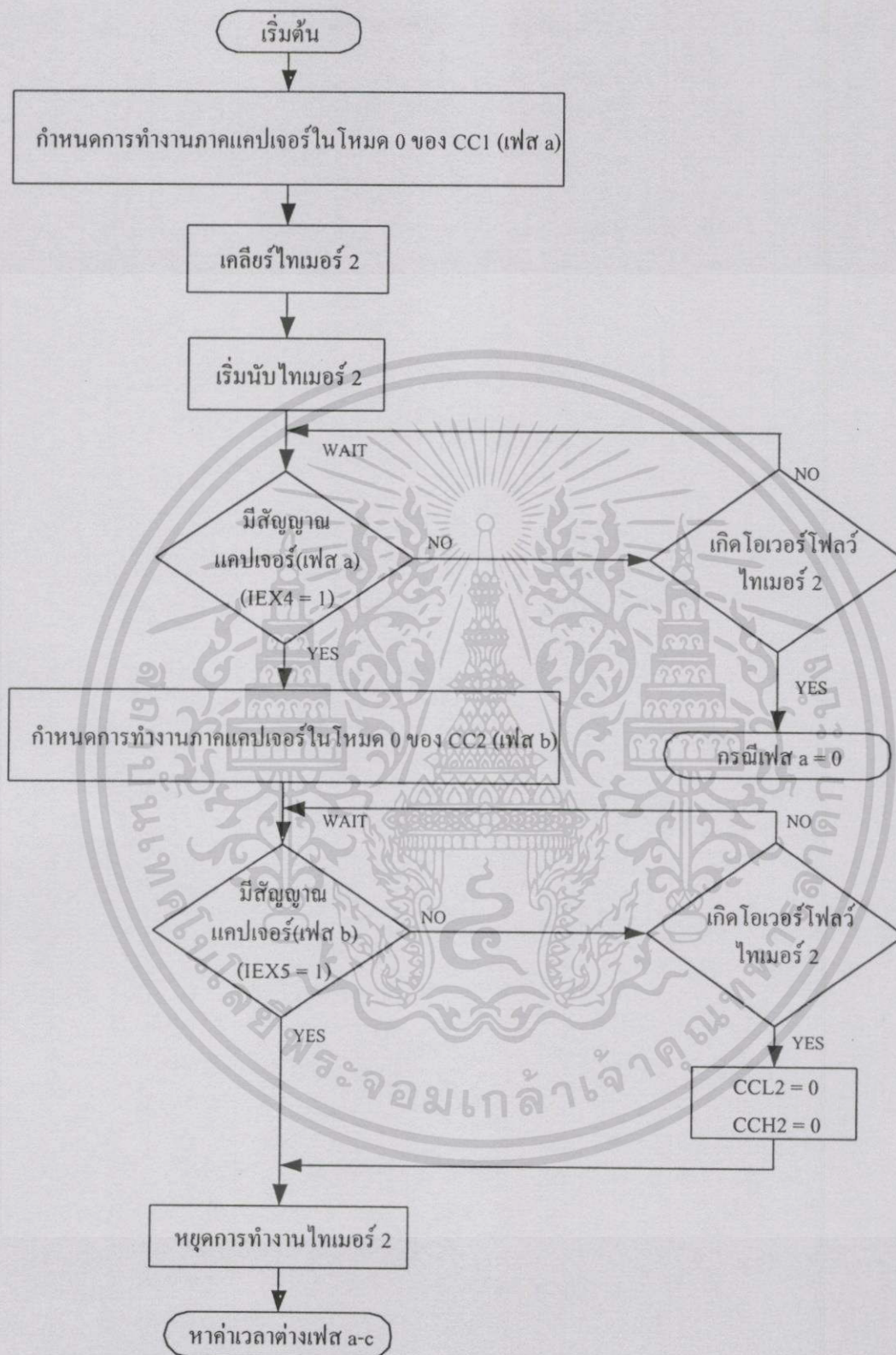
ดังนั้น

$$360^\circ = 20 \text{ mS}$$

$$1^\circ = \frac{20}{360} = 55.56 \mu\text{S}$$

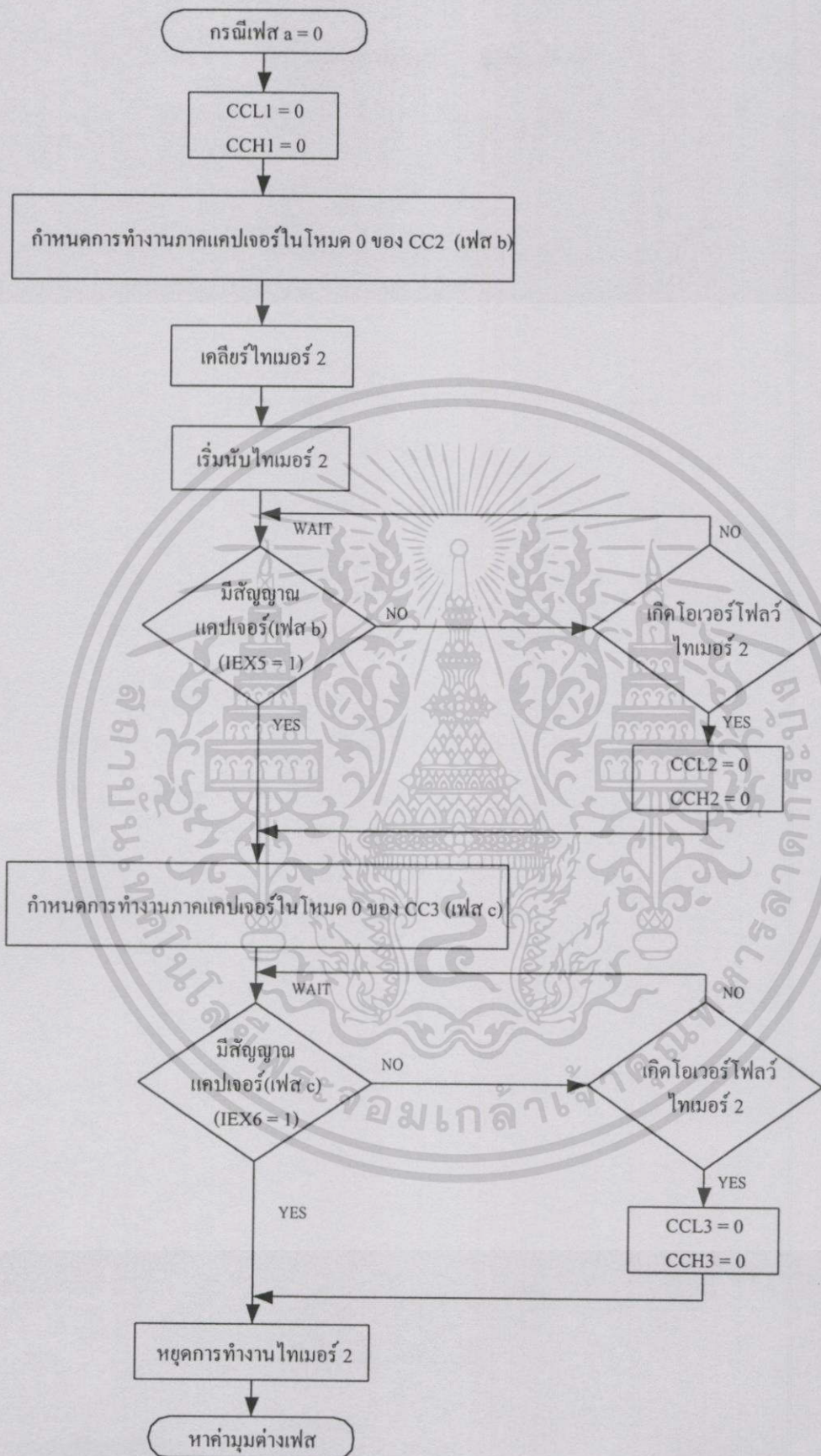
ดังนั้น เราสามารถหาค่ามุมต่างเฟสได้จากสมการ

$$\text{มุมต่างเฟส (องศา)} = \frac{\text{ค่าเวลาต่างเฟส } (\mu\text{S})}{55.56 (\mu\text{S})} \quad (4.2)$$



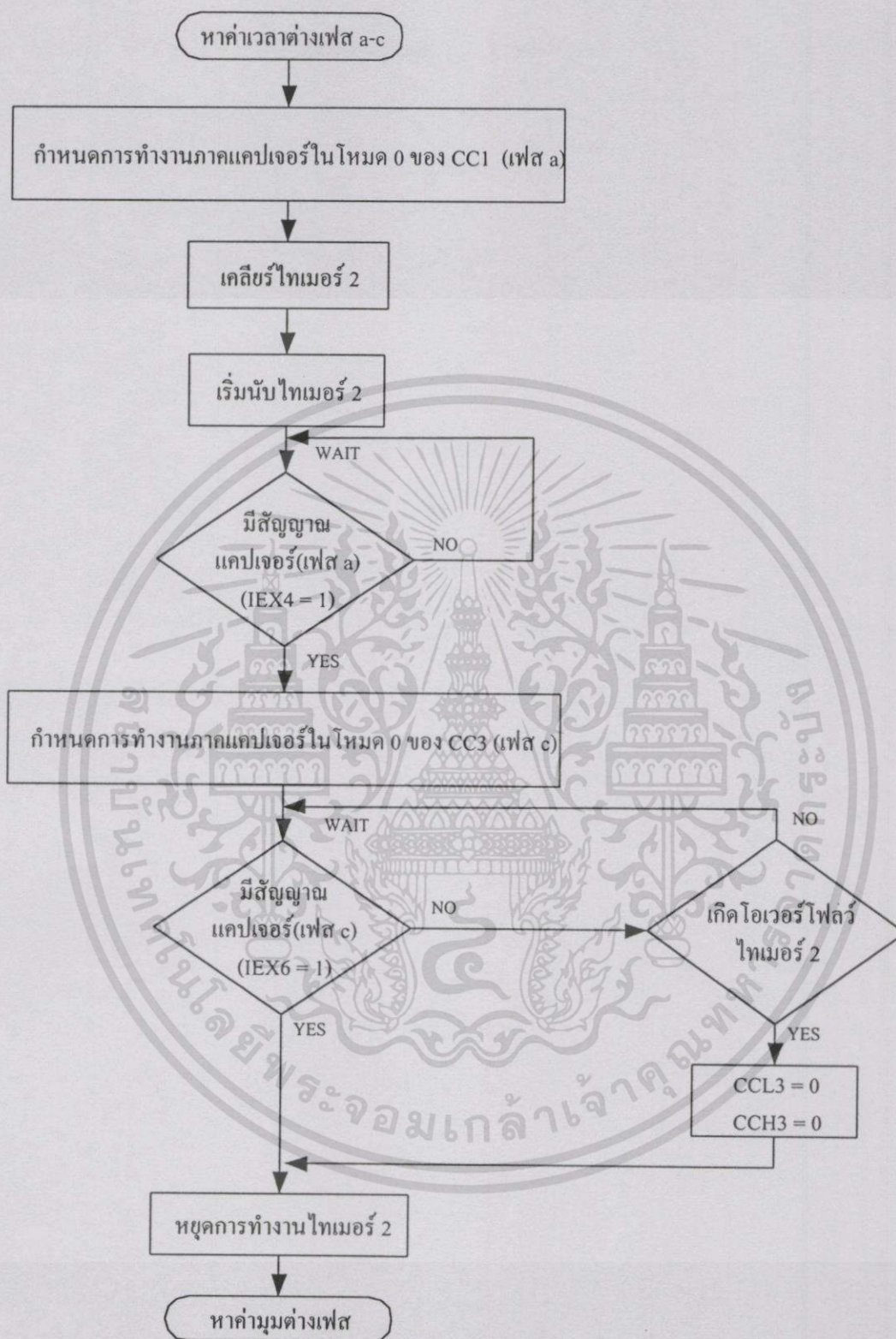
รูปที่ 4.7 โพล์ชาร์ตแสดงการทำงาน โปรแกรมการหาค่ามุมต่างเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



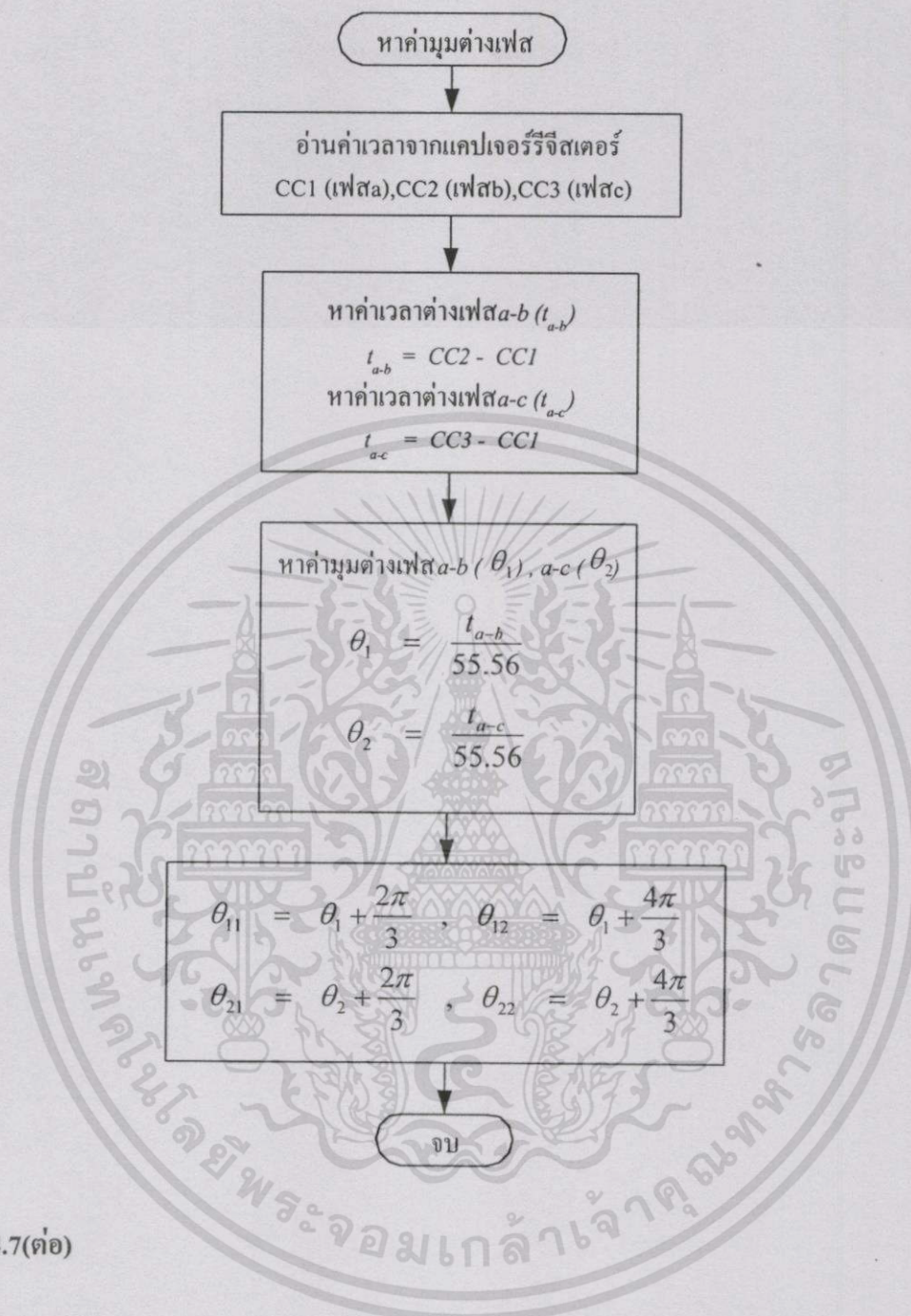
รูปที่ 4.7 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7(ต่อ)

สำหรับการหาค่านุมต่างเฟสระหว่างเฟส a กับเฟส c ก็จะมีโครงสร้างโปรแกรมเช่นเดียวกันกับการหาค่านุมต่างเฟสระหว่างเฟส a กับเฟส b ดังนั้นเมื่อได้ค่านุมต่างเฟสทั้ง 2 ค่าแล้ว ก็จะนำค่านุมต่างเฟสมาบวกด้วย 120 องศา (a) และ 240 องศา (a^2) และเก็บค่าผลลัพธ์ไว้ในหน่วยความจำ เพื่อที่จะนำค่านุมต่างเฟสไปประมวลผล เพื่อหาค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ ต่อไป

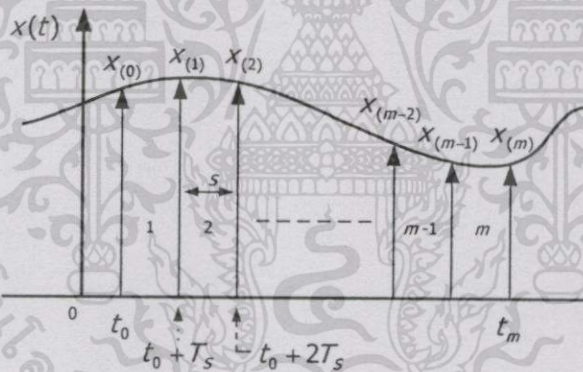
4.4 โปรแกรมหาค่าประสิทธิภาพ (R.M.S) ของสัญญาณกระแส

การหาค่าประสิทธิภาพของสัญญาณกระแสในแต่ละเฟส สามารถประมวลผลจากค่าผลลัพธ์ของข้อมูล โปรแกรมการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลที่เก็บไว้ในหน่วยความจำ ซึ่งได้มาจากการซักรหัสข้อมูล (Sampling) สัญญาณกระแสในแต่ละเฟส หลักการในการประมวลผลเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของสัญญาณจากข้อมูลในการซักรหัสข้อมูลสัญญาณสามารถอธิบายได้ดังนี้

จากสูตรในการหาค่าประสิทธิภาพของสัญญาณกระแส $i(t)$ ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีคาบเวลาเท่ากับ T คือ

$$I_{RMS.} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [i(t)]^2 dt} \quad (4.3)$$

จากสมการ(4.3) ข้างต้นจะเห็นได้ว่าการหาค่า $I_{RMS.}$ เป็นการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชัน $[i(t)]^2$ ในช่วงเวลา 1 คาบของรูปคลื่น ดังนั้นในการหาค่าประสิทธิภาพของสัญญาณในรูปแบบการประมวลผลสัญญาณที่ได้จากการซักรหัสข้อมูล สามารถพิจารณาได้ดังนี้



รูปที่ 4.8 การหาพื้นที่ใต้กราฟโดยวิธีแบ่งพื้นที่ทั้งหมดออกเป็นพื้นที่เล็กๆ จำนวนหลายๆ ช่องที่มีความกว้างเท่าๆกัน

จากรูป(4.8) จะพิจารณาหาพื้นที่ใต้กราฟจากข้อมูลที่ได้จากการซักรหัสข้อมูลสัญญาณเวลาต่อเนื่อง $x(t)$ ระหว่างเวลา t_0 ถึง t_m ได้ดังนี้

$$\text{เมื่อกำหนดให้ } y[m] = \text{ผลรวมของ พ.ท. สี่เหลี่ยมทั้ง } m \text{ ช่อง} \quad (4.4)$$

$$\text{ดังนั้น } y[m] = y[m-1] + \text{พ.ท. สี่เหลี่ยมช่องสุดท้าย (ช่องที่ } m) \quad (4.5)$$

$$\text{เมื่อ พ.ท. สี่เหลี่ยมช่องสุดท้าย (ช่องที่ } m) = T_s * x(m-1) \quad (4.6)$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } y[m] = y[m-1] + T_s * x(m-1) \quad (4.7)$$

$$\text{ตัวอย่าง ถ้ากำหนดให้ } m = 4 \text{ ช่อง}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 y[4] &= y[3] + T_s * x(3) \\
 y[3] &= y[2] + T_s * x(2) \\
 y[2] &= y[1] + T_s * x(1) \\
 y[1] &= y[0] + T_s * x(0)
 \end{aligned}$$

สำหรับค่า $y[0]$ เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของการรวมพื้นที่สี่เหลี่ยมในแต่ละช่อง ดังนั้นเมื่อกำหนดให้เริ่มต้นตั้งแต่ช่องที่ 1 เป็นต้นไป $y[0] = 0$ จึงสรุปได้ว่า

$$y[4] = T_s * [x(3) + x(2) + x(1) + x(0)]$$

ดังนั้น การหาพื้นที่ใต้กราฟ $x(t)$ สามารถเขียนเป็นสมการในรูปแบบของการประมวลผลจากข้อมูลที่ได้จากการซัดข้อมูลสัญญาณเวลาต่อเนื่อง $x(t)$ ด้วยคาบการซัดข้อมูล T_s โดยมีจำนวนข้อมูล m ข้อมูล

$$\begin{aligned}
 \int_{t_0}^{t_m} x(t) dt &= y[m] \\
 &= T_s \sum_{n=0}^{m-1} x(n)
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

จากความสัมพันธ์ (4.8) และ (4.3) จะพบว่า

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [i(t)]^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} * T_s \sum_{n=0}^{m-1} [I(n)]^2} \tag{4.9}$$

จาก(4.9) กำหนดให้ช่วงเวลาในการซัดข้อมูล (t_0 ถึง t_m) เท่ากับ 1 คาบของสัญญาณรูปคลื่น $i(t)$ ที่ทำการพิจารณา ซึ่งจะได้อัตราคาบเวลาเท่ากับ

$$T = t_m - t_0 \tag{4.10}$$

และจาก
$$T_s = \frac{t_m - t_0}{m} \tag{4.11}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$T = T_s * m \tag{4.12}$$

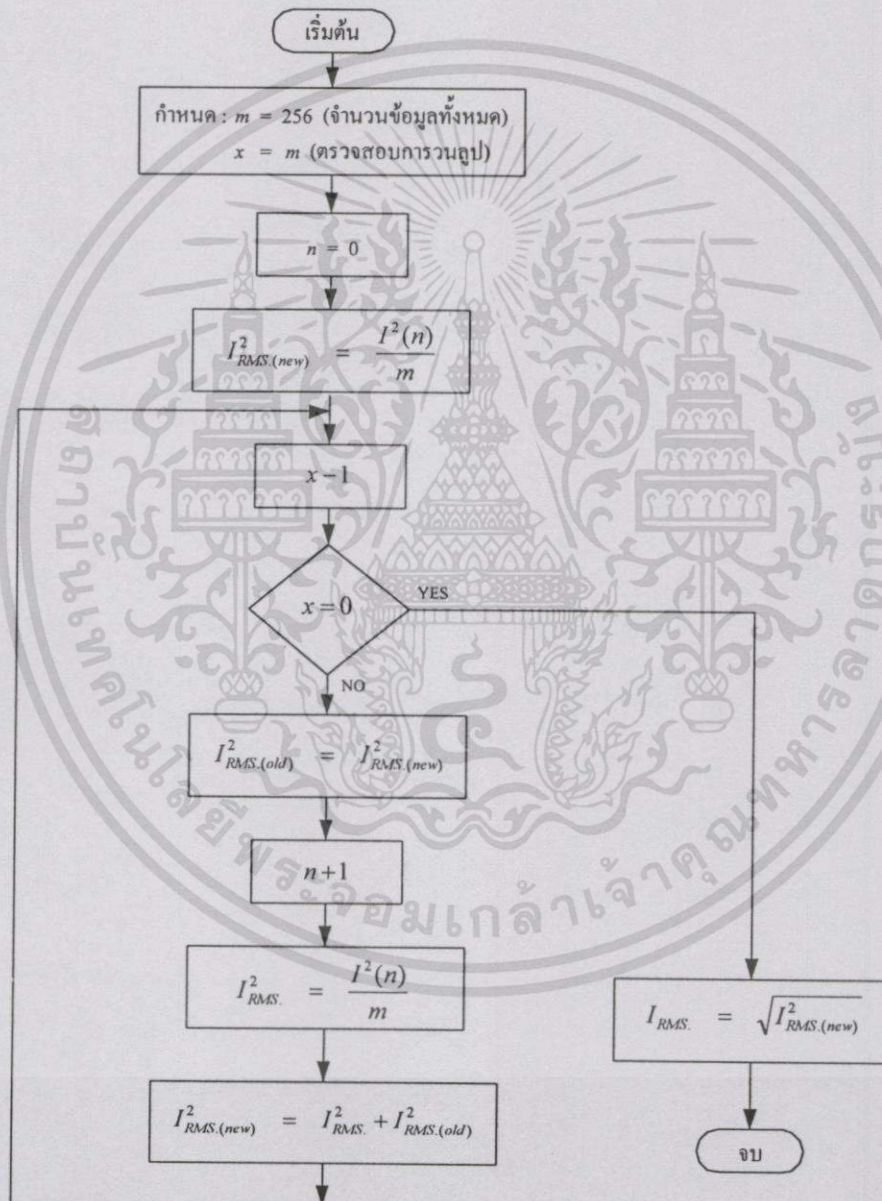
จากสมการ (4.12) แทนลงในสมการ (4.9) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=0}^{m-1} [I(n)]^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{m} [I(0)^2 + I(1)^2 + \dots + I(m-1)^2]} \quad (4.13)$$

เมื่อ m = จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการชักข้อมูลสัญญาณกระแส
 $I(n)$ = ค่าข้อมูล (ลำดับ) ที่ได้จากการชักข้อมูลสัญญาณกระแสในแต่ละครั้ง



รูปที่ 4.9 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมหาค่าประสิทธิภาพของสัญญาณกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการเขียนโปรแกรมการประมวลผล เพื่อหาค่าประสิทธิผลของสัญญาณกระแสในแต่ ละเฟสสามารถที่จะอธิบายได้ดังโพลีชาร์ต รูปที่ 4.9 ในการประมวลผลจะทำที่ละเฟส โดยเริ่มที่ ข้อมูลสัญญาณกระแส เฟส a , เฟส b และเฟส c ตามลำดับ และนำค่าประสิทธิผลของสัญญาณ กระแสในแต่ละเฟสเก็บไว้ในหน่วยความจำ(RAM) เพื่อที่จะนำมาประมวลผลหาค่าองค์ประกอบ สมมาตรในลำดับต่าง ๆ ต่อไป

4.5 โปรแกรมการหาค่าฟังก์ชันตรีโกณมิติ (sin,cos) ของมุมต่างเฟส

การหาค่าฟังก์ชัน sin และ cos ของมุมต่างเฟส เพื่อใช้ในการประมวลผลหาค่าองค์ ประกอบสมมาตรนั้น ใช้วิธีการเขียนค่าของฟังก์ชัน sin ตั้งแต่มุม 0 ถึง 90 องศา เก็บไว้ในหน่วย ความจำในรูปแบบของตารางข้อมูล และจึงนำค่ามุมต่างเฟสที่ได้จากผลลัพธ์ของโปรแกรมการหา ค่ามุมต่างเฟสมาทำการเปรียบเทียบกับตารางข้อมูลที่เก็บไว้ เพื่อหาฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่าง เฟส ซึ่งจะอธิบายหลักการดังนี้

4.5.1 การหาค่าฟังก์ชัน sin

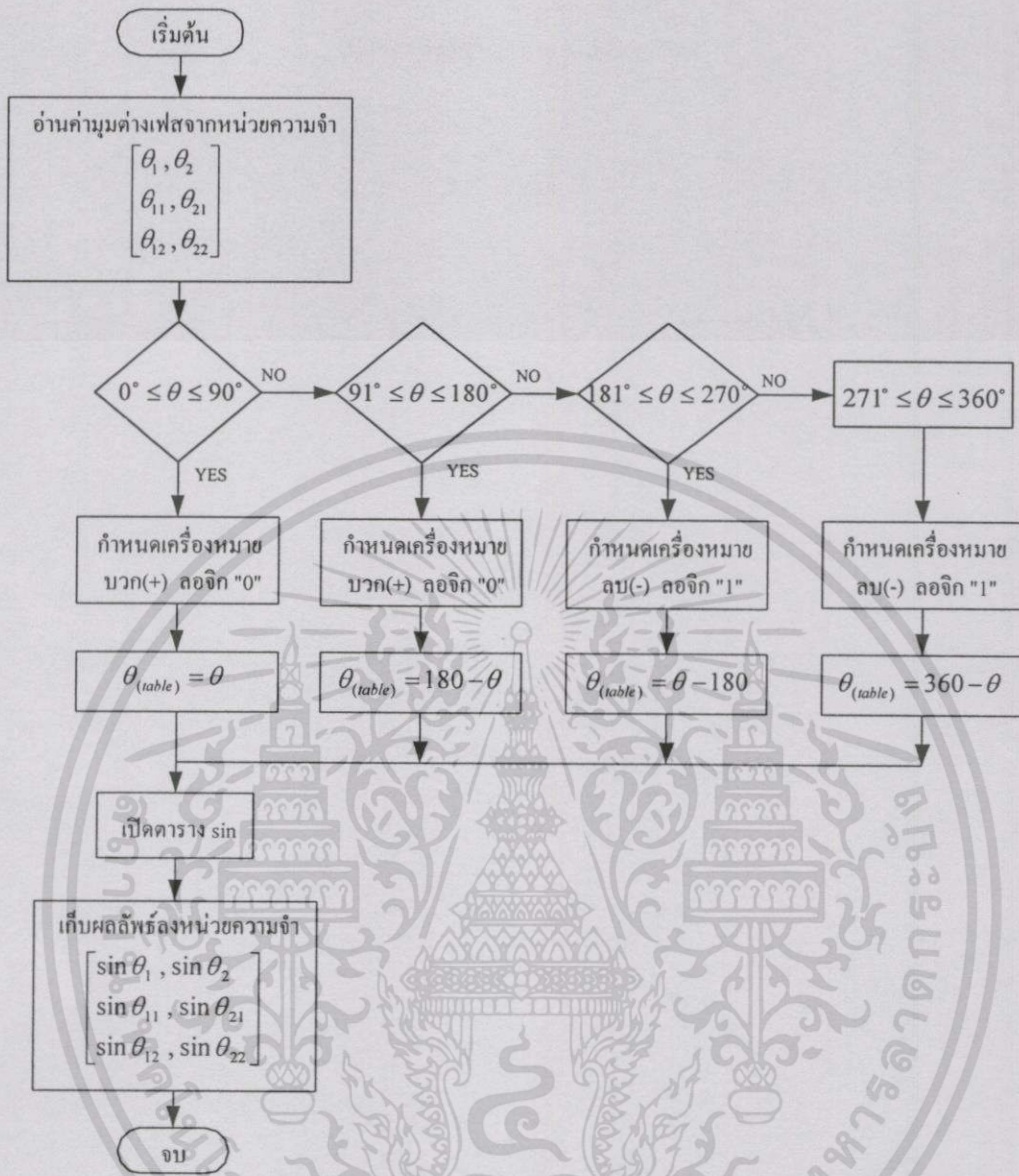
การหาค่าฟังก์ชัน sin ของมุมต่างเฟส จะสามารถอธิบายตามโพลีชาร์ต รูปที่ 4.10 โดยเริ่ม จากการนำค่ามุมต่างเฟส จากการประมวลผลของโปรแกรมการหาค่ามุมต่างเฟส นำมาตรวจสอบ ค่ามุมต่างเฟสว่าอยู่ในควอดแดนต์ที่เท่าไร โดยแบ่งออกเป็น 4 ควอดแดนต์ (ดังรูป4.11a) และทำ การหาค่ามุมต่างเฟสที่อยู่ในช่วงมุม 0 ถึง 90 องศา ($\theta_{(table)}$) ที่มีความสัมพันธ์กับค่ามุมต่างเฟสใน ควอดแดนต์นั้น ๆ นำมาเปิดตารางข้อมูล sin เพื่อหาค่าฟังก์ชัน sin ของมุมต่างเฟส พร้อมทั้ง กำหนดเครื่องหมายในการคำนวณ โดยในการกำหนดเครื่องหมายใช้การกำหนดบิตในหน่วยความ จำภายในไมโครคอนโทรเลอร์ที่สามารถกระทำทางลอจิกระดับบิตได้(Internal RAM Bit Addressable) เมื่อเครื่องหมายเป็นลบกำหนดให้มีการเซ็ทบิต(ลอจิก “1”) และเมื่อเครื่องหมายเป็น บวกกำหนดให้เคลียร์บิต(ลอจิก “0”) ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดในแต่ละควอดแดนต์ ได้ดังนี้

ในควอดแดนต์ที่ 1 มุมต่างเฟสระหว่าง 0 ถึง 90 องศา เครื่องหมายในการคำนวณ เป็นบวก (+) นำค่ามุมต่างเฟสมาเปิดตารางข้อมูล sin ได้เลย

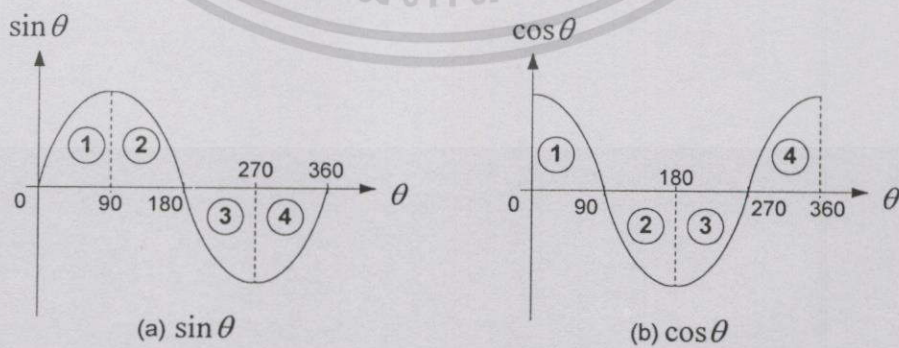
ในควอดแดนต์ที่ 2 มุมต่างเฟสระหว่าง 91 ถึง 180 องศา เครื่องหมายในการคำนวณ เป็นบวก (+) นำค่ามุมต่างเฟสมาลบออกจาก 180 องศา และนำผลลัพธ์มุม ($\theta_{(table)}$) ที่ได้ไปเปิด ตาราง sin

ยกตัวอย่างเช่น ผลลัพธ์จากโปรแกรมหาค่ามุมต่างเฟสมีค่ามุมต่างเฟสระหว่างเฟส a กับ เฟส b เท่ากับ 120 องศา นำค่ามุมลบออกจาก 180 องศา เพื่อหาค่ามุมในช่วง 0 ถึง 90 องศา ($\theta_{(table)}$)

$$180^\circ - 120^\circ = 60^\circ$$



รูปที่ 4.10 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมการหาค่าฟังก์ชัน sin ของมุมต่างเฟส



รูปที่ 4.11 การแบ่งฟังก์ชัน sin และฟังก์ชัน cos ออกเป็น 4 ควอดแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่า

$$|\sin 120^\circ| = |\sin 60^\circ|$$

เพราะฉะนั้นในการหาค่าฟังก์ชัน \sin ของมุม 120 องศา จึงนำค่ามุม 60 องศา มาเปิดตาราง ข้อมูล \sin ในหน่วยความจำ

ในควอดแดนซ์ที่ 3 มุมต่างเฟสระหว่าง 181 ถึง 270 องศา เครื่องหมายในการคำนวณ เป็นลบ (-) นำค่ามุมต่างเฟสมาลบกับ 180 องศา และนำผลลัพธ์มุม ($\theta_{(table)}$) ที่ได้ไปเปิดตาราง \sin

ในควอดแดนซ์ที่ 4 มุมต่างเฟสระหว่าง 271 ถึง 360 องศา เครื่องหมายในการคำนวณเป็นลบ (-) นำค่ามุมต่างเฟสมาลบออกจาก 360 องศา และนำผลลัพธ์มุม ($\theta_{(table)}$) ที่ได้ไปเปิดตาราง \sin

ซึ่งสามารถแสดงสรุปรายละเอียดการหาค่าฟังก์ชัน \sin ของมุมต่างเฟสในทั้ง 4 ควอดแดนซ์ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปรายละเอียดการหาค่าฟังก์ชัน \sin ของมุมต่างเฟสในทั้ง 4 ควอดแดนซ์

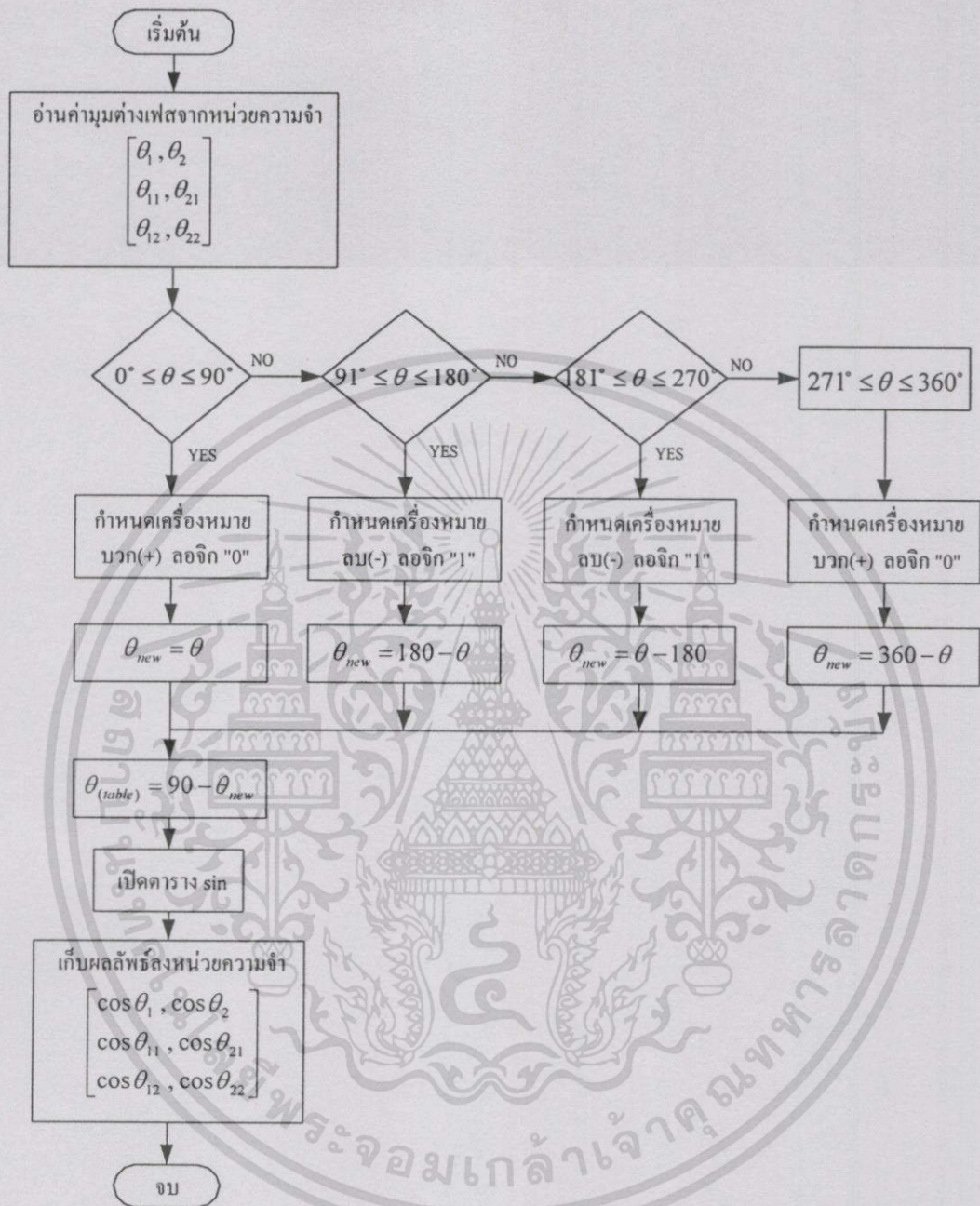
ควอดแดนซ์	มุมต่างเฟส	เครื่องหมายทางคณิตศาสตร์	มุมสำหรับตาราง $\sin \theta_{(table)}$
1	$0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$	+ (ลอจิก"0")	$\theta_{(table)} = \theta$
2	$91^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$	+ (ลอจิก"0")	$\theta_{(table)} = 180 - \theta$
3	$91^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$	- (ลอจิก"1")	$\theta_{(table)} = \theta - 180$
4	$271^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$	- (ลอจิก"1")	$\theta_{(table)} = 360 - \theta$

4.5.2 การหาค่าฟังก์ชัน \cos

การหาค่าฟังก์ชัน \cos ของมุมต่างเฟส ก็จะใช้หลักการเดียวกันกับการหาค่าฟังก์ชัน \sin ของมุมต่างเฟส ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังไฟล์ชาร์ตรูปที่ 4.12 โดยเริ่มจากการนำค่ามุมต่างเฟสมาตรวจสอบว่าอยู่ในควอดแดนซ์ที่เท่าไร(รูปที่ 4.11b) เพื่อทำการกำหนดเครื่องหมายในการคำนวณ และทำการหาค่ามุมต่างเฟสที่อยู่ในช่วง 0 ถึง 90 องศาที่มีความสัมพันธ์กับค่ามุมต่างเฟสในควอดแดนซ์นั้น แต่ก่อนที่จะนำมุมต่างเฟสที่ได้ในแต่ละควอดแดนซ์ไปเปิดตารางข้อมูล \sin ต้องมีการปรับค่ามุมให้อยู่ในฟังก์ชัน \sin เสียก่อน โดยนำมุมต่างเฟสลบออกจากมุม 90 องศา

$$|\cos \phi| = |\sin (90 - \phi)| \quad (4.14)$$

ซึ่งสามารถแสดงสรุปรายละเอียดการหาค่าฟังก์ชัน \cos ของมุมต่างเฟสทั้ง 4 ควอดแดนซ์ ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.12 โพลีชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมการหาค่าฟังก์ชัน cos ของมุมต่างเฟส

ตารางที่ 4.2 สรุปรายละเอียดการหาค่าฟังก์ชัน Cos ของมุมต่างเฟสทั้ง 4 ควอดแดนซ์

ควอดแดนซ์	มุมต่างเฟส	เครื่องหมายทางคณิตศาสตร์	มุมสำหรับตาราง $\sin \theta_{(table)}$
1	$0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$	+ (ลोजิก"0")	$\theta_{(table)} = 90 - \theta$
2	$91^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$	- (ลोजิก"1")	$\theta_{(table)} = 90 - (180 - \theta)$
3	$181^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$	- (ลोजิก"1")	$\theta_{(table)} = 90 - (\theta - 180)$
4	$271^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$	+ (ลोजิก"0")	$\theta_{(table)} = 90 - (360 - \theta)$

ยกตัวอย่างเช่น ต้องการหาค่าฟังก์ชัน cos ของมุมต่างเฟสระหว่างเฟส a กับ เฟส c ซึ่งมีมุมต่างเฟสอยู่ 240 องศา

เมื่อนำค่ามุมต่างเฟส (240°) มาตรวจสอบจะพบว่ามุมอยู่ในควอดแดนซ์ที่ 3 มีเครื่องหมายในการคำนวณเป็นลบ (-) และทำการหาค่ามุมต่างเฟสในช่วง 0 ถึง 90 องศา ที่มีความสัมพันธ์กับมุม 240 องศา

จากตาราง 4.2 จะได้ว่า ให้นำค่ามุมต่างเฟสมาลบกับ 180 องศา

$$240^\circ - 180^\circ = 60^\circ$$

ซึ่งจะพบว่า

$$|\cos 240^\circ| = |\cos 60^\circ|$$

และทำการปรับค่ามุมต่างเฟสให้อยู่ในฟังก์ชัน sin จากสมการ (5.14)

$$|\cos 60^\circ| = |\sin(90^\circ - 60^\circ)|$$

$$= |\sin 30^\circ|$$

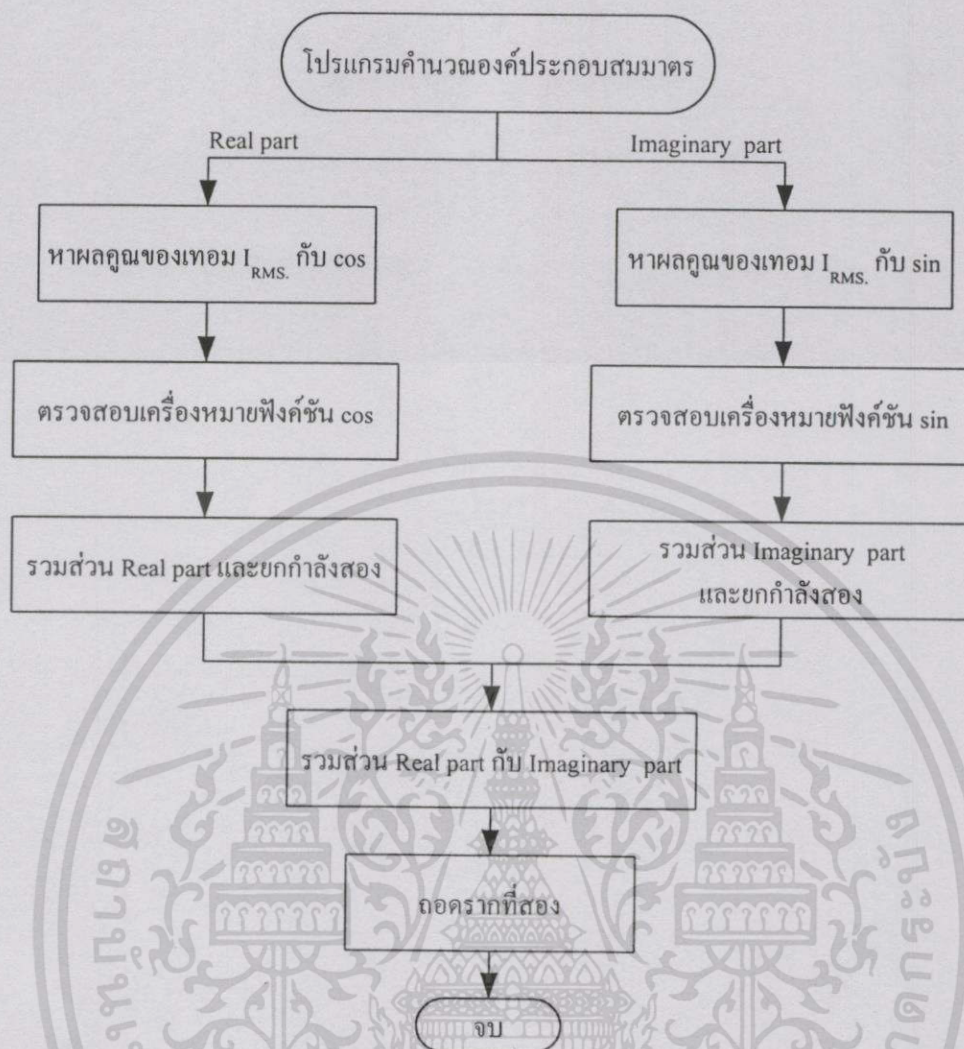
หรือ

$$|\cos 240^\circ| = |\sin 30^\circ|$$

จึงนำค่ามุม 30 องศา ($\theta_{(table)}$) มาเปิดตาราง sin จะทำให้ได้ค่าฟังก์ชัน cos ของมุมต่างเฟส 240 องศา

4.6 โปรแกรมการคำนวณหาค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่าง ๆ

จากโปรแกรมหลักต่าง ๆ ข้างต้น จะเห็นได้ว่าเราได้ผลลัพธ์ของค่าขนาด (RMS. Value) กระแสทั้ง 3 เฟส, ค่าฟังก์ชันตรีโกณมิติ (sin,cos) ของมุมต่างเฟสระหว่างสัญญาณกระแสเฟส a เทียบกับเฟส b, เฟส a เทียบกับเฟส c และเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์(+,-) ของฟังก์ชันตรีโกณมิติ



รูปที่ 4.13 บล็อกไดอะแกรมแสดงวิธีการคำนวณหาค่าองค์ประกอบสมมาตร

สำหรับการคำนวณ โดยเก็บค่าเหล่านี้ไว้ในหน่วยความจำ โปรแกรมการคำนวณหาค่าองค์ประกอบสมมาตรจะใช้ค่าผลลัพธ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาประมวลผลตามสมการ (3.10),(3.11) และ(3.12) หลักการของโปรแกรมการคำนวณสามารถแสดงดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.13 การคำนวณจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนจริง (Real part) หรือส่วนของฟังก์ชัน cos ในส่วนนี้การคำนวณจะทำการคูณกันระหว่างค่ากระแสในเฟส b และเฟส c กับฟังก์ชัน cos ของมุมต่างเฟส และเก็บค่าไว้ในหน่วยความจำ โดยมีการคำนวณผลคูณดังนี้

การหาค่า Zero Component

$$|\text{Re}_{0(ab)}| = I_b * |\cos \theta_1| \quad (4.15)$$

$$|\text{Re}_{0(ac)}| = I_c * |\cos \theta_2| \quad (4.16)$$

การหาค่า Positive Component

$$|\operatorname{Re}_{1(ab)}| = I_b * |\cos \theta_{11}| \quad (4.17)$$

$$|\operatorname{Re}_{1(ac)}| = I_c * |\cos \theta_{22}| \quad (4.18)$$

การหาค่า Negative Component

$$|\operatorname{Re}_{2(ab)}| = I_b * |\cos \theta_{12}| \quad (4.19)$$

$$|\operatorname{Re}_{2(ac)}| = I_c * |\cos \theta_{21}| \quad (4.20)$$

2. ส่วนจินตภาพ (Imaginary part) หรือส่วนของฟังก์ชัน \sin ในส่วนนี้การคำนวณจะทำการคูณกันระหว่างค่ากระแสในเฟส b และเฟส c กับฟังก์ชัน \sin ของมุมต่างเฟส และเก็บค่าไว้ในหน่วยความจำ โดยมีการคำนวณผลคูณดังนี้

การหาค่า Zero Component

$$|\operatorname{Im}_{0(ab)}| = I_b * |\sin \theta_1| \quad (4.21)$$

$$|\operatorname{Im}_{0(ac)}| = I_c * |\sin \theta_2| \quad (4.22)$$

การหาค่า Positive Component

$$|\operatorname{Im}_{1(ab)}| = I_b * |\sin \theta_{11}| \quad (4.23)$$

$$|\operatorname{Im}_{1(ac)}| = I_c * |\sin \theta_{22}| \quad (4.24)$$

การหาค่า Negative Component

$$|\operatorname{Im}_{2(ab)}| = I_b * |\sin \theta_{12}| \quad (4.25)$$

$$|\operatorname{Im}_{2(ac)}| = I_c * |\sin \theta_{21}| \quad (4.26)$$

เมื่อ $\theta_1 =$ มุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่าง เฟส a กับเฟส b

$\theta_2 =$ มุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่าง เฟส a กับเฟส c

และ $\theta_{11} = \theta_1 + \frac{2\pi}{3}$

$\theta_{12} = \theta_1 + \frac{4\pi}{3}$

$\theta_{21} = \theta_2 + \frac{2\pi}{3}$

$\theta_{22} = \theta_2 + \frac{4\pi}{3}$

เมื่อได้ผลคูณระหว่างค่ากระแสกับฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่างเฟสแล้ว ขั้นตอนต่อไป จะทำการรวมเทอมต่าง ๆ ของผลคูณตามสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การรวมส่วนจริง (Real part)

$$\begin{aligned} \text{Re}_{0(\text{total})} &= I_a \pm I_b |\cos \theta_1| \pm I_c |\cos \theta_2| \\ &= I_a \pm |\text{Re}_{0(ab)}| \pm |\text{Re}_{0(ac)}| \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}_{1(\text{total})} &= I_a \pm I_b |\cos \theta_{11}| \pm I_c |\cos \theta_{22}| \\ &= I_a \pm |\text{Re}_{1(ab)}| \pm |\text{Re}_{1(ac)}| \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}_{2(\text{total})} &= I_a \pm I_b |\cos \theta_{12}| \pm I_c |\cos \theta_{21}| \\ &= I_a \pm |\text{Re}_{2(ab)}| \pm |\text{Re}_{2(ac)}| \end{aligned} \quad (4.29)$$

2. การรวมส่วนจินตภาพ (Imaginary part)

$$\begin{aligned} \text{Im}_{0(\text{total})} &= \pm I_b |\sin \theta_1| \pm I_c |\sin \theta_2| \\ &= \pm |\text{Im}_{0(ab)}| \pm |\text{Im}_{0(ac)}| \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}_{1(\text{total})} &= \pm I_b |\sin \theta_{11}| \pm I_c |\sin \theta_{22}| \\ &= \pm |\text{Im}_{1(ab)}| \pm |\text{Im}_{1(ac)}| \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}_{2(\text{total})} &= \pm I_b |\sin \theta_{12}| \pm I_c |\sin \theta_{21}| \\ &= \pm |\text{Im}_{2(ab)}| \pm |\text{Im}_{2(ac)}| \end{aligned} \quad (4.32)$$

จากสมการในการรวมทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ จะเห็นได้ว่าต้องคำนึงถึงเครื่องหมายของฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่างเฟสในแต่ละค่า โดยก่อนที่จะทำการรวมต้องทำการตรวจสอบเครื่องหมาย ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากผลลัพธ์ของโปรแกรมการหาฟังก์ชันตรีโกณมิติที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.5 (เครื่องหมายบวกกำหนดให้บิต = 0 , เครื่องหมายลบกำหนดให้บิต = 1) ในการรวมกันของเทอมต่าง ๆ ของผลคูณนั้น จะสังเกตเห็นได้ว่าการรวมกันได้ 4 กรณีเท่านั้น คือ

กรณีที่ 1 การรวมโดยการบวกกันทุกเทอม (+,+) ยกตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned} \text{Re}_{0(\text{total})} &= I_a + |\text{Re}_{0(ab)}| + |\text{Re}_{0(ac)}| \\ \text{Im}_{0(\text{total})} &= |\text{Im}_{0(ab)}| + |\text{Im}_{0(ac)}| \end{aligned}$$

กรณีที่ 2 การรวม โดยการลบกันทุกเทอม (-,-) ยกตัวอย่างเช่น

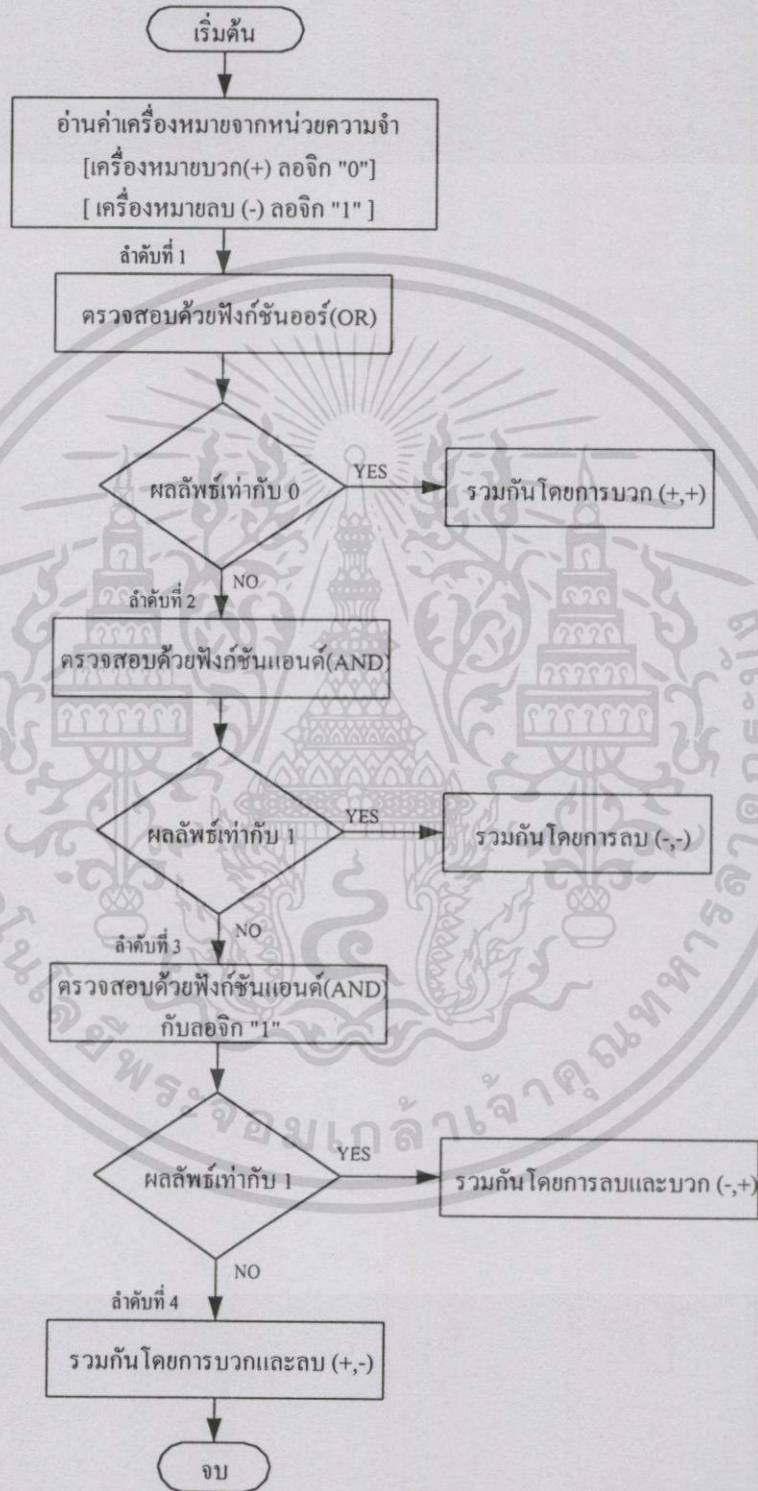
$$\begin{aligned} \text{Re}_{0(\text{total})} &= I_a - |\text{Re}_{0(ab)}| - |\text{Re}_{0(ac)}| \\ \text{Im}_{0(\text{total})} &= -|\text{Im}_{0(ab)}| - |\text{Im}_{0(ac)}| \end{aligned}$$

กรณีที่ 3 การรวม โดยการบวกและลบกันแต่ละเทอม (+,-) ยกตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned} \text{Re}_{0(\text{total})} &= I_a + |\text{Re}_{0(ab)}| - |\text{Re}_{0(ac)}| \\ \text{Im}_{0(\text{total})} &= +|\text{Im}_{0(ab)}| - |\text{Im}_{0(ac)}| \end{aligned}$$

กรณีที 4 การรวม โดยการลบและบวกกันแต่ละเทอม (-,+) ยกตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned} \text{Re}_{0(\text{total})} &= I_a - |\text{Re}_{0(ab)}| + |\text{Re}_{0(ac)}| \\ \text{Im}_{0(\text{total})} &= -|\text{Im}_{0(ab)}| + |\text{Im}_{0(ac)}| \end{aligned}$$



รูปที่ 4.14 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมการหาผลลัพธ์ของ การรวมทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมในการหาผลลัพธ์ของการรวมทั้งส่วนจริงและส่วน จินตภาพตามสมการ (4.27) ถึง (4.32) สามารถแสดงได้ดังโพล์ซาร์ตรูปที่ 4.14 เริ่มจากทำการตรวจสอบว่าแต่ละเทอมมีการกระทำทางคณิตศาสตร์ (บวกหรือลบ) กันอย่างไรบ้างหรือมีการรวมกันอยู่ในกรณีใดจากทั้ง 4 กรณี ซึ่งสามารถอธิบายเป็นลำดับในการตรวจสอบดังนี้

ลำดับที่ 1 ตรวจสอบเพื่อหาการรวมกันโดยการบวกกันทุกเทอม (+,+) โดยใช้การออร์ (OR) กันระหว่างเครื่องหมายของฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่างเฟส a-b กับมุมต่างเฟส a-c เมื่อผลลัพธ์จากการออร์กันเป็น 0 จึงใช้โปรแกรมย่อยในการบวกกันทุกเทอม เพื่อหาผลลัพธ์ของการรวมกัน ถ้าผลลัพธ์เป็น 1 ให้ตรวจสอบต่อไปในลำดับที่ 2 ซึ่งการตรวจสอบในลำดับที่ 1 นี้สามารถเขียนเป็นตารางจริง (Truth Table) ได้ดังนี้

เครื่องหมายทางคณิตศาสตร์		ผลลัพธ์การตรวจสอบ
$Re_{0,1,2(ab)}$	$Re_{0,1,2(ac)}$	O/P
$Im_{0,1,2(ab)}$	$Im_{0,1,2(ac)}$	
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

ลำดับที่ 2 ตรวจสอบเพื่อหาการรวมกันโดยการลบกันทุกเทอม (-,-) โดยใช้การแอนด์ (AND) กัน ระหว่างเครื่องหมายของฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่างเฟส a-b กับมุมต่างเฟส a-c เมื่อผลลัพธ์จากการแอนด์กันเป็น 1 จึงใช้โปรแกรมย่อยในการลบกันทุกเทอม เพื่อหาผลลัพธ์ของการรวมกัน ถ้าผลลัพธ์เป็น 0 ให้ตรวจสอบต่อไปในลำดับที่ 3 ซึ่งสามารถเขียนเป็นตารางจริง ได้ดังนี้

เครื่องหมายทางคณิตศาสตร์		ผลลัพธ์การตรวจสอบ
$Re_{0,1,2(ab)}$	$Re_{0,1,2(ac)}$	O/P
$Im_{0,1,2(ab)}$	$Im_{0,1,2(ac)}$	
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ลำดับที่ 3 ตรวจสอบเพื่อหาการรวมกันโดยการลบและบวกกัน (-,+) โดยใช้การแอนดกันระหว่างเครื่องหมายของฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่างเฟส a-b กับลอจิก 1 เมื่อผลลัพธ์ออกเป็น 1 จึงใช้โปรแกรมย่อยในการลบและบวกกันของในแต่ละเทอม เพื่อหาผลลัพธ์ของการรวมกัน ถ้าผลลัพธ์เป็น 0 ให้ทำงานในลำดับที่ 4 ซึ่งสามารถเขียนเป็นตารางจริง ได้ดังนี้

เครื่องหมายทางคณิตศาสตร์		ผลลัพธ์การตรวจสอบ
Re _{0,1,2(ab)}	กำหนดลอจิก	O/P
Im _{0,1,2(ab)}		
0	1	0
1	1	1

ลำดับที่ 4 เพราะฉะนั้นก็จะเหลือเงื่อนไขสุดท้าย ในการรวมกันคือ การบวกและลบกัน (+,-) จึงใช้โปรแกรมย่อยในการบวกและลบกันในแต่ละเทอม เพื่อหาผลลัพธ์ของการรวมกัน

หลังจากเมื่อได้ผลลัพธ์ การรวมกันของส่วนจริงและส่วนจินตภาพแล้ว จึงนำค่าผลลัพธ์ทั้งหมดมายกกำลังสองและทำการรวมกัน จึงจะได้ว่า

$$(3I_0)^2 = [\text{Re}_{0(\text{total})}]^2 + [\text{Im}_{0(\text{total})}]^2 \quad (4.33)$$

$$(3I_1)^2 = [\text{Re}_{1(\text{total})}]^2 + [\text{Im}_{1(\text{total})}]^2 \quad (4.34)$$

$$(3I_2)^2 = [\text{Re}_{2(\text{total})}]^2 + [\text{Im}_{2(\text{total})}]^2 \quad (4.35)$$

ดังนั้น เพื่อที่จะหาค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้งสามองค์ประกอบ ก็จะต้องมีการถอดรากที่ 2 (Root 2) ของสมการ (4.33), (4.34) และ (4.35) ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_0 = \frac{1}{3} \sqrt{[\text{Re}_{0(\text{total})}]^2 + [\text{Im}_{0(\text{total})}]^2} \quad (4.36)$$

$$I_1 = \frac{1}{3} \sqrt{[\text{Re}_{1(\text{total})}]^2 + [\text{Im}_{1(\text{total})}]^2} \quad (4.37)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} \sqrt{[\text{Re}_{2(\text{total})}]^2 + [\text{Im}_{2(\text{total})}]^2} \quad (4.38)$$

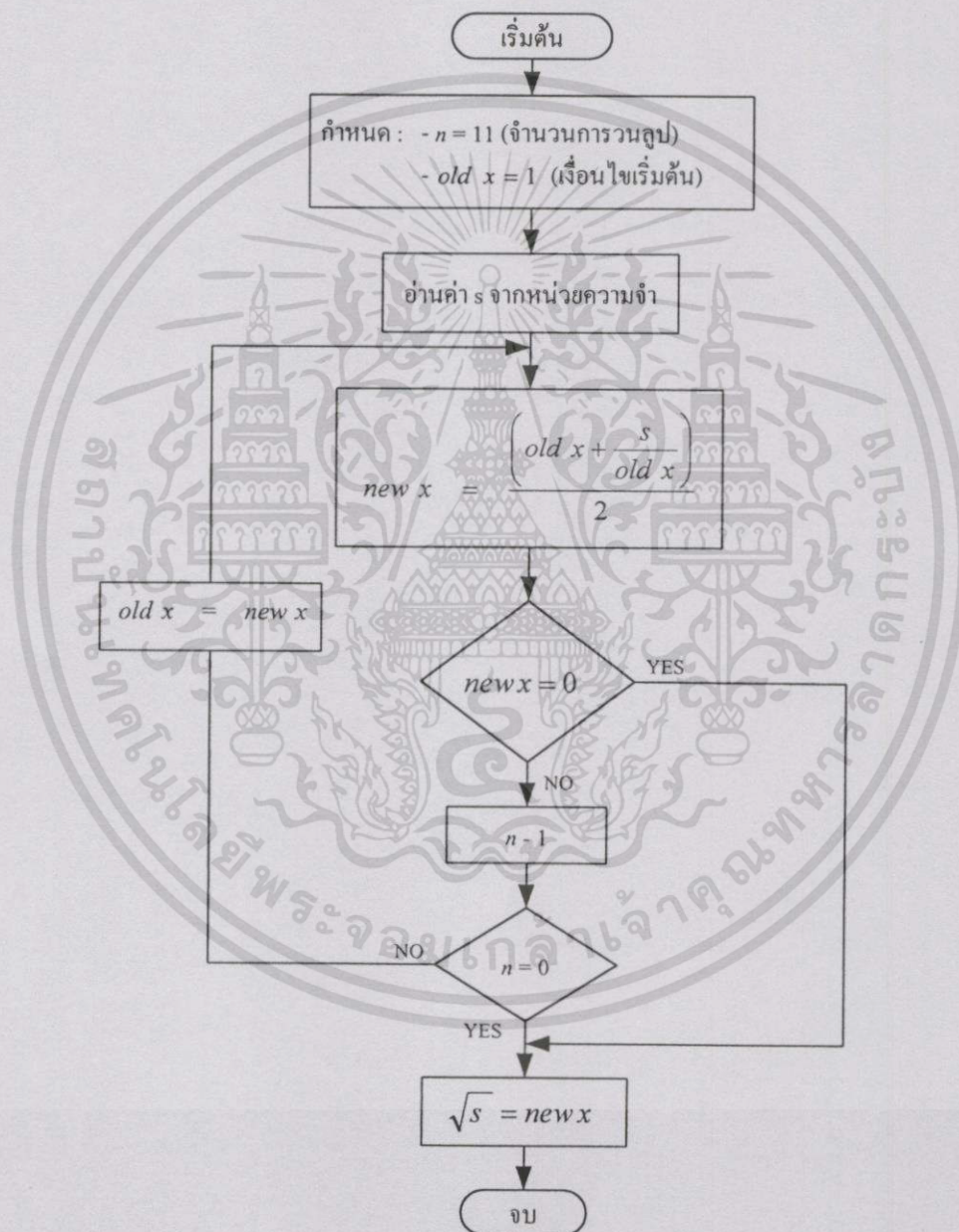
วิธีการถอดรากที่ 2 ของผลรวมส่วนจริงและส่วนจินตภาพยกกำลังสอง สามารถใช้การหาค่าคำตอบได้จากสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$new\ x = \sqrt{s} \quad (4.39)$$

เมื่อ

$$new\ x = \frac{\left(old\ x + \frac{s}{old\ x} \right)}{2} \quad (4.40)$$

กำหนดให้ $x =$ ผลลัพธ์ของการถอดรากที่ 2 $s =$ ค่าตัวแปรที่ต้องการถอดรากรูปที่ 4.15 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมการหาค่ารากที่ 2 ของตัวแปร s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีชาร์ตโปรแกรมในส่วนการถอดรหัที่ 2 สามารถแสดงได้ดังรูป 4.15 เพราะฉะนั้นเมื่อได้ผลลัพธ์จากโปรแกรมการถอดรหัที่ 2 แล้วจึงหารด้วย 3 จะทำให้เราได้ผลลัพธ์ค่ากระแสองค์ประกอบต่าง ๆ ทั้ง 3 องค์ประกอบตามสมการ (4.36),(4.37),(4.38) และจึงนำค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกและลำดับลบมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้า ดังสมการ (3.13)

จากที่กล่าวมาทั้งหมดในเนื้อหาบทที่ 4 เป็นหลักการของโปรแกรมทั้งหมดในส่วนประมวลผลเพื่อที่จะทำการคำนวณหาองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ และค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุล ซึ่งประกอบไปด้วยโปรแกรมหลักดังนี้ 1. โปรแกรมการแปลงอะนาล็อกเป็นดิจิตอล (A to D Converter) 2. โปรแกรมการหาค่ามุมต่างเฟส 3. โปรแกรมการหาค่าประสิทธิผลของสัญญาณกระแส 4. โปรแกรมการการค่าฟังก์ชันตรีโกณมิติ (sin,cos) ของมุมต่างเฟส 5. โปรแกรมคำนวณค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ ซึ่งจากหลักการทำงานของโปรแกรมต่างๆ นั้นจะถูกนำมาเขียนเป็นโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลี(รายละเอียดดังภาคผนวก จ) และทำการพัฒนาเครื่องมือวัดและทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการประมวลผลกับระบบไฟฟ้า 3 เฟสในสภาวะต่างๆ ซึ่งในบทต่อไปจะกล่าวถึงการทดสอบเครื่องมือวัด

บทที่ 5

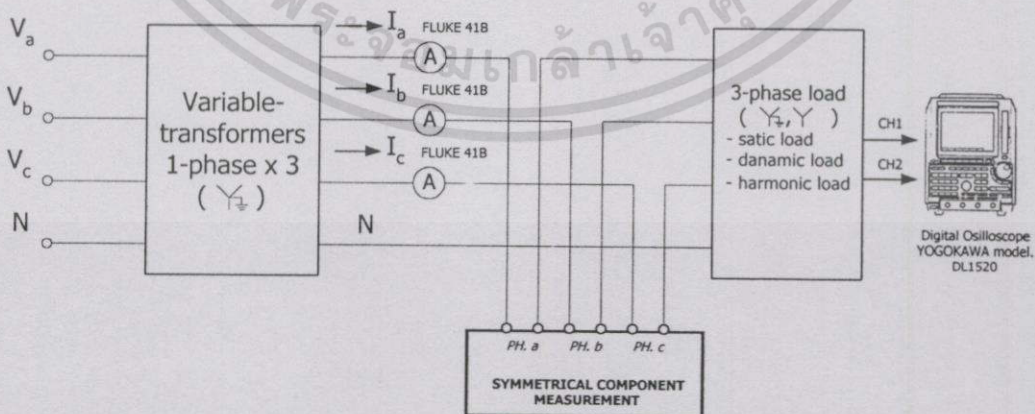
การทดสอบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของ กระแสไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึง การทดสอบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า ในการวัดระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่อยู่ในสถานะค่ากระแสไฟฟ้าเกิดไม่สมดุล โดยมีวัตถุประสงค์ของการทดลอง ดังนี้

1. เพื่อหาค่าความผิดพลาดของค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในกรณีที่กระแสไฟฟ้าของระบบเกิดไม่สมดุล ในสถานะโหลดแบบต่าง ๆ
2. เพื่อศึกษาคุณลักษณะการทำงานของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า ในระบบใช้งานจริง

5.1. การทดลองและอุปกรณ์การทดลอง

ในการทดสอบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า จะทำการจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส ให้เกิดกรณีกระแสไม่สมดุลในสถานะโหลดแบบต่าง ๆ ดังแสดงตามตารางที่ 5.1 และทำการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรด้วยเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น พร้อมทั้งทำการคำนวณค่าองค์ประกอบสมมาตรจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบแสดงค่าความผิดพลาดของค่าองค์ประกอบสมมาตรที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด โดยเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น กำหนดย่านในการวัดกระแสสูงสุดของเครื่องมือวัดเท่ากับ $5 A_{rms}$ ในแต่ละเฟส บล็อกไดอะแกรมของการจำลองระบบเพื่อทดสอบเครื่องมือวัดแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของการจำลองระบบเพื่อทดสอบเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

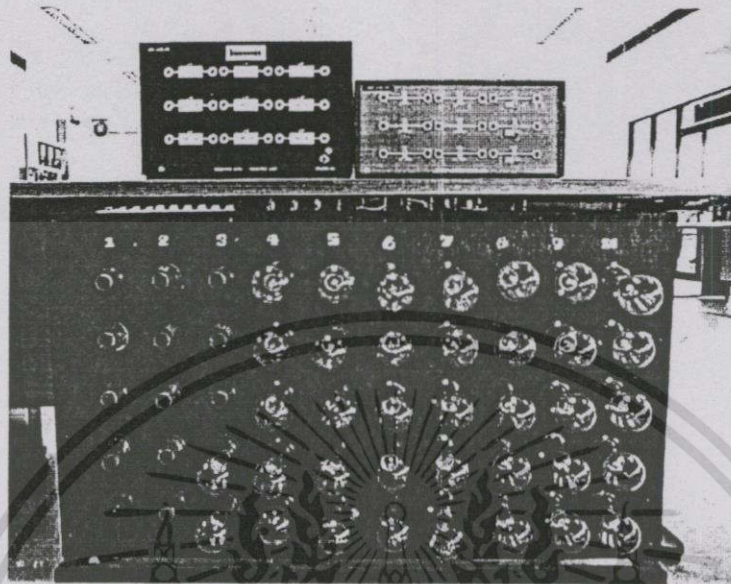
ตารางที่ 5.1 การจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสในการทดสอบเครื่องมือวัด

การทดลอง	ค่ากระแส 3- ϕ	มุมต่างเฟส	โหลด 3-phase	การต่อโหลด
1	Balance	Balance	Static load: Unity P.F. (3- phase)	Star-neutral
2	Unbalance	Balance	Static load: Unity P.F. (3- phase)	Star-neutral
3	Unbalance	Unbalance	Static load: Unity P.F. (ph.a,ph.c), Laging p.f. (ph.b)	Star-neutral
4	Unbalance	Unbalance	Static load: Unity P.F. (ph.a,ph.b), Leading p.f. (ph.c)	Star-neutral
5	Unbalance	Unbalance	Static load: Unity P.F. (3- ϕ)	Star -without neutral
6	Unbalance	Balance	Dynamic load : 3-phase Induction motor	Star-neutral
7	Balance	Balance	Harmonic load : Full wave rectifier and Unity P.F.	Star-neutral

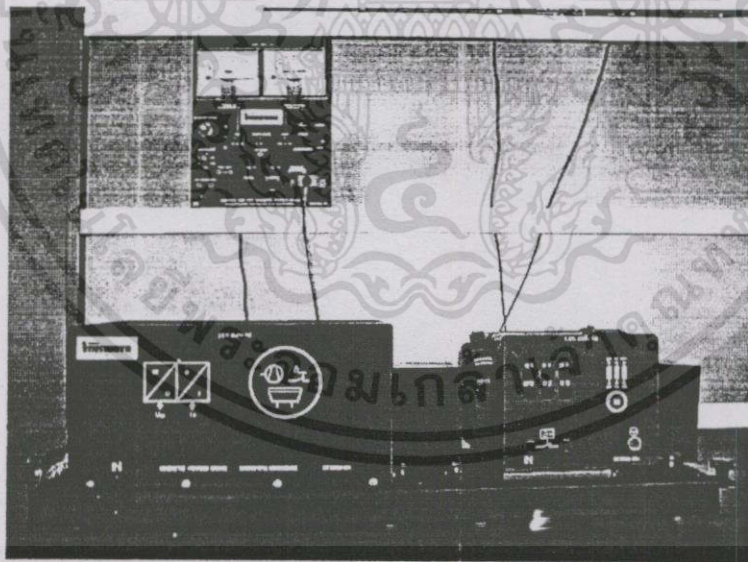
อุปกรณ์การทดลอง

1. Variable Transformers 1 phase (2kVA.,0-260 V.,10 A.),3 ตัว
2. Power meter Fluke model 41B และ Current prob model 80I-500(1-500A.)
3. Digital Oscilloscope Yogokawa model. DL 1520
4. ความต้านทาน 0.1Ω , $\pm 1\%$,2.5 W.,3 ตัว
5. Incandescent lamp load(unity power factor)100W.,45 หลอด
6. Inductance load (lagging power factor) 0.8H,0.6A
7. Capacitance load (leading power factor) 11 μ F,460V.
8. 3-phase Induction motor (dynamic load) 1kW.,2.5A.
9. Full – Bridge Rectifier 10 A.,400 V.(harmonic load)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Capacitor – Filter Rectifier 50 μ F,450V

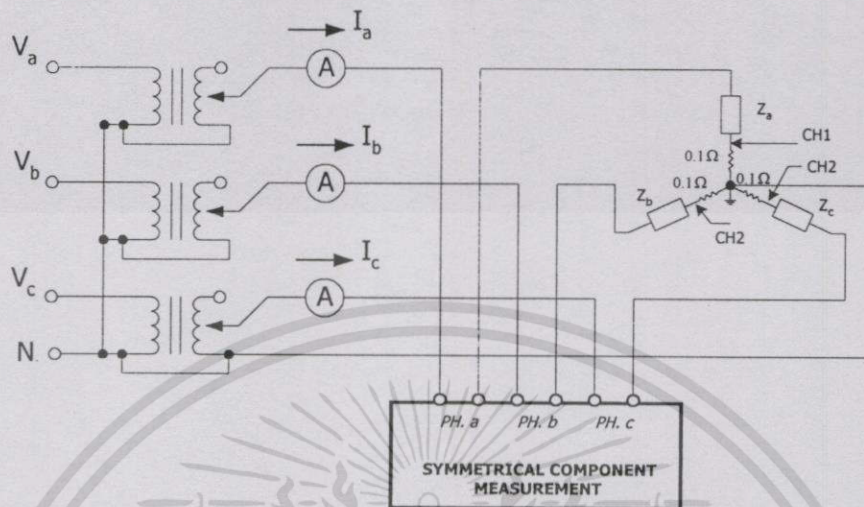
รูปที่ 5.2 ชุด Static load (Incandescent lamp load ,Inductance load ,Capacitance load)



รูปที่ 5.3 ชุด Dynamic Load (3-phase Induction Motor load)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1 การทดลองที่ 1. กรณีกระแสของระบบสมดุล



รูปที่ 5.4 วงจรการทดลองที่ 1.

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.4 โดยให้โหลดทั้ง 3 เฟส (Z_a, Z_b, Z_c) เป็นโหลด unity P.F. (Incandescent lamp load)
2. ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ให้ได้ค่ากระแสเป็นไปตามตารางการทดลองที่ 5.2
3. บันทึกค่าขนาดกระแสทั้ง 3 เฟส และมุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่างเฟส a เทียบกับเฟส b และเฟส a เทียบกับเฟส c ในแต่ละครั้ง (unbalance case) ของการทดลอง
4. บันทึกค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับและค่าระดับความไม่สมดุลจากการประมวลผลของเครื่องมือวัด ในแต่ละครั้ง (unbalance case) ของการทดลอง

ตารางที่ 5.2 ตารางการทดลองที่ 1

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส	
	la	lb	lc	a-b	a-c
1	5.0	5.0	5.0	-120	-240
2	4.5	4.5	4.5	-120	-240
3	4.0	4.0	4.0	-120	-240
4	3.5	3.5	3.5	-120	-240

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)	
	la	lb	lc	a-b	a-c
5	3.0	3.0	3.0	-120	-240
6	2.5	2.5	2.5	-120	-240
7	2.0	2.0	2.0	-120	-240
8	1.5	1.5	1.5	-120	-240
9	1.0	1.0	1.0	-120	-240

5.1.2 การทดลองที่ 2. กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.4 โดยให้โหลดทั้ง 3 เฟส (Z_a, Z_b, Z_c) เป็นโหลด unity P.F. (Incandescent lamp load)
2. ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ให้ได้ค่ากระแสเป็นไปตามตารางการทดลองที่ 5.3
3. บันทึกค่าขนาดกระแสทั้ง 3 เฟส และมุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่างเฟส a เทียบกับเฟส b และเฟส a เทียบกับเฟส c ในแต่ละครั้ง (unbalance case) ของการทดลอง
4. บันทึกค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับและค่าระดับความไม่สมดุลจากการประมวลผลของเครื่องมือวัด ในแต่ละครั้ง (unbalance case) ของการทดลอง

ตารางที่ 5.3 ตารางการทดลองที่ 2

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)	
	la	lb	lc	a-b	a-c
1	5.0	5.0	5.0	-120	-240
2	5.0	4.0	5.0	-120	-240
3	5.0	4.0	4.0	-120	-240
4	5.0	3.0	4.0	-120	-240
5	5.0	3.0	3.0	-120	-240
6	5.0	2.0	3.0	-120	-240
7	5.0	2.0	2.0	-120	-240

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)	
	la	lb	lc	a-b	a-c
8	5.0	1.0	2.0	-120	-240
9	5.0	1.0	1.0	-120	-240
10	5.0	0.0	1.0	-120	-240
11	5.0	0.0	0.0	-120	-240

5.1.3 การทดลองที่ 3. กรณีขนาดและมุมต่างเฟสกระแสของระบบไม่สมดุล (lagging P.F.)

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.4 โดยให้โหลดในเฟส a และเฟส c (Z_a, Z_c) เป็น โหลด unity P.F. (Incandescent lamp load) และ โหลดในเฟส b (Z_b) เป็น โหลด lagging P.F. (Inductance load)

2. ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ให้ได้ค่ากระแสเป็นไปตามตารางการทดลองที่ 5.4 และทำการปรับค่าโหลดในเฟส b เพื่อให้เกิดสภาวะมุมต่างเฟสไม่สมดุล (lagging P.F.) เพิ่มขึ้นในแต่ละครั้ง (unbalance case) ของการทดลอง

3. บันทึกค่าขนาดกระแสทั้ง 3 เฟส และมุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่างเฟส a เทียบกับเฟส b และเฟส a เทียบกับเฟส c ในแต่ละครั้ง (unbalance case) ของการทดลอง

4. บันทึกค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับและค่าระดับความไม่สมดุลจากการประมวลผลของเครื่องมือวัด ในแต่ละครั้ง (unbalance case) ของการทดลอง

ตารางที่ 5.4 ตารางการทดลองที่ 3

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)	
	la	lb	lc	a-b	a-c
1	5	5	5	-120	-240
2	5	4	5	-131	-240
3	5	4	4	-131	-240
4	5	3	4	-134	-240
5	5	3	3	-134	-240
6	5	2	3	-140	-240

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)	
	la	lb	lc	a-b	a-c
7	5	2	2	-140	-240
8	5	1	2	-158	-240
9	5	1	1	-158	-240
10	5	1	0	-193	-240

5.1.4 การทดลองที่ 4. กรณีขนาดและมุมต่างเฟสกระแสของระบบไม่สมดุล(leading P.F.) ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.4 โดยให้โหลดในเฟส a และเฟส b (Z_a, Z_b) เป็น โหลด unity P.F. (Incandescent lamp load) และโหลดในเฟส c (Z_c) เป็นโหลด leading P.F. (Capacitance load)

2. ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ให้ได้ค่ากระแสเป็นไปตามตารางการทดลองที่ 5.5 และทำการปรับค่าโหลดในเฟส c เพื่อให้เกิดสภาวะมุมต่างเฟสไม่สมดุล (leading P.F.) เพิ่มขึ้นในแต่ละครั้ง(unbalance case) ของการทดลอง

3. บันทึกค่าขนาดกระแสทั้ง 3 เฟส และมุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่างเฟส a เทียบกับเฟส b และเฟส a เทียบกับเฟส c ในแต่ละครั้ง(unbalance case) ของการทดลอง

4. บันทึกค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับและค่าระดับความไม่สมดุลจากการประมวลผลของเครื่องมือวัด ในแต่ละครั้ง(unbalance case) ของการทดลอง

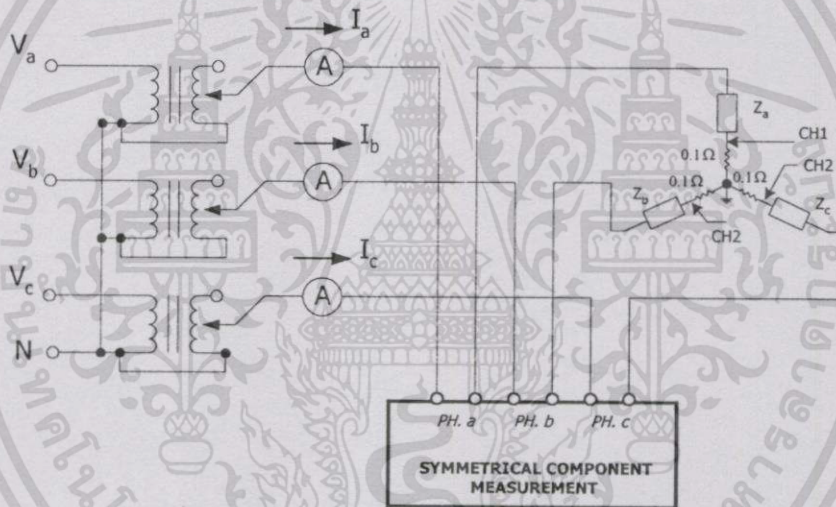
ตารางที่ 5.5 ตารางการทดลองที่ 4

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)	
	la	lb	lc	a-b	a-c
1	5.0	5.0	5.0	-120	-240
2	5.0	5.0	4.0	-120	-227
3	5.0	4.0	4.0	-120	-227
4	5.0	4.0	3.0	-120	-225
5	5.0	3.0	3.0	-120	-225
6	5.0	3.0	2.0	-120	-219

ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)	
	la	lb	lc	a-b	a-c
7	5.0	2.0	2.0	-120	-219
8	5.0	2.0	1.0	-120	-208
9	5.0	1.0	1.0	-120	-208
10	5.0	0.0	1.0	-120	-160

5.1.5 การทดลองที่ 5. กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล (Star –without neutral)



รูปที่ 5.5 วงจรการทดลองที่ 5

ขั้นตอนการทดลอง

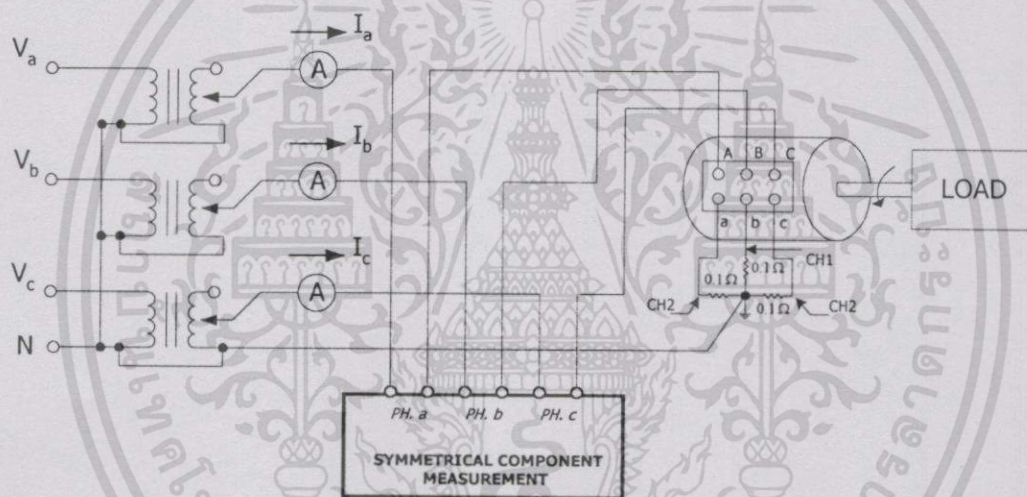
1. ทำการต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.5 โดยให้โหลดทั้ง 3 เฟส (Z_a, Z_b, Z_c) เป็น โหลด unity P.F. (Incandescent lamp load)
2. ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ให้ได้ค่ากระแสเป็นไปตามตารางการทดลองที่ 5.6
3. บันทึกค่าขนาดกระแสทั้ง 3 เฟส และมุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่างเฟส a เทียบกับเฟส b และเฟส a เทียบกับเฟส c ในแต่ละครั้ง (unbalance case) ของการทดลอง
4. บันทึกค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับและค่าระดับความไม่สมดุลจากการประมวลผลของเครื่องมือวัด ในแต่ละครั้ง (unbalance case) ของการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ตารางการทดลองที่ 5

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)	
	la	lb	lc	a-b	a-c
1	5.0	5.0	5.0	-120	-240
2	5.0	4.0	5.0	-116	-227
3	5.0	4.0	4.0	-130	-231
4	5.0	3.0	4.0	-131	-217
5	5.0	3.0	3.0	-150	-210

5.1.6 การทดลองที่ 6 กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล(Dynamic load)



รูปที่ 5.6 วงจรการทดลองที่ 6

ขั้นตอนการทดลอง

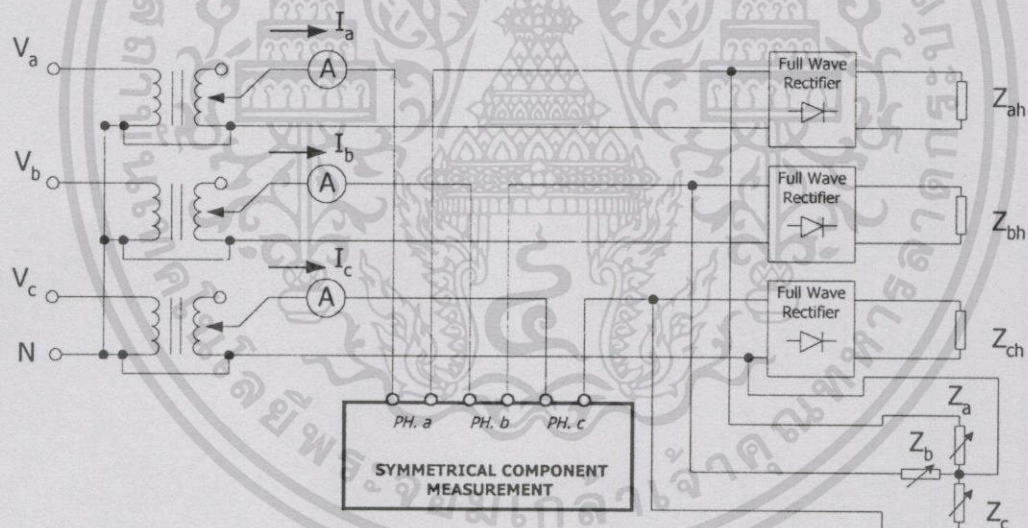
1. ทำการต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.6 โดยให้โหลดของระบบ 3 เฟสเป็น 3-phase Induction motor ขนาด 1kW.,2.5 A.
2. ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส เป็นไปตามตารางการทดลองที่ 5.7 โดยในแต่ละครั้ง(unbalance case) ของการทดลองให้แรงบิดของมอเตอร์มีค่าคงที่ 2 N-M.(60% of full load)
3. บันทึกค่าขนาดกระแสทั้ง 3 เฟส และมุมต่างเฟสของสัญญาณกระแสระหว่างเฟส a เทียบกับเฟส b และเฟส a เทียบกับเฟส c ในแต่ละครั้ง(unbalance case) ของการทดลอง
- 4.บันทึกค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับและค่าระดับความไม่สมดุลจากการประมวลผลของเครื่องมือวัด ในแต่ละครั้ง(unbalance case) ของการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ตารางการทดลองที่ 6

ub. case	ค่าแรงดัน (V_{L-N})			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)	
	Va	Vb	Vc	a-b	a-c
1	220	220	220	-120	-240
2	220	210	220	-120	-240
3	220	210	210	-120	-240
4	220	200	210	-120	-240
5	220	200	200	-120	-240
6	220	190	200	-120	-240
7	220	190	190	-120	-240

5.1.7 การทดลองที่ 7. กรณีวัดค่าสัญญาณกระแสที่มีฮาร์มอนิกส์



รูปที่ 5.7 วงจรการทดลองที่ 7

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.7 โดยให้โหลดทั้งหมด ($Z_a, Z_b, Z_c, Z_{ah}, Z_{bh}, Z_{ch}$) เป็น โหลด unity P.F. (Incandescent lamp load)
2. ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ให้ค่ากระแสคงที่ $3 A_{rms}$ ตลอดการทดลองและทำการปรับค่าโหลด Z_a, Z_b, Z_c เพื่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ (%THD) เพิ่มขึ้นในแต่ละครั้ง (unbalance case) ของการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บันทึกค่าขนาดกระแสทั้ง 3 เฟส และ%THD ในแต่ละครั้ง(unbalance case) ของการทดลอง(สัญญาณกระแสแสดงดังภาคผนวก ก.)

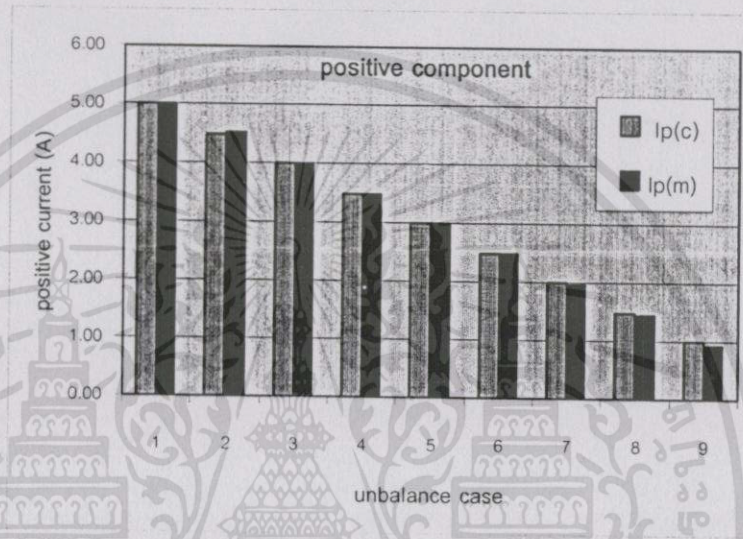
4.บันทึกค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับและค่าระดับความไม่สมดุลจากการประมวลผลของเครื่องมือวัด ในแต่ละครั้ง(unbalance case) ของการทดลอง

ตารางที่ 5.8 ตารางการทดลองที่ 7

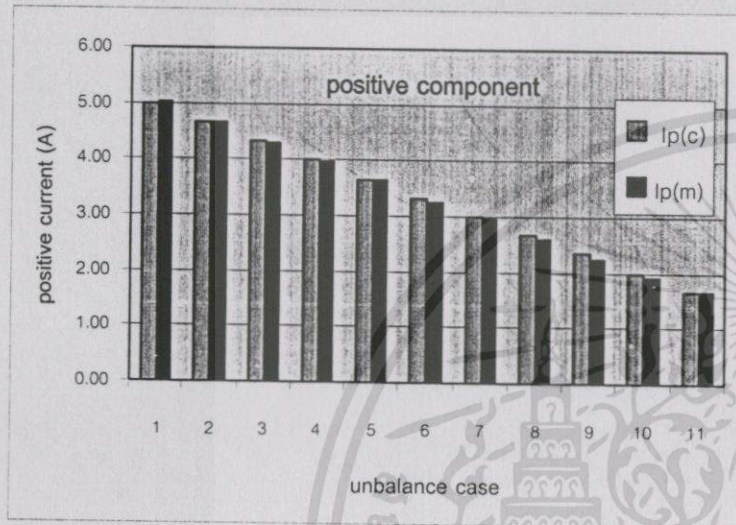
ub. case	ค่ากระแสไลน์(A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)	
	Ia(%THD)	Ib(%THD)	Ic(%THD)	a-b	a-c
1	3.0 (0%)	3.0 (0%)	3.0 (0%)	-120	-240
2	3.0 (13%)	3.0 (11%)	3.0 (14%)	-120	-240
3	3.0 (21%)	3.0 (17%)	3.0 (22%)	-120	-240
4	3.0 (31%)	3.0 (25%)	3.0 (31%)	-120	-240
5	3.0 (48%)	3.0 (41%)	3.0 (43%)	-120	-240
6	3.0 (55%)	3.0 (48%)	3.0 (48%)	-120	-240
7	3.0 (63%)	3.0 (56%)	3.0 (57%)	-120	-240

5.2 ผลการทดลอง

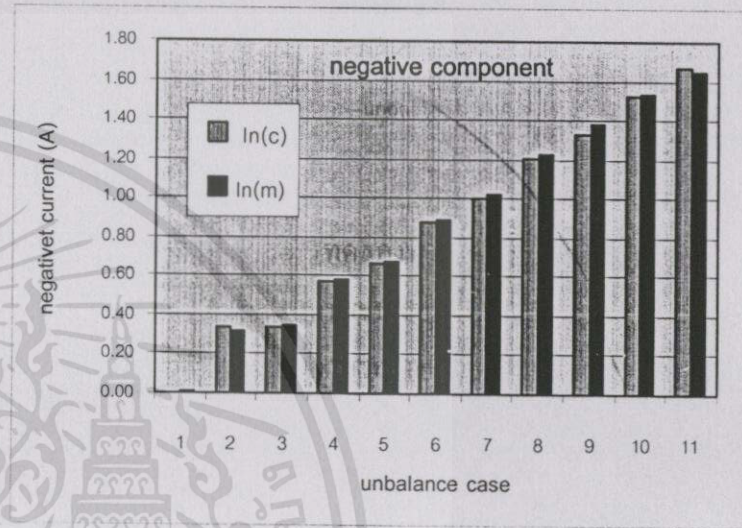
จากการทดลองในแต่ละการทดลอง จะนำค่ากระแส(อ่านได้จากFLUKE 41B)และค่ามุมต่างเฟส(อ่านได้จากYOGOKAWA DL1520 แสดงรายละเอียดดังภาคผนวก ก) ที่ทำการปรับตามตารางการทดลองมาคำนวณหาค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่างๆ ตามสูตรในทางทฤษฎี และนำค่าที่คำนวณได้นี้มาเปรียบเทียบกับค่าองค์ประกอบสมมาตรที่บันทึกได้จากเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น โดยสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่างๆ จากค่าที่คำนวณกับค่าที่บันทึกได้จากเครื่องมือวัดในแต่ละการทดลองได้ดังรูปที่ 5.8ถึงรูปที่5.28(ตารางบันทึกผลการทดลองแสดงดังภาคผนวก.)



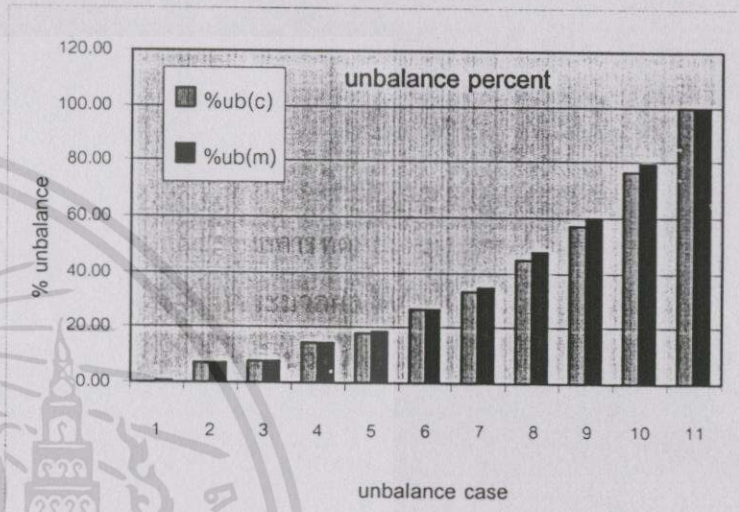
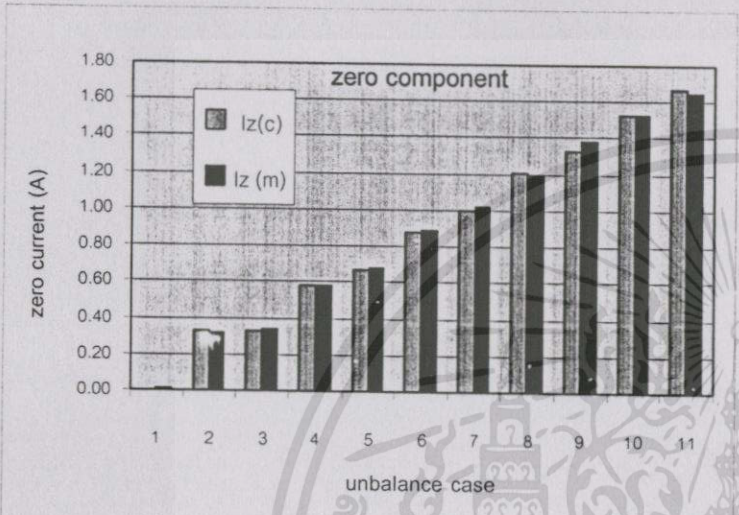
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 1. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{p(m)}$] กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{p(c)}$]



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 2. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
 สมมาตรลำดับบวกที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{p(m)}$]
 กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{p(c)}$]

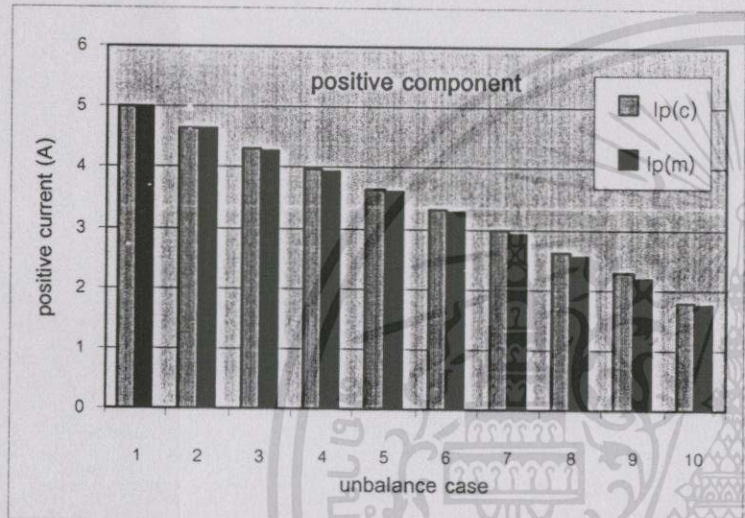


รูปที่ 5.10 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 2. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
 สมมาตรลำดับลบที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{n(m)}$]
 กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{n(c)}$]

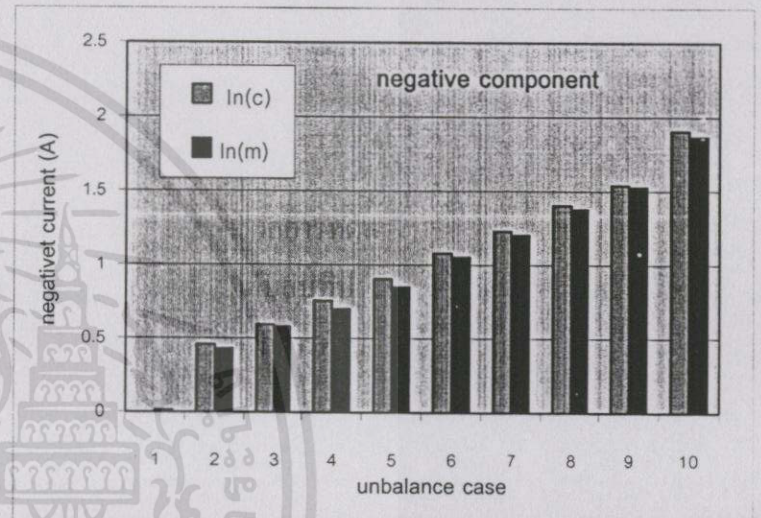


รูปที่ 5.11 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 2. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
 สมมาตรลำดับศูนย์ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{z(m)}$]
 กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{z(c)}$]

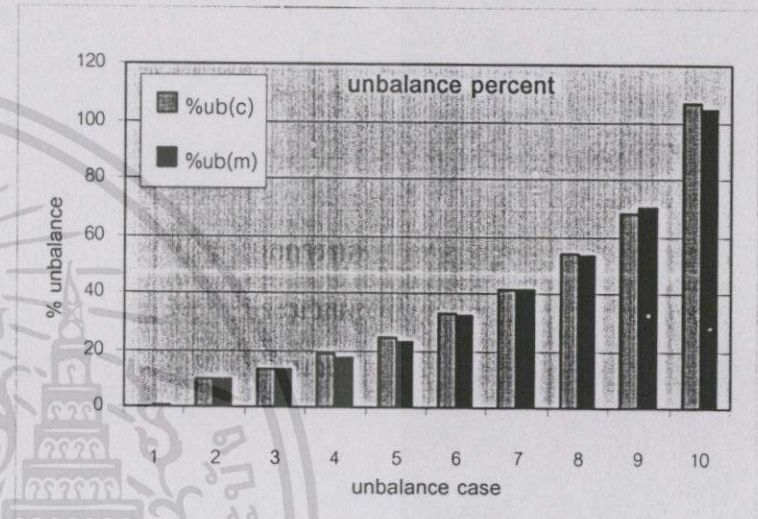
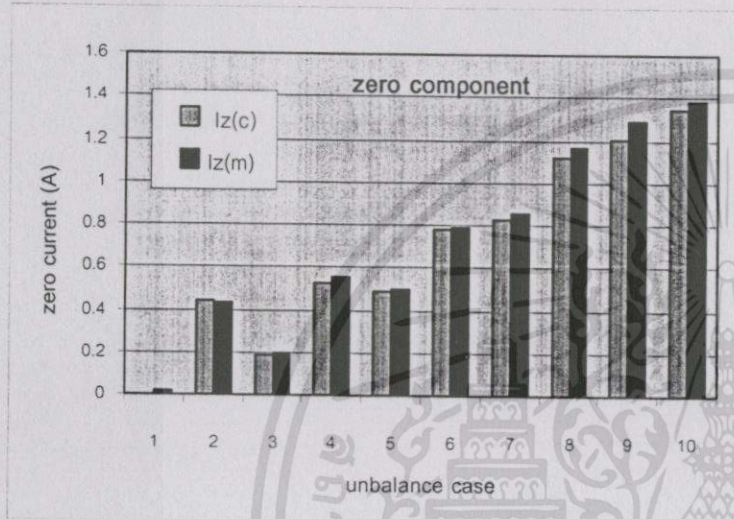
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 2. เปรียบเทียบค่าระดับความ
 ไม่สมดุลที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [%ub(m)] กับค่า
 ที่ได้จากการคำนวณ [%ub(c)]



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 3. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
สมมาตรลำดับบวกที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{p(m)}$]
กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{p(c)}$]

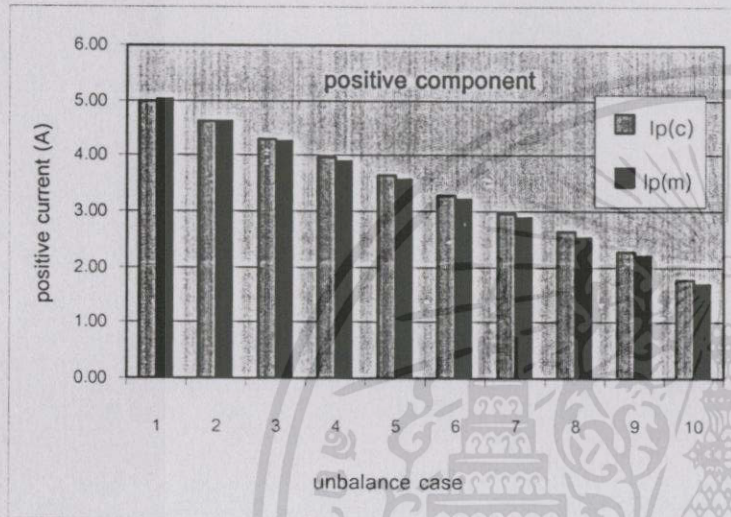


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 3. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
สมมาตรลำดับลบที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{n(m)}$]
กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{n(c)}$]

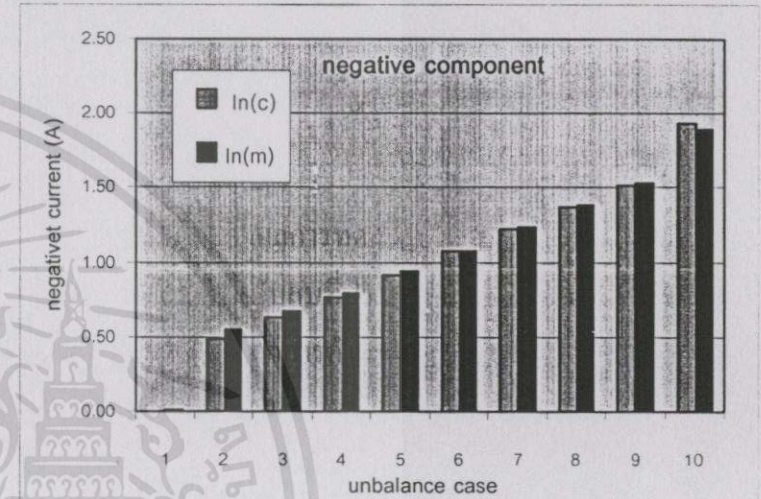


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 3. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
สมมาตรลำดับศูนย์ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{z(m)}$]
กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{z(c)}$]

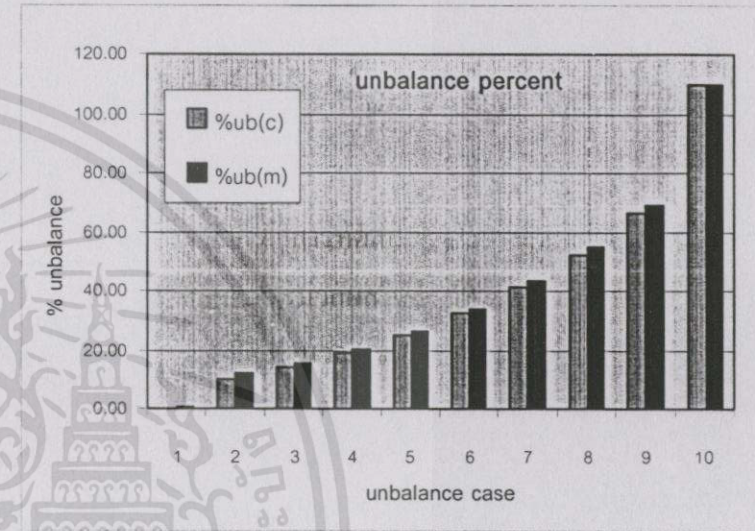
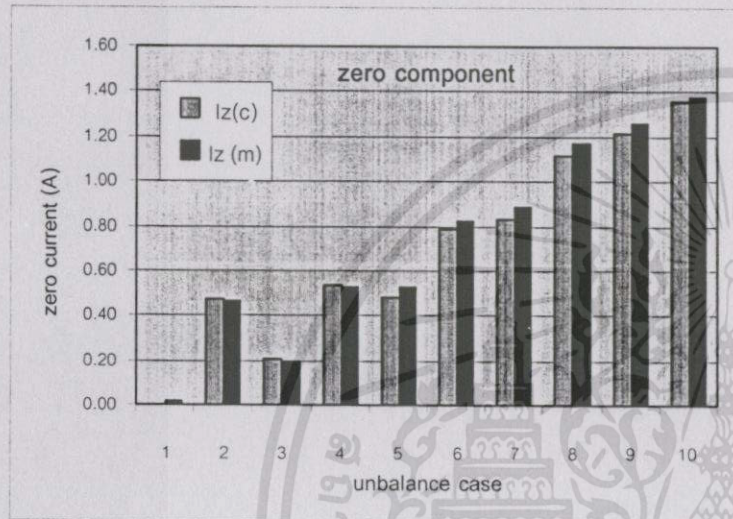
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 3. เปรียบเทียบค่าระดับความ
ไม่สมดุลที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [%ub_(m)] กับค่า
ที่ได้จากการคำนวณ [%ub_(c)]



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 4. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
 สมมาตรลำดับบวกที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{p(m)}$]
 กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{p(c)}$]

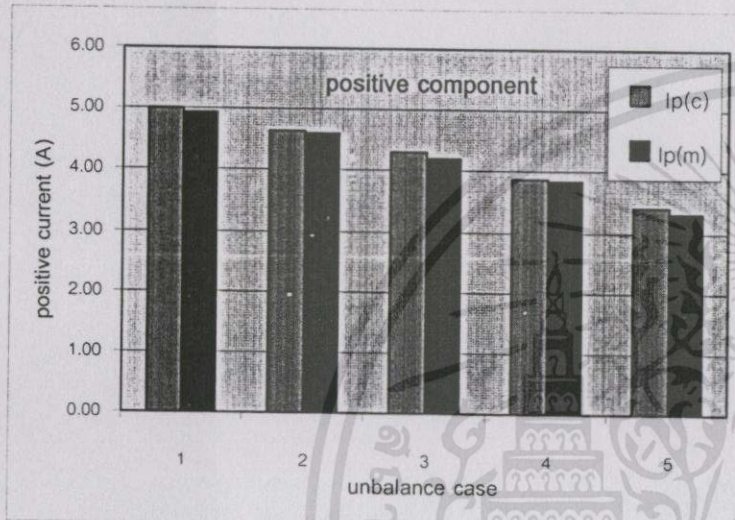


รูปที่ 5.18 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 4. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
 สมมาตรลำดับลบที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{n(m)}$]
 กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{n(c)}$]

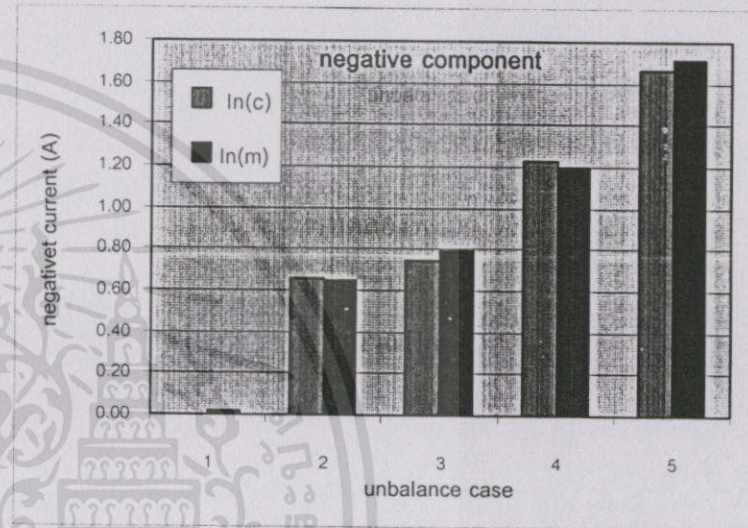


รูปที่ 5.19 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 4. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
สมมาตรลำดับศูนย์ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{z(m)}$]
กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{z(c)}$]

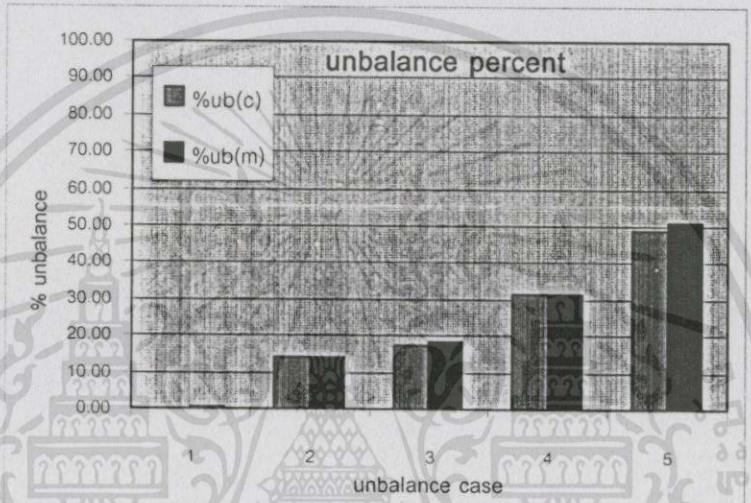
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 4. เปรียบเทียบค่าระดับความ
ไม่สมดุลที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [%ub_(m)] กับค่า
ที่ได้จากการคำนวณ [%ub_(c)]



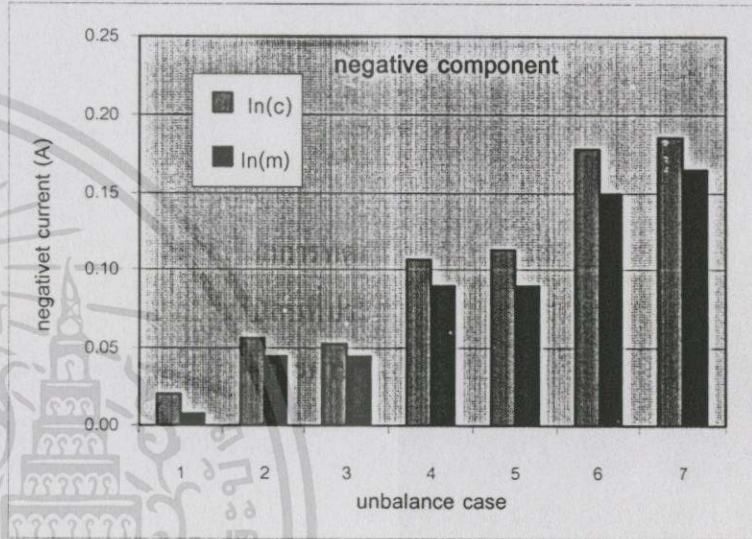
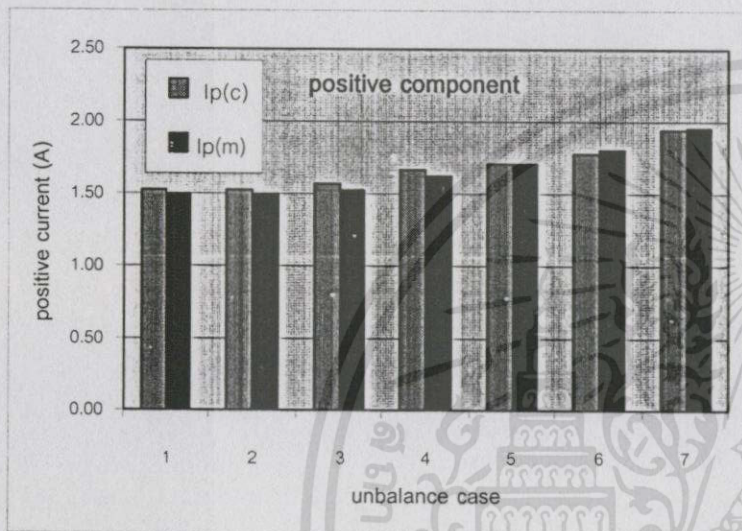
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 5. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
สมมาตรลำดับบวกที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{p(m)}$]
กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{p(c)}$]



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 5. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
สมมาตรลำดับลบที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{n(m)}$]
กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{n(c)}$]

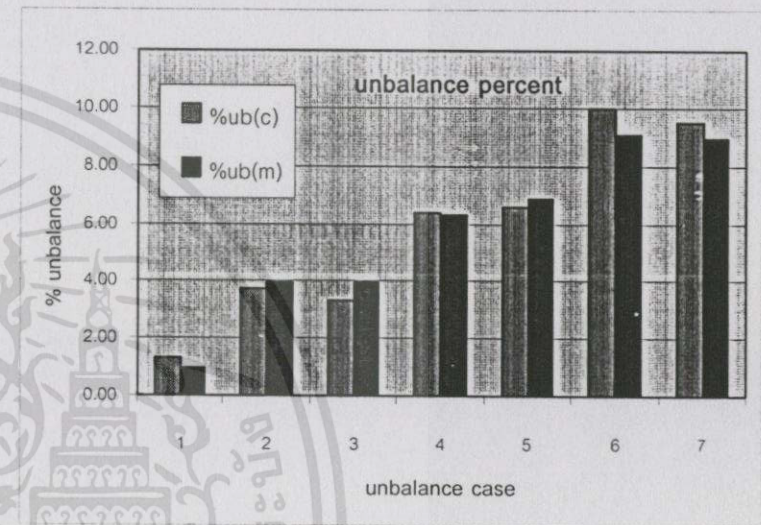
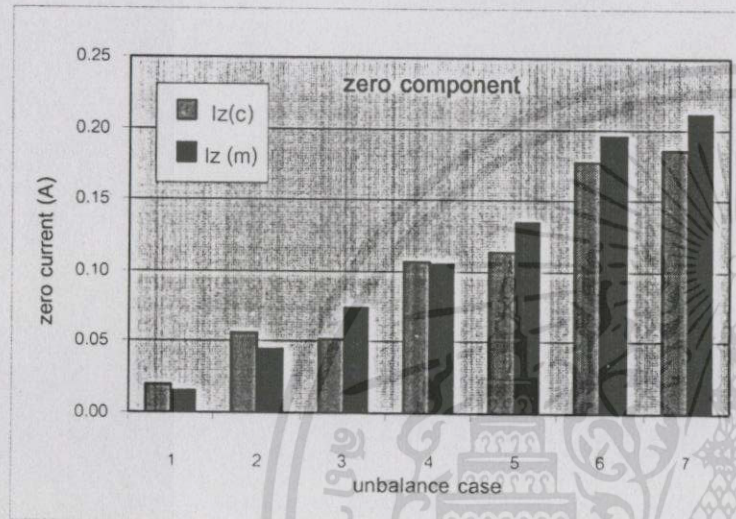


รูปที่ 5.23 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 5. เปรียบเทียบค่าระดับความไม่สมดุลที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด[%ub_(m)] กับค่าที่ได้จากการคำนวณ[%ub_(c)]



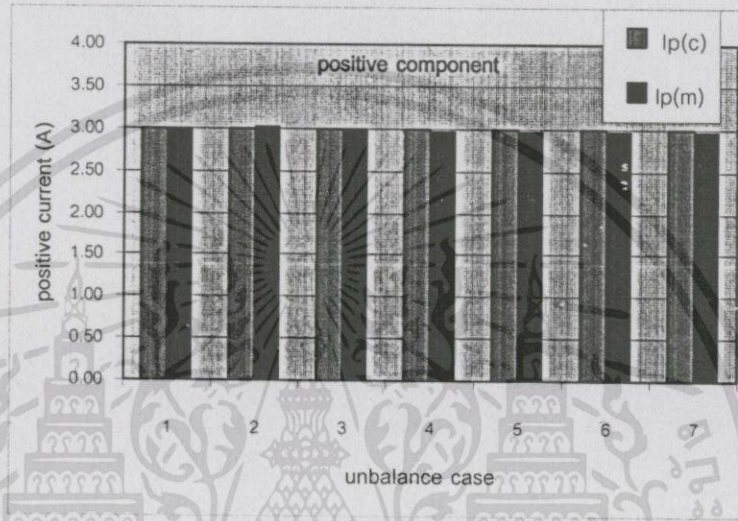
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 6. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
 สมมาตรลำดับบวกที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{p(m)}$]
 กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{p(c)}$]

รูปที่ 5.25 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 6. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
 สมมาตรลำดับลบที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{n(m)}$]
 กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{n(c)}$]



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 6. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบ
สมมาตรลำดับศูนย์ที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{z(m)}$]
กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{z(c)}$]

รูปที่ 5.27 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 6. เปรียบเทียบค่าระดับความ
ไม่สมดุลที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [%ub_(m)] กับค่า
ที่ได้จากการคำนวณ [%ub_(c)]



รูปที่ 5.28 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 7. เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด [$I_{p(m)}$] กับค่าที่ได้จากการคำนวณ [$I_{p(c)}$]

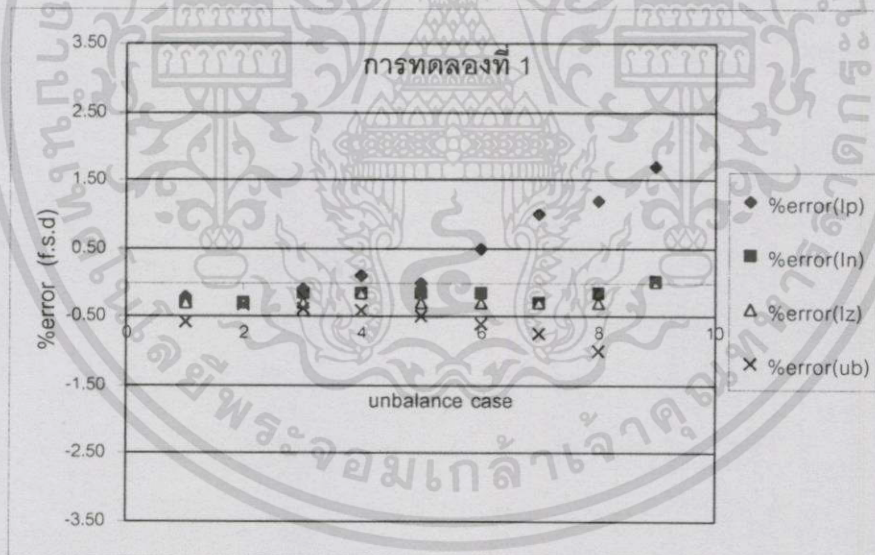
5.3 ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัด

จากการทดสอบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรโดยทำการจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส ให้กระแสของระบบเกิดสถานะสมดุลและไม่สมดุล ในการต่อโหลดแบบต่าง ๆ เพื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของค่าองค์ประกอบสมมาตรที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น กับค่าการคำนวณในทางทฤษฎี โดยค่าความผิดพลาดจะพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์ความบ่ยเบนเต็มสเกล(full scale deflection หรือ f.s.d.)[17] ดังสมการ

$$\%error (f.s.d) = \left(\frac{Y_n - x_n}{full - scale} \right) 100\% \quad (5.1)$$

เมื่อ y_n = ค่าที่คำนวณทางทฤษฎี
 x_n = ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัด
 $full-scale$ = ย่านในการวัด (5 A.)

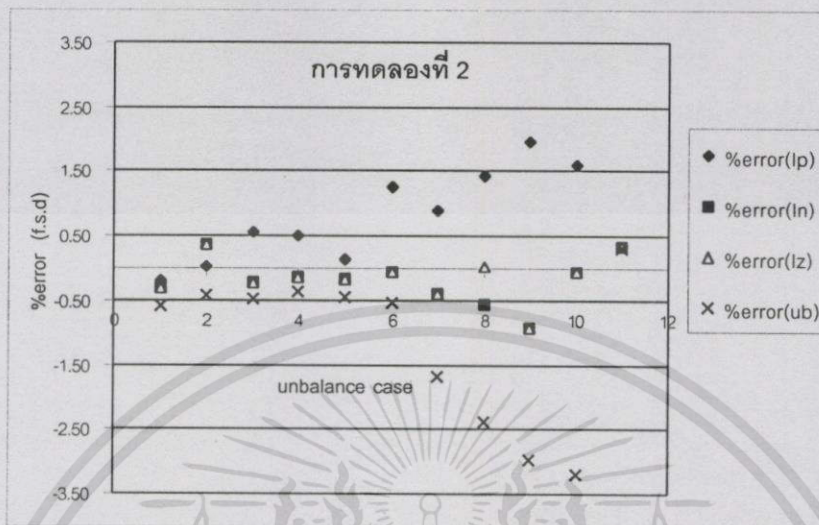
ซึ่งสามารถแสดงค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดแต่ละการทดลองดังรูปที่ 5.29 ถึง 5.33



รูปที่ 5.29 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 1

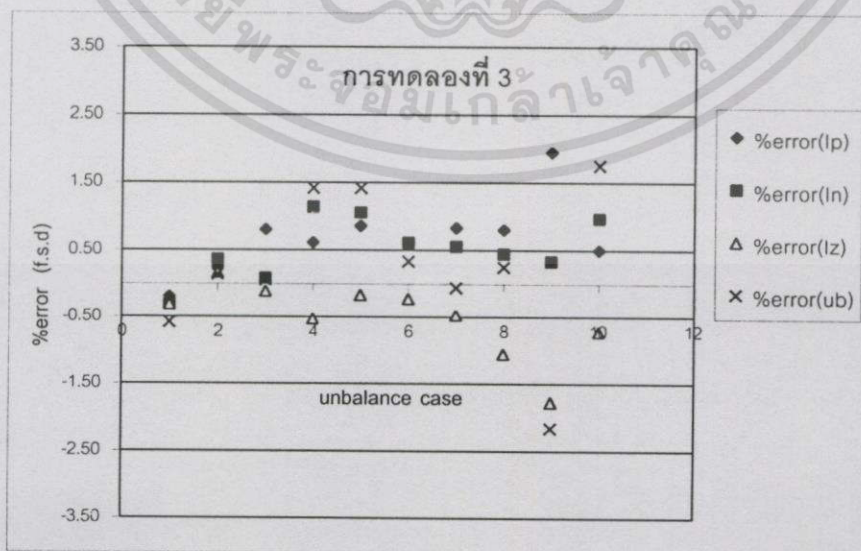
จากการทดลองที่ 1 กรณีกระแสของระบบสมดุล ทำการทดลองเพื่อพิจารณาค่าความผิดพลาด จากการประมวลผลของเครื่องมือวัดในตลอดย่านการวัด (0-5 Arms.) จะเห็นได้ว่าเมื่อค่ากระแสของระบบไฟฟ้ามีค่าลดลง ค่าองค์ประกอบสมมาตรและค่าระดับความไม่สมดุลที่ได้จากการประมวลผลของเครื่องมือวัดมีค่าความผิดพลาดสูงขึ้น ซึ่งสาเหตุหลักมาจากความละเอียด (Resolution) จากการประมวลผลดิจิทัลของเครื่องมือวัด (ซึ่งในการประมวลผลใช้ข้อมูล 8 บิต) จึง

ทำให้การเก็บข้อมูลที่ค่ากระแสต่ำ ๆ ของย่านการวัด (5 Arms.) มีความผิดพลาดสูงขึ้น รวมถึงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส



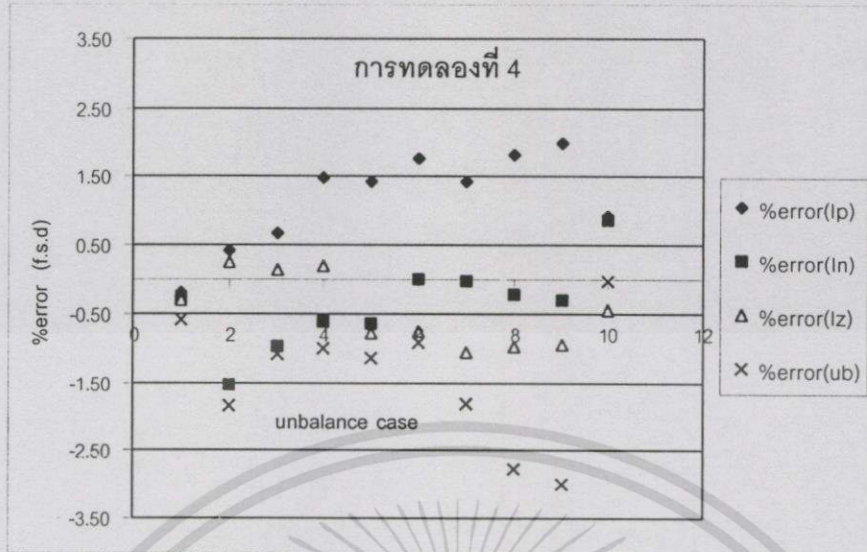
รูปที่ 5.30 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 2

จากการทดลองที่ 2 กรณีขนาดของกระแสของระบบไม่สมดุล ทำการทดลองเพื่อพิจารณา ค่าความผิดพลาด จากการประมวลผลของเครื่องมือวัดในการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรและระดับความไม่สมดุลจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสของระบบให้เกิดความไม่สมดุลแต่มีค่าเฟสระหว่างกระแสทั้ง 3 เฟสยังคงสมดุล ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 2 นี้จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อค่ากระแสของระบบไฟฟ้ามีค่าลดลง เหตุผลหลักมาจากผลของการทดลองที่ 1 และค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ในส่วนของ โปรแกรมการคำนวณค่าองค์ประกอบสมมาตรและค่าระดับความไม่สมดุล



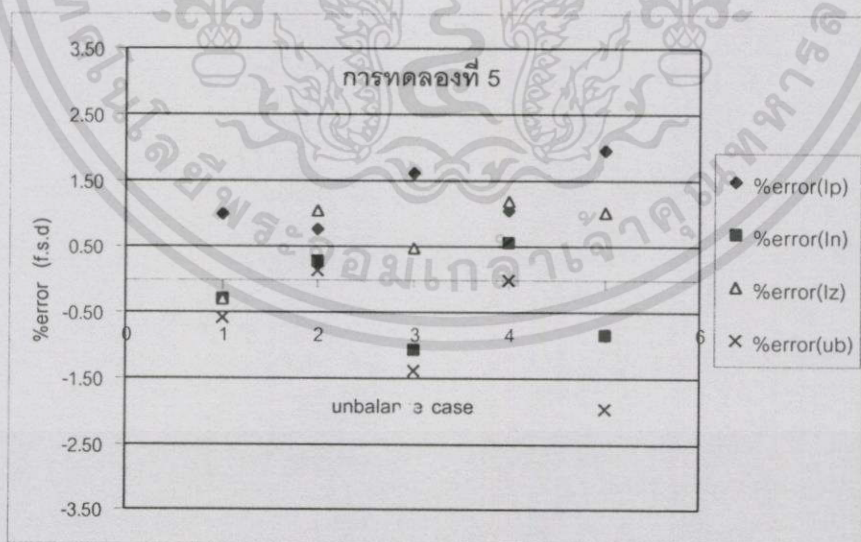
รูปที่ 5.31 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.32 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 4

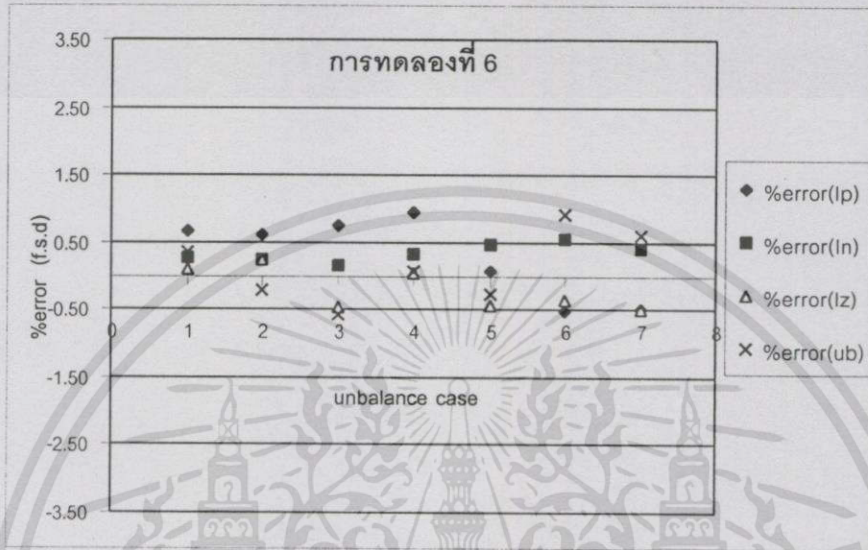
จากการทดลองที่ 3 และ 4 ทำการทดลองเพื่อพิจารณาค่าความผิดพลาด ของเครื่องมือวัด เมื่อเกิดสภาวะไม่สมดุลทั้งค่ากระแสและมุมต่างเฟสของกระแส โดยระบบเป็นทั้งโหลดอินดักทีฟ (P.F.lagging) และ โหลดคาปาซิทีฟ (P.F.leading) ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากสาเหตุ ดังการทดลองที่ 1 และ 2 และข้อมูลมุมต่างเฟสที่นำไปประมวลมีค่าความผิดพลาดจากวงจรดิแวลต์ ออปแอมป์ของส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า (Input Part) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลไปประมวลผลจึงเกิดความผิดพลาดขึ้นในการคำนวณ



รูปที่ 5.33 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 5

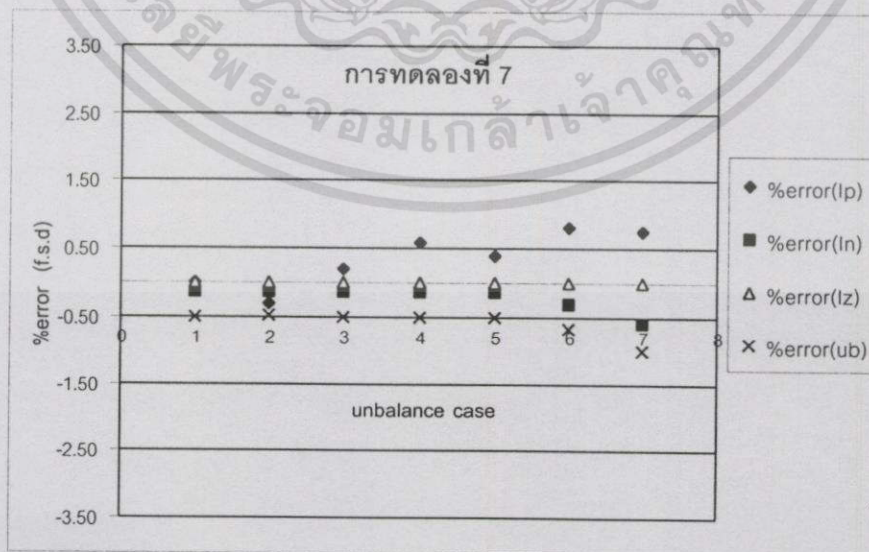
จากการทดลองที่ 5 ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์เครื่องมือวัดเมื่อทำการวัดในสภาวะระบบ ไฟฟ้าไม่สมดุล โดยโหลดของระบบต่อแบบสตาร์ไม่มีนิวทรอล (Star without neutral) จากวงจร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองจะพบว่าค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ของระบบมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจากการประมวลผลของเครื่องวัดก็ให้ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ มีค่าใกล้เคียงศูนย์มาก สาเหตุของความผิดพลาดของการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรและค่าระดับความไม่สมดุล คงมาจากสาเหตุ ดังกล่าวมาแล้วจากการทดลองข้างต้น



รูปที่ 5.34 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 6

จากการทดลองที่ 6 ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรสามารถใช้วัดค่าในสภาวะระบบไฟฟ้าไม่สมดุล โดยให้โหลดของระบบเป็นโหลดแบบไดนามิก (Dynamic load) ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี โดยค่าความผิดพลาดดังสาเหตุที่กล่าวมาแล้วในการทดลองข้างต้น

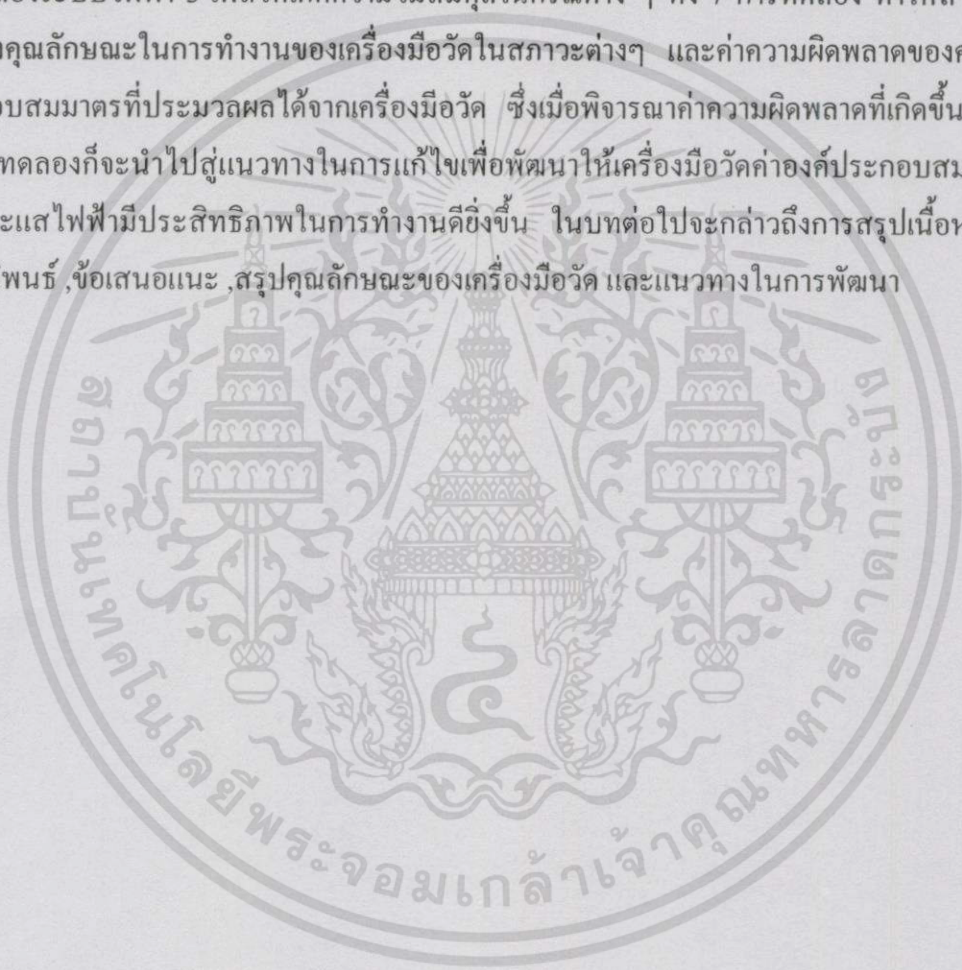


รูปที่ 5.35 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองที่ 7 ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น สาเหตุทำการวัด ค่าองค์ประกอบสมมาตรและระดับความไม่สมดุลของกระแสในสภาวะที่สัญญาณกระแสไฟฟ้า ของระบบมีฮาร์มอนิกส์ปะปน ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อค่า %THD. ของสัญญาณกระแส ในระบบมากขึ้น ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดองค์ประกอบสมมาตรก็มีค่ามากขึ้นด้วย สาเหตุ ค่าความผิดพลาดมาจากการประมวลผลในส่วนของการหาค่าประสิทธิผล (RMS.) ของสัญญาณ กระแสมีความผิดพลาดมากขึ้น เมื่อ ค่า %THD. ของสัญญาณกระแสในระบบมากขึ้น

จากการทดสอบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้น โดยการจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสให้เกิดความไม่สมดุลในกรณีต่าง ๆ ทั้ง 7 การทดลอง ทำให้สามารถสรุปถึงคุณลักษณะในการทำงานของเครื่องมือวัดในสภาวะต่างๆ และค่าความผิดพลาดของค่าองค์ ประกอบสมมาตรที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัด ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละ การทดลองก็จะนำไปสู่แนวทางในการแก้ไขเพื่อพัฒนาให้เครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตร ของกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการทำงานดียิ่งขึ้น ในบทต่อไปจะกล่าวถึงการสรุปเนื้อหาของ วิทยานิพนธ์, ข้อเสนอแนะ, สรุปคุณลักษณะของเครื่องมือวัด และแนวทางในการพัฒนา



บทที่ 6

สรุป และ ข้อเสนอแนะ

6.1 ผลการวิจัย

ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่เกิดสถานะไม่สมดุล แต่การคำนวณค่าองค์ประกอบสมมาตรในระบบไฟฟ้าที่ใช้งานจริงยังมีความยุ่งยากเพราะระบบมีการเชื่อมต่อกันอย่างซับซ้อนรวมไปถึงมีการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในส่วนต่างๆ อยู่ตลอดเวลา ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอหลักการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าในลำดับต่างๆ ซึ่งช่วยลดความยุ่งยากในการคำนวณและยังให้ผลจริงในเวลาขณะนั้นๆ ของระบบไฟฟ้า โดยสมมุติฐานที่ว่าค่าการคำนวณองค์ประกอบสมมาตรสามารถคำนวณได้จากค่าเฟสเซอร์ (ขนาดและมุมต่างเฟส) ของสัญญาณกระแสทั้ง 3 เฟส โดยสามารถเขียนเป็นสมการสำหรับการประมวลผลหาขนาดองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 องค์ประกอบที่อยู่ในเทอมของเฟสเซอร์กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ใช้หลักการวัดในรูปแบบของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผลเพื่อหาค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ จากค่าเฟสเซอร์ของสัญญาณกระแสในแต่ละเฟส ซึ่งการออกแบบเครื่องมือวัดจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้

1. ส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า (Input Part) จะเป็นส่วนที่รับค่าสัญญาณกระแสจากระบบไฟฟ้าแล้วแปลงค่าสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะส่งไปประมวลผล (Signal Conditioning Circuit) การออกแบบในส่วนรับสัญญาณป้อนเข้าจะให้เอาท์พุทออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1. สัญญาณกระแสเพื่อประมวลผลหาขนาดของกระแสในแต่ละเฟส และส่วนที่ 2. สัญญาณการเริ่มต้นของกระแสในแต่ละเฟสเพื่อประมวลผลหาค่ามุมต่างเฟสของกระแส โดยประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- 1.1 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส (Current Sensor) จะทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณกระแสในแต่ละเฟสแล้วเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกัน ในการวิจัยเครื่องมือวัดนี้จะเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแสแบบ Hall Device

1.2 วงจรกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง (Active Lowpass Filter) เนื่องจากสัญญาณรบกวนความถี่สูงอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการนำค่าสัญญาณไปประมวลผล ดังนั้นจึงต้องมีวงจรที่ใช้ในการลดทอนสัญญาณในช่วงที่ความถี่สูงมาช่วยกำจัดสัญญาณรบกวน ก็คือวงจรแบบกรองความถี่ต่ำ (Active Lowpass Filter) ในการพัฒนาเครื่องมือวัดเลือกใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทที่มีค่าความชันในการลดลงของอัตราขยายเป็น -40 เดซิเบล/เดคาเด

1.3 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแสเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงดันอ้างอิงจากส่วนการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ และอีกจุดประสงค์หนึ่งของวงจรถ่ายสัญญาณก็เพื่อใช้ในการปรับแต่งขนาดของสัญญาณในการปรับเทียบ (Calibrate) กับเครื่องมือวัดมาตรฐาน

1.4 วงจรแปลงสัญญาณเต็มรูปคลื่น (Full-wave rectifier) ทำหน้าที่เปลี่ยนระดับสัญญาณให้อยู่ในระดับบวกเสมอ เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขของค่าแรงดันอ้างอิงในส่วนของ การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตในส่วนนี้ถูกนำไปใช้ประมวลผลหาค่าขนาดของกระแสในแต่ละเฟส

1.5 วงจรตรวจจับสัญญาณตัดผ่านศูนย์ (Zero-Crossing Detector) ทำหน้าที่เป็นวงจรที่ใช้ตรวจสอบเวลาเริ่มต้นของระดับสัญญาณกระแสในแต่ละเฟส เอาต์พุตของวงจรมีค่าเป็นสัญญาณดิจิทัลหาค่าเวลาต่างเฟสระหว่างเฟส a กับเฟส b และเฟส a กับเฟส c เพื่อหาค่ามุมต่างเฟสสำหรับการคำนวณค่าองค์ประกอบสมมาตร

2. ส่วนประมวลผล (Processing Part) เป็นส่วนที่รับสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า (Input Part) เข้ามาประมวลผลหาค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่างๆ และค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุลของระบบ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C535 ขนาด 8 บิตเป็นหน่วยประมวลผล โปรแกรมในการประมวลผลสามารถแบ่งออกเป็น ส่วน ๆ ดังนี้

2.1 โปรแกรมแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล (A to D Converter) โปรแกรมจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณอะนาล็อกของสัญญาณกระแสในแต่ละเฟสจากวงจรแปลงสัญญาณเต็มรูปคลื่น (Full Wave Rectifier) เป็นข้อมูลดิจิทัล โปรแกรมทำการแปลงสัญญาณในเฟส a, เฟส b และเฟส c ตามลำดับ โดยใช้คาบเวลาในการสุ่มข้อมูล (Sampling Rate) เท่ากับ $78 \mu S$

2.2 โปรแกรมหาค่ามุมต่างเฟส การประมวลผลของโปรแกรมจะอาศัยการทำงานในภาคแคปเจอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการเก็บค่าเวลาเริ่มต้นของสัญญาณกระแส โดยตรวจสอบจากวงจรตรวจจับสัญญาณตัดผ่านศูนย์ (Zero-Crossing Detector) และโปรแกรมจะทำการประมวลผลหาค่าเวลาต่างเฟสจากการเปรียบเทียบข้อมูลค่าเวลาเริ่มต้นระหว่างเฟส a กับเฟส b และเฟส a กับเฟส c และจึงนำค่าเวลาต่างเฟสมาคำนวณหามุมต่างเฟส

2.3 โปรแกรมหาค่าประสิทธิภาพ (R.M.S.) ของสัญญาณกระแส การหาค่าประสิทธิภาพของสัญญาณกระแสในแต่ละเฟส โปรแกรมจะประมวลผลจากค่าข้อมูลดิจิทัล $[I(n)]$ ของสัญญาณกระแสที่ได้จากการซักข้อมูล(Sampling)ตามสมการ (4.13)

2.4 โปรแกรมการหาค่าฟังก์ชันตรีโกณมิติ (sin ,cos) ของมุมต่างเฟส การหาค่าฟังก์ชัน sin และ cos ของมุมต่างเฟส เพื่อใช้ในการประมวลผลหาค่าองค์ประกอบสมมาตรนั้น ใช้วิธีการเขียนค่าของฟังก์ชัน sin ตั้งแต่มุม 0 ถึง 90 องศาเก็บไว้ในหน่วยความจำในรูปแบบของตารางข้อมูล และจึงนำค่ามุมต่างเฟสที่ได้จากผลลัพธ์ของโปรแกรมการหาค่ามุมต่างเฟสมาทำการเปรียบเทียบกับตารางข้อมูลที่เก็บไว้ เพื่อหาฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่างเฟส

2.5 โปรแกรมการคำนวณหาค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่าง ๆ เป็นส่วนในการนำข้อมูลจากโปรแกรมในส่วนต่าง ๆ ข้างต้นมาประมวลผล เพื่อหาค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับตามสมการ (3.10),(3.11) และ(3.12) .ในการคำนวณทำการแยกออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนจริง(Real Part) หรือส่วนของฟังก์ชัน cos และส่วนจินตภาพ (Imaginary part) หรือส่วนของฟังก์ชัน sin และเมื่อได้ค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับ ก็นำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์

การทดสอบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า จะทำการจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสให้เกิดสถานะไม่สมดุลกับโหลดในแบบต่าง ๆ ที่ง่ายต่อการคำนวณในทางทฤษฎี และนำค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่างๆ และค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุลที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัดมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณในทางทฤษฎีเพื่อแสดงค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัด

จากการทดสอบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 7 การทดลองจะเห็นได้ว่าค่าองค์ประกอบสมมาตรและค่าระดับความไม่สมดุลของกระแสที่ประมวลผลได้จากเครื่องมือวัดที่พัฒนามันนั้นมีผลการวัดใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณในทางทฤษฎี ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าความผิดพลาดสูงสุดของการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับ เท่ากับ 1.97%(f.s.d.)และ ค่าความผิดพลาดสูงสุดของการวัดค่าระดับความไม่สมดุลเท่ากับ 3.18%(f.s.d.) ซึ่งค่าความผิดพลาดทั้งหมดมาจากสาเหตุจากค่าความผิดพลาดสะสม ในส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. ค่าความผิดพลาดและความไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear) ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส (Hall device)
2. ค่าความผิดพลาด จากอุปกรณ์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์รอบแอมป์ในส่วนของภาครับสัญญาณป้อนเข้า (Input Part) ซึ่งให้สัญญาณเอาท์พุทระดับสัญญาณและสัญญาณมุมต่างเฟสของกระแส สำหรับการประมวลผล
3. ค่าความผิดพลาดจากค่าความละเอียด (Resolution) ในการประมวลผลข้อมูลดิจิทัล ซึ่งในการพัฒนาเครื่องมือใช้ข้อมูลขนาด 8 บิต สำหรับการประมวลผล

4. ค่าความผิดพลาดจากการประมวลผลในเชิงคณิตศาสตร์ ของโปรแกรมหาค่าองค์ประกอบสมมาตรและค่าระดับความไม่สมดุล

เพราะฉะนั้นจากการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรเมื่อผู้ใช้งานต้องการลดค่าความผิดพลาดให้มีค่าน้อยลงอาจทำได้โดย

1. ใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแสที่มีค่าความผิดพลาดต่ำ ๆ
2. ทำการปรับเทียบ (Calibrate) ค่าสัญญาณกระแส (A_{rms}) จากวงจรส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า (ส่วน Amplifier Circuit) กับเครื่องมือวัดกระแสมาตรฐาน
3. การประมวลผลข้อมูลดิจิทัล ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีจำนวนบิตของข้อมูลเพิ่มขึ้น เพื่อจะได้ค่าความละเอียด (Resolution) ของข้อมูล ในการประมวลผลเพิ่มขึ้น
4. ในทางปฏิบัติอาจทำการแบ่งย่านการวัดของเครื่องมือวัดให้เหมาะสมกับค่ากระแสที่ต้องการวัดจะช่วยลดค่าความผิดพลาดในการวัดค่ากระแสที่ต่ำ ๆ กว่าค่าย่านการวัด

6.2 คุณลักษณะเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า

1. Voltage Supply $220 V_{ac}$, 50 Hz
2. Current Input $0-5 A_{rms}$, $7.5 A_p$ (max), 50 Hz
3. Display

Positive Component	4 digits
Negative Component	4 digits
Zero Component	4 digits
% Unbalance Level	5 digits
4. % Error

1.97%(f.s.d.) for Symmetrical Components (without C.T.)
3.18%(f.s.d.) for %Unbalance Level (without C.T.)
5. Response Time 150 ms
6. Micro Controller SAB80C535 8 bits.(Processor Part)

6.3 แนวทางในการพัฒนา

1. เวลาในการชั่งข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟสเพื่อประมวลผลของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรที่พัฒนาขึ้นใช้เวลานานเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในขั้นตอนการคำนวณค่าองค์ประกอบสมมาตร ซึ่งในการพัฒนาต่อไปควรจะหาขั้นตอนวิธี (algorithm) ในแบบใหม่ๆ เพื่อลดเวลาในการตอบสนองของเครื่องมือวัดต่อไป

2. ส่วนการประมวลผลของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบจัดสร้างเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของแรงดันไฟฟ้าต่อไปได้
3. จากที่กล่าวมาข้างต้นว่าผลกระทบที่สำคัญเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดไม่สมดุลก็คือความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟสที่ต่อใช้งานอยู่กับระบบ ค่าองค์ประกอบสมมาตรที่สามารถวัดได้ในเวลาจริง(Real time)จากระบบไฟฟ้าในกรณีที่เกิดไม่สมดุลสามารถนำไปใช้เป็นค่าที่ตอบสนองการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟสเมื่อต้องทำงานในสภาวะที่ระบบไฟฟ้าไม่สมดุล



เอกสารอ้างอิง

- [1] Wagner, C.F. and Evans, R.D. 1933. **Symmetrical Components**. New York : McGraw-Hill
- [2] Campos, A. et. al. 1993. "A DSP-Based Real-Time Digital Filter for Symmetrical Components" 75-79. in **International Power Conference APT'93 Proceeding**. Athens.
- [3] Brandolino, J. "Practical Measurement of Symmetrical Component Currents" M.Eng Thesis of McMaster University. 1993.
- [4] GEC Measurements. **Protective Relays Application Guide**. :Stafford England
- [5] Eleneweihi, A.F. et. al. 1993. "Negative-Sequence Overcurrent Element Application and Coordination in Distribution Protection" **IEEE Transaction on Power Delivery**. 8(3) :915-922
- [6] Brandolino, J. and Findlay, R.D. 1994. "Practical Measurement of Symmetrical Component Currents in Induction Motors" 26-29. in **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**. Halifax
- [7] สายัณต์ ศรีโหมด และ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. 2541. "เครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า" หน้า 445-448. ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [8] สายัณต์ ศรีโหมด และ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. 2543. "เครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรและระดับความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้า". **วิศวกรรมลาดกระบัง**. 17(1): 445-448
- [9] Akneschke, T.A. 1985. "Control of Utility System Unbalance Caused by Single-Phase Electric Traction" **IEEE Transaction on Industrial Application**. 21(6) : 1559-1570
- [10] Blackburn, J.L. 1993. **Symmetrical Components for Power Systems Engineering**. New York : Marcel Dekker Inc.
- [11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2539. มอก.867-2532 **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ(ไม่รวมตัวต้นกำลัง)**. กรุงเทพฯ
- [12] Ching-Yin Lee. et. al. 1997. "Effects of Various Unbalanced Voltages on the Operation Performance of an Induction Motor under the Same Voltage Unbalance Factor Condition". in **Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference**. Singapore
- [13] IEC.892-1987. **Effects of Unbalanced Voltages on the Performance of Three-Phase Cage Induction Motors**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

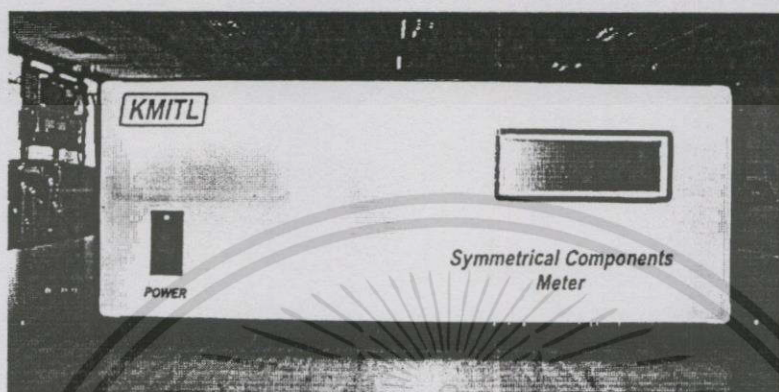
- [14] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2539. มอก.867-2532 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส. กรุงเทพฯ
- [15] Siemens Co.,Ltd. 1990. **Microcomputer Component (SAB80C535)**. Germany .
- [16] ไกรวุฒิ โรจน์ประเสริฐสุด. 2539. เข้าใจ/สร้าง/เล่น ไมโครโปรเซสเซอร์ 2. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [17] Jones L.D. and Chin A.F. 1991. **Electronic Instruments and Measurements**. New Jersey: Prentice-Hall



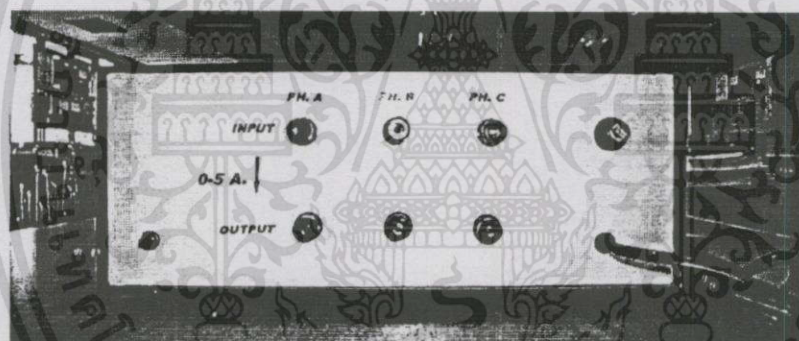
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

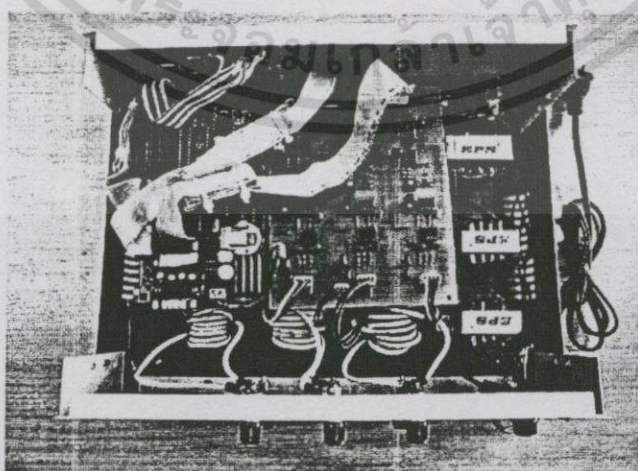
ภาพลักษณะเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตร ของกระแสไฟฟ้า



รูปด้านหน้าเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแส



รูปด้านหลังเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแส



รูปการวางอุปกรณ์ภายในเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

คู่มือการใช้งานเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตร
ของกระแสไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Symmetrical Component and %Unbalance level of Currents Meter

Users Manual



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Components) มีความสำคัญกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในกรณีที่ระบบเกิดไม่สมดุลขึ้น โดยค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่างๆ (Positive, Negative, Zero Components) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าอาทิเช่น การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรไฟฟ้าในกรณีลัดวงจรแบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Faults) การวิเคราะห์ผลกระทบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส ทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่จ่ายโหลดในสถานะไม่สมดุลและมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อต้องทำงานในสถานะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่สมดุล การกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุล(กระแส/แรงดัน) ของระบบไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวเลขที่บ่งบอกความผิดปกติของระบบในกรณีเกิดความไม่สมดุลขึ้น โดยพิจารณาจากค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบต่อลำดับบวก ซึ่งการวิเคราะห์ต่าง ๆ นั้นก็นำไปสู่การหาแนวทางหรืออุปกรณ์ในการป้องกันผลกระทบกับระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดความไม่สมดุลขึ้น เพราะฉะนั้นการวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่างๆ จึงมีความสำคัญในการตรวจสอบระบบไฟฟ้าได้อยู่ตลอดเวลา(real time) รวมถึงใช้ค่าองค์ประกอบสมมาตรที่วัดได้เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจทำงานสำหรับอุปกรณ์ป้องกันระบบเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายเมื่อระบบไฟฟ้ามีความผิดปกติจากความไม่สมดุลขึ้น

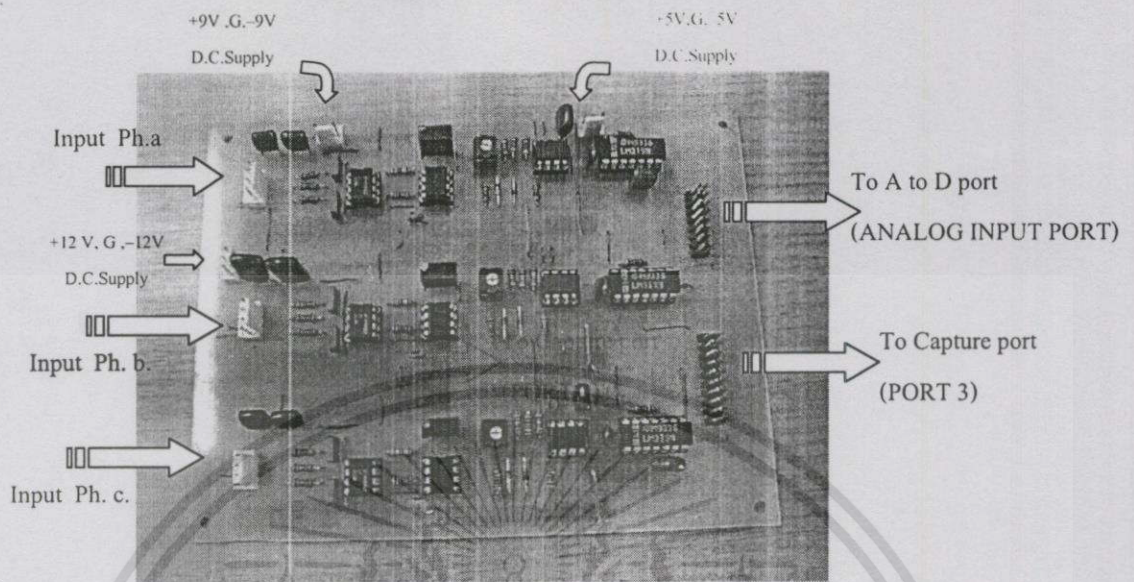
เครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า ถูกพัฒนาขึ้นโดยอัสัยเทคโนโลยีในการประมวลผลดิจิทัลของไมโครโปรเซสเซอร์ (80C535 Simens) โดยสามารถประมวลผลสัญญาณกระแสของระบบด้วยข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต และแสดงผลเป็นค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าลำดับบวก,ลำดับลบ,ลำดับศูนย์,พร้อมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุลของกระแสในระบบไฟฟ้า (%Unbalance Level) ซึ่งเมื่อเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าถูกต่อใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส ก็จะเป็นอุปกรณ์ที่แสดงให้เห็นผลของการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในระบบว่าเกิดความไม่สมดุลอย่างไรบ้างได้ตลอดเวลา

ส่วนประกอบเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแส

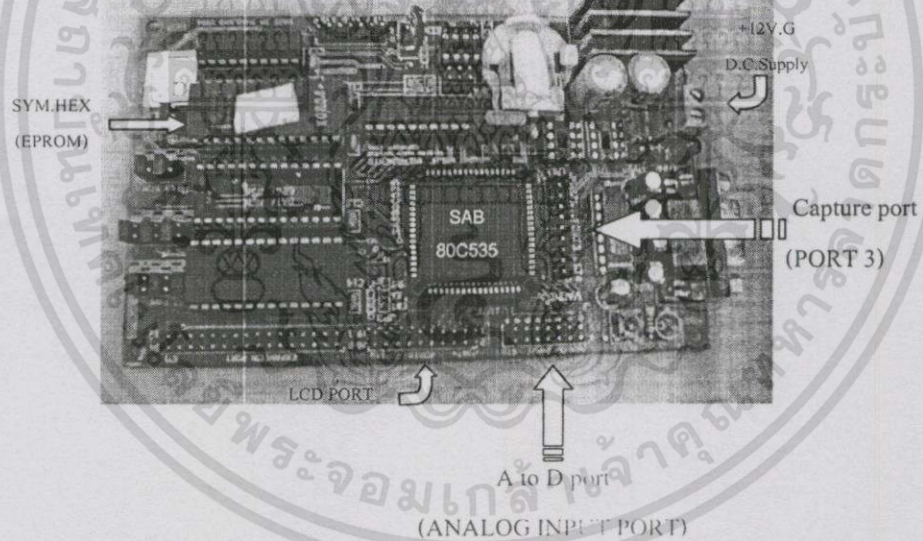
เครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ได้ดังนี้

1. ส่วนรับสัญญาณป้อนเข้า(Input Part) จะเป็นส่วนรับสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟส โดยผ่านอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส (Hall device sensor) และปรับแต่สัญญาณโดยวงจรลิเนียร์ไอซีให้สัญญาณมีความเหมาะสมในการประมวลผลของไมโครโปรเซสเซอร์
2. ส่วนประมวลผล(Processor Part) เป็นส่วนประมวลผลข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C535 ของ Simens Co.,Ltd.เป็นอุปกรณ์หลัก และแสดงผลลัพธ์เป็นค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่าง ๆ รวมถึงเปอร์เซ็นต์ค่าระดับความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าผ่านทางจอ LCD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



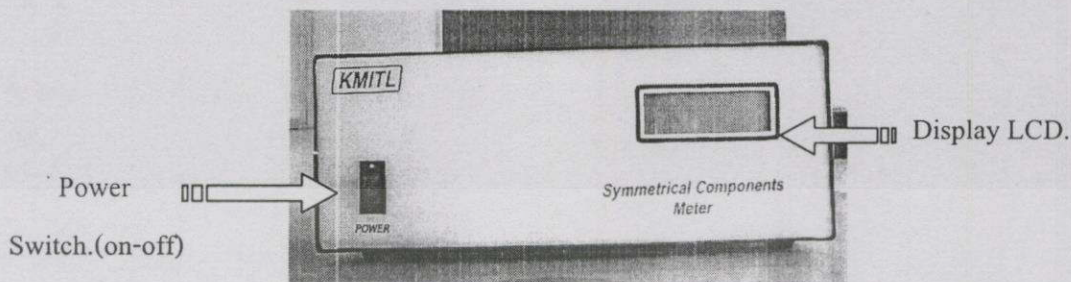
รูปอุปกรณ์ภาครับสัญญาณป้อนเข้า



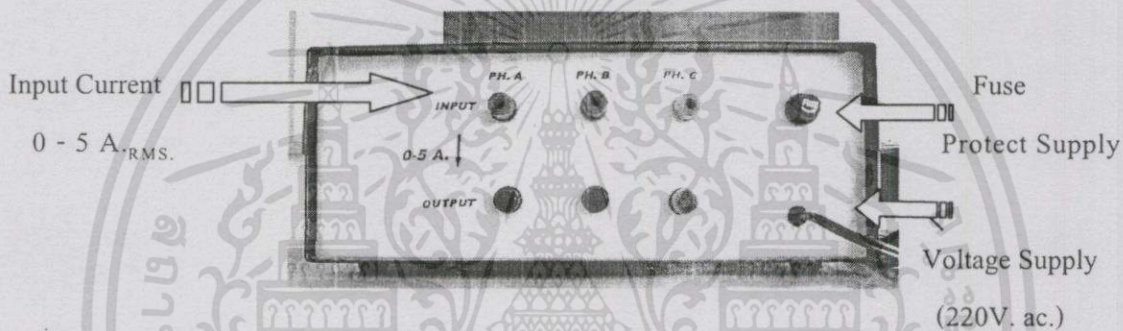
รูปอุปกรณ์ส่วนประมวลผล (Single Board Micro-Controller SAB80C535)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า



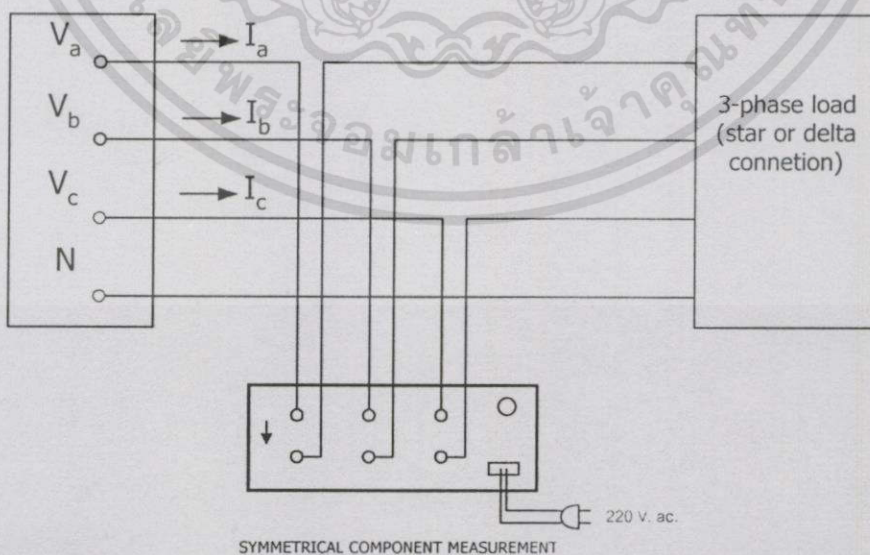
รูปด้านหน้าเครื่องมือวัด



รูปด้านหลังเครื่องมือวัด

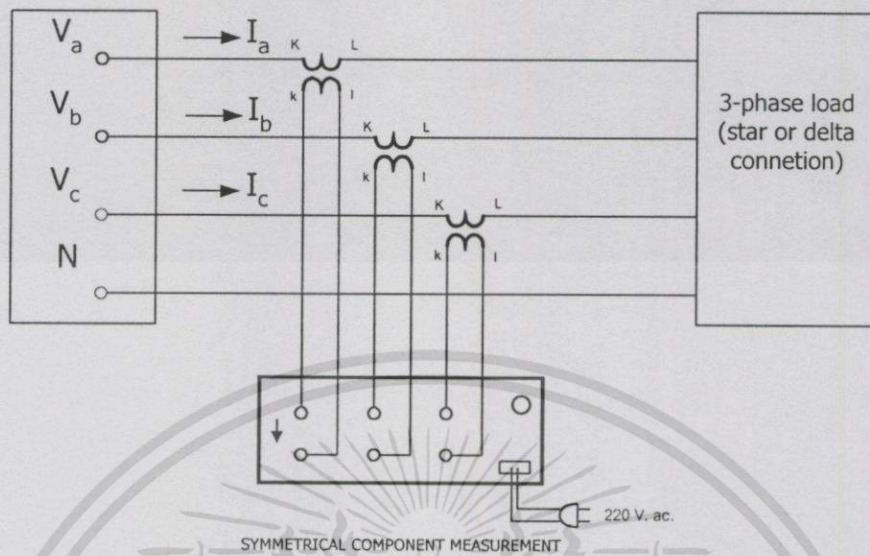
การต่อวงจรใช้งาน

1. ต่อวงจรวัดกระแสโดยตรงกับระบบไฟฟ้า ($I_{lim} \leq 5A_{RMS}$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวอย่างวัดกระแสของระบบไฟฟ้าผ่าน C.T. ($I_{Line} > 5A_{RMS}$)



ค่าองค์ประกอบสมมาตรในลำดับต่างๆ = (Ratio C.T.) x (ค่าที่แสดงผล LCD.)

คุณลักษณะของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแส

1. Voltage Supply 220 V_{ac}, 50 Hz
2. Current Input 0-5 A_{rms}, 7.5 A_p (max), 50 Hz
3. Display

Positive Component	4 digits
Negative Component	4 digits
Zero Component	4 digits
% Unbalance Level	5 digits
4. % Error

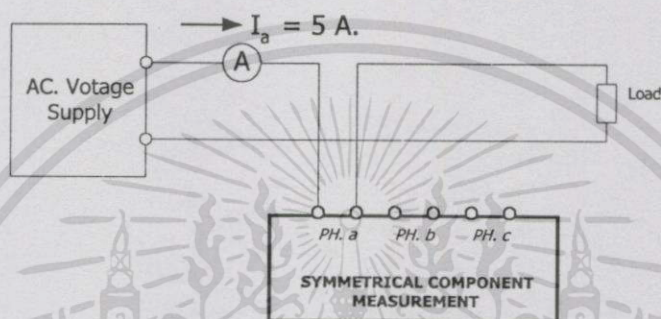
1.97%(f.s.d.) for Symmetrical Components (without C.T.)
3.18%(f.s.d.) for %Unbalance Level (without C.T.)
5. Response Time 150 ms
6. Micro-Controller SAB80C535 8 bits.(Processor Part)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับเทียบ(Calibrate)กับเครื่องมือวัดกระแสมาตรฐาน

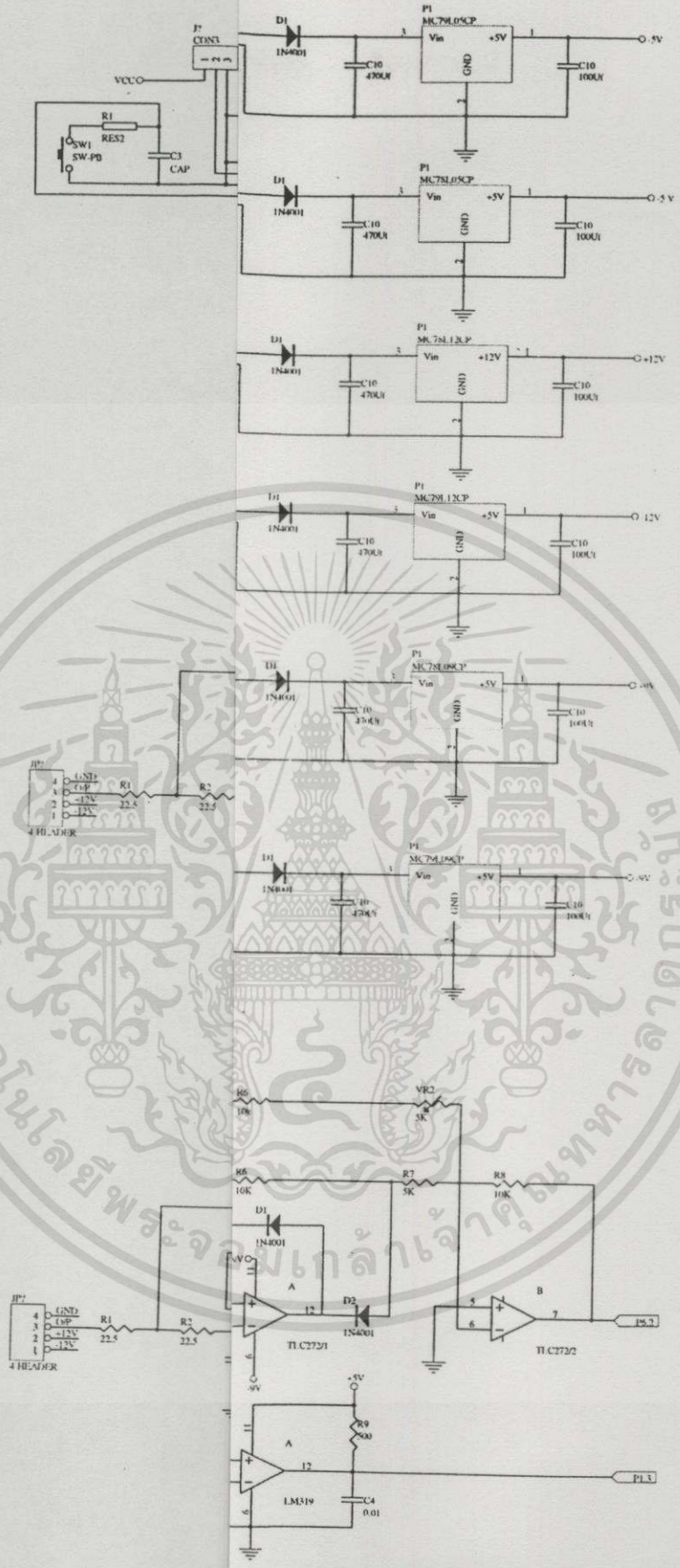
เพื่อให้การใช้งานเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากที่สุด ควรมีการปรับเทียบ(Calibrate)กับเครื่องมือวัดค่ากระแสมาตรฐาน โดยขั้นตอนในการปรับเทียบสามารถดำเนินการปรับเทียบค่ากระแสที่ละเฟส ได้ตามขั้นตอนนี้

1.ทำการต่อวงจรเพื่อทำการปรับเทียบค่ากระแสในเฟส a (เฟส b และ เฟส c เป็น 0 A.) โดยการจ่ายกระแสเข้าเฟส a เท่ากับ 5 A.(อ่านค่าจากเครื่องมือวัดค่ากระแสมาตรฐาน) เพียงเฟสเดียว ดังวงจรต่อไปนี้



รูปวงจรการปรับเทียบค่ากระแสในเฟส a

2. ทำการปรับค่าความต้านทาน (Variable Resistance 500 Ω) ในภาครับสัญญาณป้อนเข้าในเฟส a ให้สามารถอ่านค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับได้เท่ากับ 1.67 A.
- 3.ทำการต่อวงจรเพื่อทำการปรับเทียบค่ากระแสในเฟส b (เฟส a และ เฟส c เป็น 0 A.) โดยการจ่ายกระแสเข้าเฟส b เท่ากับ 5 A.(อ่านค่าจากเครื่องมือวัดค่ากระแสมาตรฐาน) เพียงเฟสเดียว
4. ทำการปรับค่าความต้านทาน (Variable Resistance 500 Ω) ในภาครับสัญญาณป้อนเข้าในเฟส b ให้สามารถอ่านค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับได้เท่ากับ 1.67 A.
- 5.ทำการต่อวงจรเพื่อทำการปรับเทียบค่ากระแสในเฟส c (เฟส a และ เฟส b เป็น 0 A.) โดยการจ่ายกระแสเข้าเฟส a เท่ากับ 5 A.(อ่านค่าจากเครื่องมือวัดค่ากระแสมาตรฐาน) เพียงเฟสเดียว
6. ทำการปรับค่าความต้านทาน (Variable Resistance 500 Ω) ในภาครับสัญญาณป้อนเข้าในเฟส c ให้สามารถอ่านค่าองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ลำดับได้เท่ากับ 1.67 A.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

การวัดรูปคลื่นสัญญาณกระแสด้วยดิจิตอลสโคป (Digital Oscilloscope Yogokawa model DL1520)

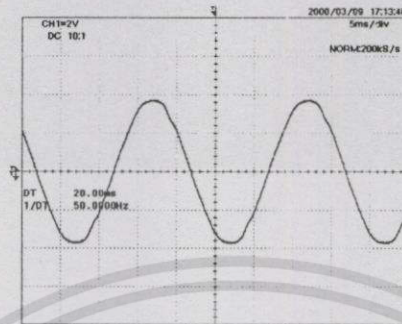
รูปสัญญาณกระแสในภาครับสัญญาณป้อนเข้า

ตัวอย่างเทคนิคการวัดมุมต่างเฟสจากรูปสัญญาณกระแสจากดิจิตอลสโคป

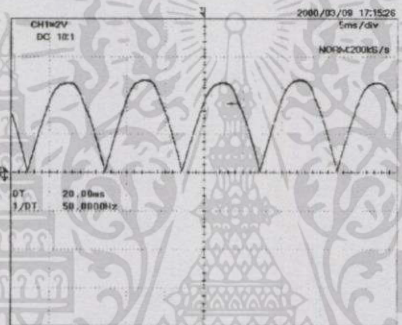
รูปสัญญาณกระแสการทดลองที่ 7. กรณีวัดค่าสัญญาณกระแสที่มีฮาร์มอนิกส์



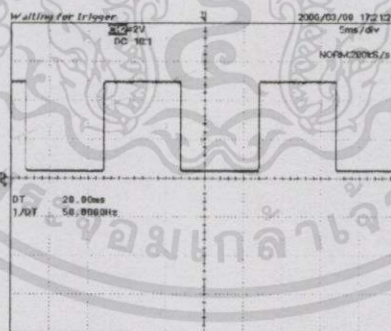
รูปสัญญาณกระแสในภาครับสัญญาณป้อนเข้า (Input Part)



สัญญาณกระแสอินพุต (I/P)



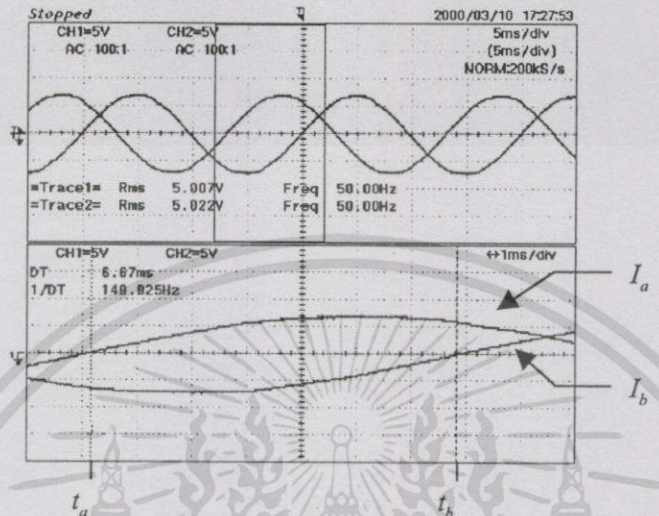
สัญญาณกระแสเอาต์พุตส่วนวงจรแปลงสัญญาณเต็มรูปคลื่น (O/P to A to D port)



สัญญาณกระแสเอาต์พุตส่วนวงจรตรวจจับสัญญาณตัดผ่านศูนย์ (O/P to Capture port)

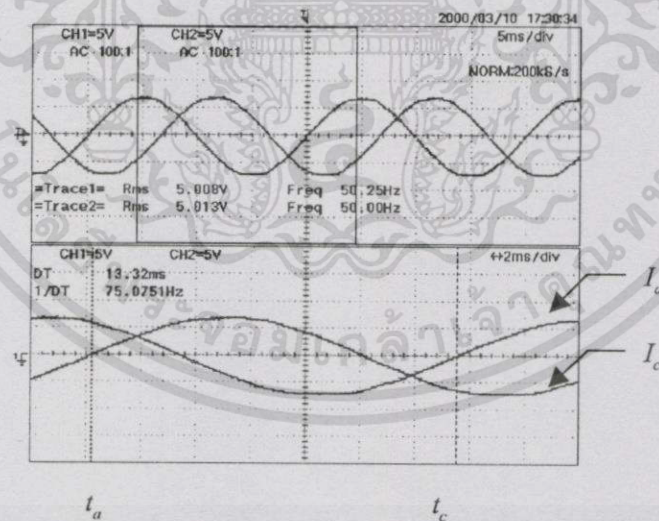
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเทคนิคการวัดมุมต่างเฟสจากรูปสัญญาณกระแสจากดิจิตอลสโคป
(Digital Oscilloscope Yogokawa model. DL 1520)



$$I_a (CH1.) = 5 A., I_b (CH2.) = 5 A.$$

$$\theta_1 = 120^\circ (6.67 \text{ ms})$$

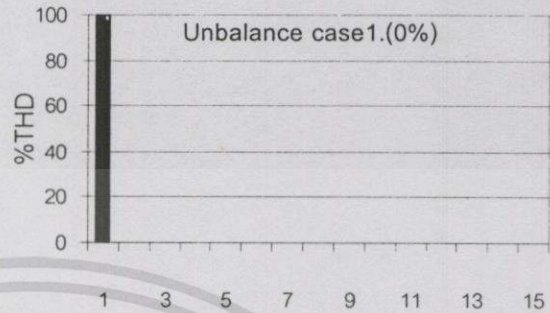
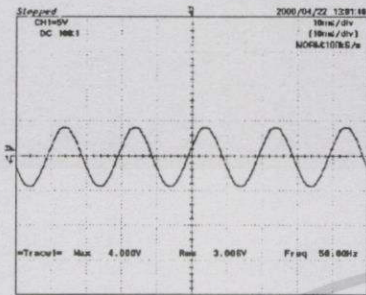


$$I_a (CH1.) = 5 A., I_c (CH2.) = 5 A.$$

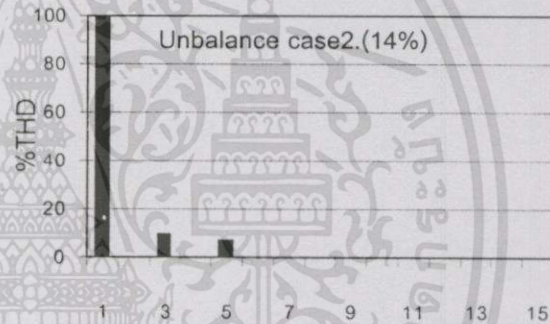
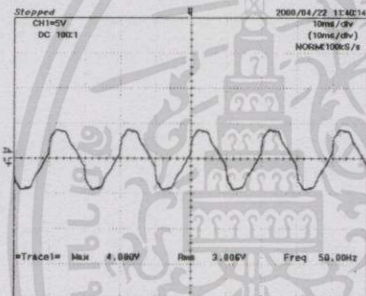
$$\theta_2 = 240^\circ (13.32 \text{ ms})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

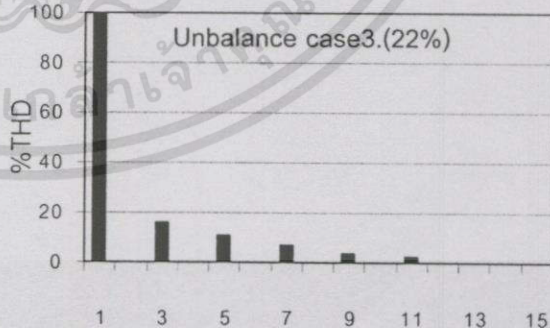
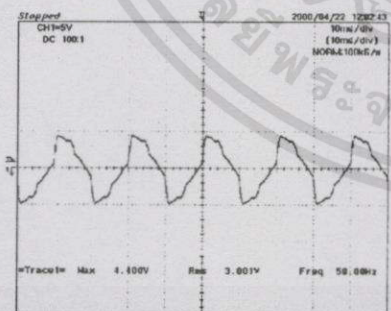
รูปสัญญาณกระแสการทดลองที่ 7. กรณีวัดค่าสัญญาณกระแสที่มีฮาร์มอนิกส์



Unbalance case1. (%THD = 0%)

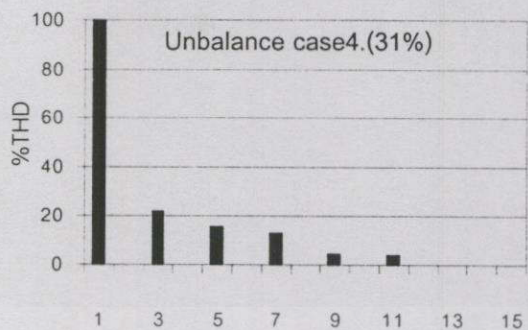
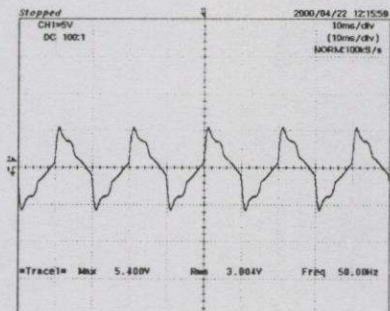


Unbalance case2. (%THD = 14%)

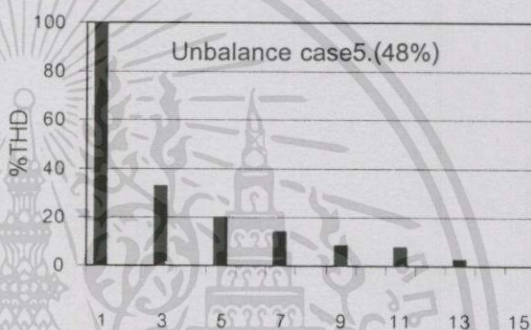
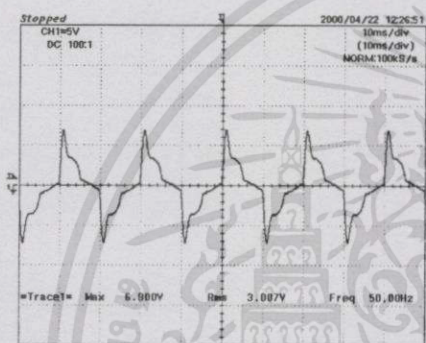


Unbalance case3. (%THD = 22%)

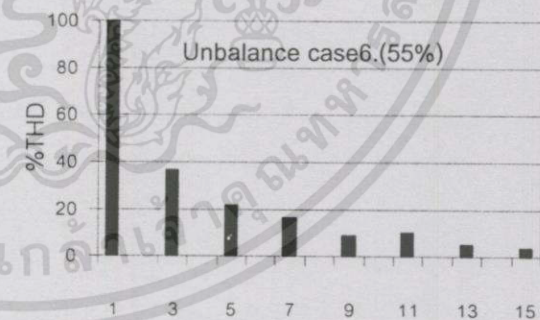
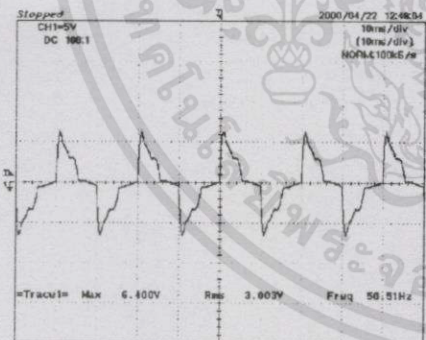
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Unbalance case4. (%THD = 31%)

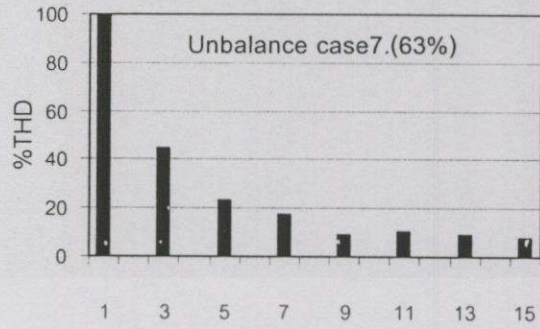
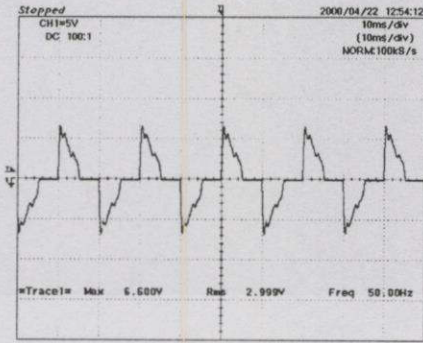


Unbalance case5. (%THD = 48%)



Unbalance case6. (%THD = 55%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Unbalance case7. (%THD = 63%)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ตารางบันทึกผลการทดลอง

คำอธิบายตารางการทดลอง

ตารางการทดลองที่ 1. กรณีกระแสของระบบสมดุล(Unity P.F. Load)

ตารางการทดลองที่ 2. กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล(Unity P.F. Load)

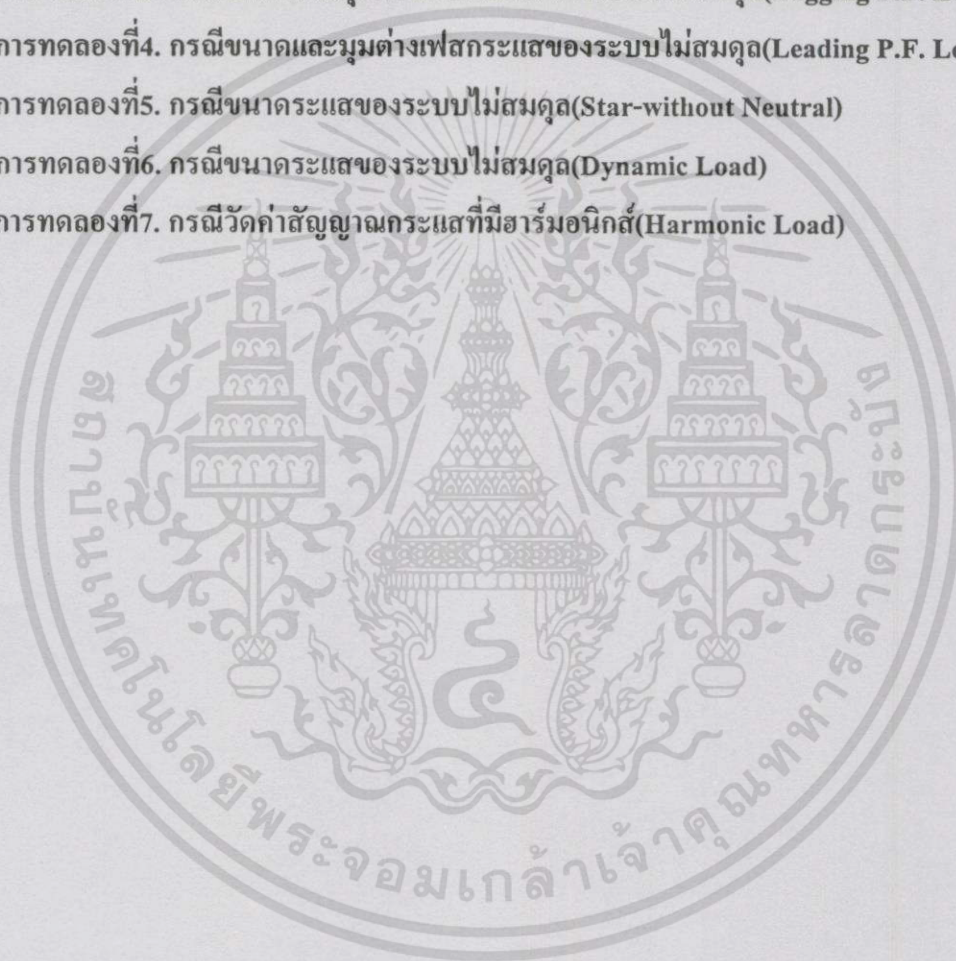
ตารางการทดลองที่ 3. กรณีขนาดและมุมต่างเฟสกระแสของระบบไม่สมดุล(Lagging P.F. Load)

ตารางการทดลองที่ 4. กรณีขนาดและมุมต่างเฟสกระแสของระบบไม่สมดุล(Leading P.F. Load)

ตารางการทดลองที่ 5. กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล(Star-without Neutral)

ตารางการทดลองที่ 6. กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล(Dynamic Load)

ตารางการทดลองที่ 7. กรณีวัดค่าสัญญาณกระแสที่มีฮาร์โมนิก(Harmonic Load)



คำอธิบายตารางทดลอง

ub. case	ค่ากระแสเส้น (A)		ค่านุมต่างเฟส		ค่าจากการคำนวณ (A)				ค่าที่ได้จากการวัด (A)				ค่าความคลาดเคลื่อน (full scale 5 A)				
	Ia	Ib	Ic	a-b	a-c	Ip(c)	In(c)	Iz(c)	%ub(c)	Ip(m)	In(m)	Iz(m)	%ub(m)	%error (Ip)	%error (In)	%error (Iz)	%error (ub)
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2			ช่องที่ 3		ช่องที่ 4				ช่องที่ 5				ช่องที่ 6			

ช่องที่ 1 ลำดับในการจำลองระบบไฟฟ้า

ช่องที่ 2 ค่ากระแสเส้นที่ทำการปรับให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการทดลองโดยอ่านค่าได้จากเพนเวอร์มิเตอร์(FLUKE 41B)

ช่องที่ 3 ค่านุมต่างเฟสที่ทำการปรับให้ขึ้นไปตามเงื่อนไขของการทดลอง โดยอ่านค่าด้วยแอมมิเตอร์(YOGOKAWA DL.1520)

ช่องที่ 4 ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่างๆ และค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุล ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (3.10),(3.11),(3.12) และ (3.13)

โดยใช้ข้อมูลจากช่องที่ 2 และช่องที่ 3 ในการคำนวณ

ช่องที่ 5 ค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่างๆ และค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุล ที่ได้จากการประมวลผลของเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น

ช่องที่ 6 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่างๆ และค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความไม่สมดุล ตามสมการที่ (5.1)

ตารางการทดลองที่ 1. กรณีกระแสของระบบสมดุล (Unity P.F. Load)

ub. case	ค่ากระแสแอมป์ (A)			มุมต่างเฟส (Degrees)			ค่าจากการคำนวณ (A)			ค่าที่ได้จากการวัด (A)				ค่าความคลาดเคลื่อน (full scale 5 A)			
	Ia	Ib	Ic	a-b	a-c	Ip(c)	In(c)	Iz(c)	%ub(c)	Ip(m)	In(m)	Iz(m)	%ub(m)	%error (Ip)	%error (In)	%error (Iz)	%error (ub)
1	5.0	5.0	5.0	-120	-240	5.00	0.00	0.00	0.00	5.01	0.02	0.02	0.59	-0.20	-0.30	-0.30	-0.59
2	4.5	4.5	4.5	-120	-240	4.50	0.00	0.00	0.00	4.52	0.02	0.02	0.33	-0.30	-0.30	-0.30	-0.32
3	4.0	4.0	4.0	-120	-240	4.00	0.00	0.00	0.00	4.01	0.01	0.02	0.37	-0.10	-0.15	-0.30	-0.37
4	3.5	3.5	3.5	-120	-240	3.50	0.00	0.00	0.00	3.50	0.01	0.01	0.42	0.10	-0.15	-0.15	-0.42
5	3.0	3.0	3.0	-120	-240	3.00	0.00	0.00	0.00	3.00	0.01	0.02	0.50	0.00	-0.15	-0.30	-0.49
6	2.5	2.5	2.5	-120	-240	2.50	0.00	0.00	0.00	2.48	0.01	0.02	0.60	0.50	-0.15	-0.30	-0.60
7	2.0	2.0	2.0	-120	-240	2.00	0.00	0.00	0.00	1.95	0.02	0.02	0.75	1.00	-0.30	-0.30	-0.75
8	1.5	1.5	1.5	-120	-240	1.50	0.00	0.00	0.00	1.44	0.01	0.02	1.00	1.20	-0.15	-0.30	-1.00
9	1.0	1.0	1.0	-120	-240	1.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	1.70	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองที่ 2. กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล (Unity P.F. Load)

ub. case	ค่ากระแสเส้น (A)			มุมต่างเฟส (Degrees)			ค่าจากการคำนวณ (A)				ค่าที่ได้จากการวัด (A)				ค่าความคลาดเคลื่อน (full scale 5 A)			
	Ia	Ib	Ic	a-b	a-c	Ip(c)	In(c)	Iz(c)	%ub(c)	Ip(m)	In(m)	Iz(m)	%ub(m)	%error (Ip)	%error (In)	%error (Iz)	%error (ub)	
1	5.0	5.0	5.0	-120	-240	5.00	0.00	0.00	0.00	5.01	0.02	0.02	0.59	-0.20	-0.30	-0.30	-0.59	
2	5.0	4.0	5.0	-120	-240	4.67	0.33	0.33	7.14	4.67	0.32	0.32	7.56	0.03	0.37	0.37	-0.42	
3	5.0	4.0	4.0	-120	-240	4.33	0.33	0.33	7.69	4.31	0.35	0.36	8.16	0.57	-0.23	-0.23	-0.47	
4	5.0	3.0	4.0	-120	-240	4.00	0.58	0.58	14.43	3.98	0.59	0.59	14.80	0.50	-0.15	-0.15	-0.37	
5	5.0	3.0	3.0	-120	-240	3.67	0.67	0.67	18.18	3.66	0.68	0.68	18.63	0.13	-0.17	-0.17	-0.45	
6	5.0	2.0	3.0	-120	-240	3.33	0.88	0.88	26.46	3.27	0.89	0.89	27.00	1.27	-0.06	-0.06	-0.54	
7	5.0	2.0	2.0	-120	-240	3.00	1.00	1.00	33.33	2.96	1.02	1.02	35.00	0.90	-0.40	-0.40	-1.67	
8	5.0	1.0	2.0	-120	-240	2.67	1.20	1.20	45.07	2.60	1.23	1.20	47.46	1.43	-0.56	0.04	-2.39	
9	5.0	1.0	1.0	-120	-240	2.33	1.33	1.33	57	2.24	1.38	1.38	60.10	1.97	-0.93	-0.93	-2.96	
10	5.0	0.0	1.0	-120	-240	2.00	1.53	1.53	76	1.92	1.53	1.53	79.56	1.60	-0.05	-0.05	-3.18	
11	5.0	0.0	0.0	-120	-240	1.67	1.67	1.67	100	1.65	1.65	1.65	99.68	0.33	0.33	0.33	0.32	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองที่ 3. กรณีขนาดและมุมต่างเฟสกระแสของระบบไม่สมดุล (Lagging P.F. Load)

ub. case	ค่ากระแสแอมป์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)			ค่าจากการคำนวณ (A)				ค่าที่ได้จากการวัด (A)				ค่าความคลาดเคลื่อน (full scale 5 A)			
	Ia	Ib	Ic	a-b	a-c	Ip(c)	In(c)	Iz(c)	%ub(c)	Ip(m)	In(m)	Iz(m)	%ub(m)	%error (Ip)	%error (In)	%error (Iz)	%error (ub)	
1	5.0	5.0	5.0	-120	-240	5.00	0.00	0.00	0.00	5.01	0.02	0.02	0.59	-0.20	-0.30	-0.30	-0.59	
2	5.0	4.0	5.0	-131	-240	4.65	0.45	0.44	9.74	4.64	0.44	0.44	9.60	0.25	0.36	0.16	0.14	
3	5.0	4.0	4.0	-131	-240	4.31	0.59	0.19	13.66	4.28	0.59	0.20	13.60	0.79	0.08	-0.11	0.06	
4	5.0	3.0	4.0	-134	-240	3.98	0.76	0.53	19.17	3.95	0.71	0.56	17.76	0.62	1.14	-0.54	1.41	
5	5.0	3.0	3.0	-134	-240	3.64	0.91	0.49	24.91	3.60	0.86	0.50	23.49	0.87	1.05	-0.17	1.42	
6	5.0	2.0	3.0	-140	-240	3.30	1.08	0.78	32.73	3.27	1.05	0.80	32.40	0.59	0.60	-0.22	0.33	
7	5.0	2.0	2.0	-140	-240	2.97	1.23	0.83	41.36	2.93	1.20	0.86	41.41	0.84	0.54	-0.48	-0.05	
8	5.0	1.0	2.0	-158	-240	2.60	1.40	1.12	53.84	2.57	1.38	1.17	53.58	0.80	0.45	-1.06	0.26	
9	5.0	1.0	1.0	-158	-240	2.27	1.55	1.20	68.03	2.18	1.53	1.29	70.20	1.96	0.33	-1.77	-2.17	
10	5.0	1.0	0.0	-193	-240	1.79	1.91	1.34	106.32	1.77	1.86	1.38	104.58	0.50	0.96	-0.73	1.74	

ตารางการทดลองที่ 4. กรณีขนาดและมุมต่างเฟสกระแสของระบบไม่สมดุล (Leading P.F. Load)

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			มุมต่างเฟส (Degrees)			ค่าจากการคำนวณ (A)				ค่าที่ได้จากการวัด (A)				ค่าความคลาดเคลื่อน (full scale 5 A)			
	Ia	Ib	Ic	a-b	a-c		Ip(c)	In(c)	Iz(c)	%ub(c)	Ip(m)	In(m)	Iz(m)	%ub(m)	%error (Ip)	%error (In)	%error (Iz)	%error (ub)
1	5.0	5.0	5.0	-120	-240		5.00	0.00	0.00	0.00	5.01	0.02	0.02	0.59	-0.20	-0.30	-0.30	-0.59
2	5.0	5.0	4.0	-120	-227		4.64	0.48	0.48	10.30	4.62	0.56	0.47	12.16	0.43	-1.54	0.26	-1.86
3	5.0	4.0	4.0	-120	-227		4.31	0.63	0.20	14.54	4.28	0.68	0.20	15.64	0.68	-0.97	0.15	-1.10
4	5.0	4.0	3.0	-120	-225		3.97	0.76	0.53	19.24	3.90	0.80	0.53	20.25	1.49	-0.60	0.20	-1.01
5	5.0	3.0	3.0	-120	-225		3.64	0.91	0.49	25.08	3.57	0.95	0.53	26.24	1.44	-0.63	-0.77	-1.16
6	5.0	3.0	2.0	-120	-219		3.30	1.08	0.79	32.74	3.21	1.08	0.83	33.67	1.77	0.00	-0.75	-0.93
7	5.0	2.0	2.0	-120	-219		2.97	1.23	0.83	41.43	2.90	1.23	0.89	43.26	1.42	-0.02	-1.07	-1.83
8	5.0	2.0	1.0	-120	-208		2.62	1.37	1.12	52.21	2.53	1.38	1.17	54.99	1.82	-0.23	-0.98	-2.78
9	5.0	1.0	1.0	-120	-208		2.29	1.51	1.21	66	2.19	1.53	1.26	69.15	1.97	-0.32	-0.95	-3.00
10	5.0	0.0	1.0	-120	-160		1.76	1.93	1.36	110	1.71	1.89	1.38	110.08	0.93	0.87	-0.45	-0.02

ตารางการทดลองที่ 5. กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล (Star-without Neutral)

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)			ค่าจากการคำนวณ (A)						ค่าที่ได้จากการวัด (A)				ค่าความคลาดเคลื่อน (full scale 5 A)			
	Ia	Ib	Ic	a-b	a-c	Ip(c)	In(c)	Iz(c)	%ub(c)	Ip(m)	In(m)	Iz(m)	%ub(m)	%error (Ip)	%error (In)	%error (Iz)	%error (ub)			
1	5.0	5.0	5.0	-120	-240	5.00	0.00	0.00	0.00	4.95	0.02	0.02	0.59	1.00	-0.30	-0.30	-0.59			
2	5.0	4.0	5.0	-116	-227	4.64	0.66	0.07	14.20	4.61	0.65	0.02	14.08	0.77	0.28	1.05	0.12			
3	5.0	4.0	4.0	-130	-231	4.30	0.74	0.04	17.25	4.22	0.80	0.02	18.63	1.61	-1.08	0.47	-1.38			
4	5.0	3.0	4.0	-131	-217	3.89	1.23	0.07	31.55	3.84	1.20	0.02	31.57	1.05	0.56	1.19	-0.02			
5	5.0	3.0	3.0	-150	-210	3.40	1.67	0.07	49.08	3.30	1.71	0.02	51.02	1.96	-0.85	1.03	-1.94			

ตารางการทดลองที่ 6. กรณีขนาดกระแสของระบบไม่สมดุล(Dynamic Load)

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			ค่ามุมต่างเฟส (Degrees)			ค่าจากการคำนวณ (A)				ค่าที่ได้จากการวัด (A)				ค่าความคลาดเคลื่อน (full scale 5 A)			
	Ia	Ib	Ic	a-b	a-c	Ip(c)	In(c)	Iz(c)	%ub(c)	Ip(m)	In(m)	Iz(m)	%ub(m)	%error (Ip)	%error (In)	%error (Iz)	%error (ub)	
1	1.50	1.53	1.57	-120	-240	1.53	0.02	0.02	1.32	1.50	0.01	0.02	0.98	0.67	0.26	0.11	0.34	
2	1.56	1.42	1.61	-120	-240	1.53	0.06	0.06	3.72	1.50	0.05	0.05	3.92	0.60	0.24	0.24	-0.20	
3	1.67	1.53	1.50	-120	-240	1.57	0.05	0.05	3.34	1.53	0.05	0.08	3.92	0.73	0.15	-0.45	-0.58	
4	1.85	1.48	1.67	-120	-240	1.67	0.11	0.11	6.41	1.62	0.09	0.11	6.34	0.93	0.34	0.04	0.07	
5	1.94	1.60	1.60	-120	-240	1.71	0.11	0.11	6.61	1.71	0.09	0.14	6.88	0.07	0.47	-0.43	-0.27	
6	2.10	1.49	1.73	-120	-240	1.77	0.18	0.18	10.00	1.80	0.15	0.20	9.10	-0.53	0.55	-0.35	0.91	
7	2.31	1.75	1.76	-120	-240	1.94	0.19	0.19	9.54	1.97	0.17	0.21	8.94	-0.50	0.40	-0.50	0.60	

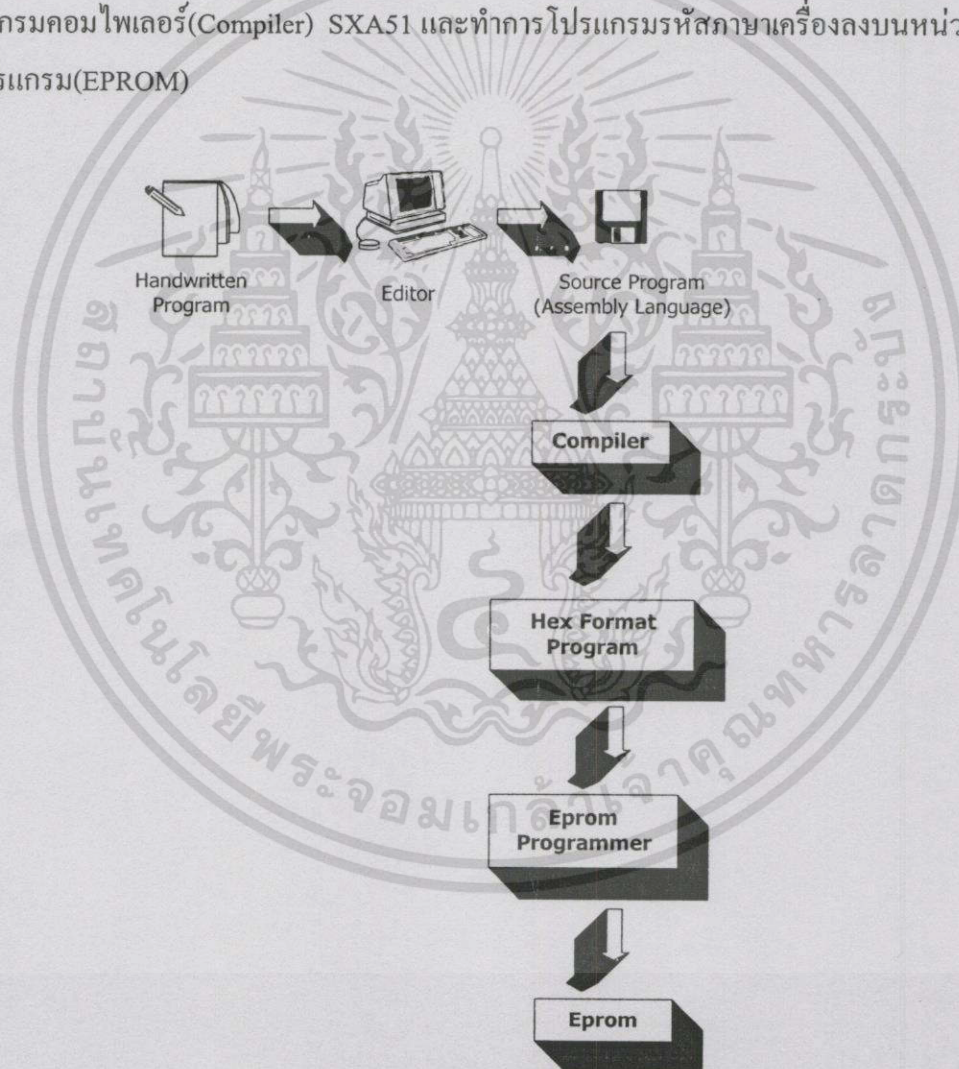
ตารางการทดลองที่ 7. กรณีวัดค่าสัญญาณกระแสที่มีฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Load)

ub. case	ค่ากระแสไลน์ (A)			มุมต่างเฟส (Degrees)			ค่าจากการคำนวณ (A)					ค่าที่ได้จากการวัด (A)				ค่าความคลาดเคลื่อน (full scale 5 A)			
	Ia	Ib	Ic	a-b	a-c	Ip(c)	In(c)	Iz(c)	%ub(c)	Ip(m)	In(m)	Iz(m)	%ub(m)	%error (Ip)	%error (In)	%error (Iz)	%error (ub)		
1	3.0	3.0	3.0	-120	-240	3.00	0.00	0.00	0.00	3.00	0.01	0.02	0.50	0.00	-0.15	0.00	-0.49		
2	3.0	3.0	3.0	-120	-240	3.00	0.00	0.00	0.00	3.02	0.01	0.01	0.49	-0.30	-0.15	0.00	-0.48		
3	3.0	3.0	3.0	-120	-240	3.00	0.00	0.00	0.00	2.99	0.01	0.01	0.50	0.20	-0.15	0.00	-0.49		
4	3.0	3.0	3.0	-120	-240	3.00	0.00	0.00	0.00	2.97	0.01	0.01	0.50	0.60	-0.15	0.00	-0.49		
5	3.0	3.0	3.0	-120	-240	3.00	0.00	0.00	0.00	2.98	0.01	0.01	0.50	0.40	-0.15	0.00	-0.49		
6	3.0	3.0	3.0	-120	-240	3.00	0.00	0.00	0.00	2.96	0.02	0.02	0.66	0.80	-0.30	0.00	-0.66		
7	3.0	3.0	3.0	-120	-240	3.00	0.00	0.00	0.00	2.96	0.03	0.03	1.00	0.75	-0.60	0.00	-1.00		

ภาคผนวก จ.

การพัฒนาโปรแกรมส่วนประมวลผล

การพัฒนาโปรแกรมส่วนประมวลผลของเครื่องมือวัดค่าองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าสามารถแสดงดังรูปแผนภาพการพัฒนาโปรแกรม โดยเริ่มจากการเขียนโปรแกรมต้นฉบับ (Source Program) ด้วยภาษาแอสเซมบลี (Assembly Language) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C535 และทำการพิมพ์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ (PC) ด้วยโปรแกรมเอดิเตอร์(Editor) ในDOS Version 6.22 และทำการแปลงโปรแกรมต้นฉบับเป็นโปรแกรมรหัสภาษาเครื่อง(Hex Format Program) ด้วยโปรแกรมคอมไพเลอร์(Compiler) SXA51 และทำการโปรแกรมรหัสภาษาเครื่องลงบนหน่วยความจำโปรแกรม(EPROM)



รูปแผนภาพการพัฒนาโปรแกรม

รายละเอียดโปรแกรมต้นฉบับ(Source Program) แสดงดังต่อไปนี้

```

;UP DATE FILE FOR FINAL THESIS                MOV  A,#094H    ; LINE 3
;test analog to digital - 1 phase to microcontrol 80c535    LCALL LCDWI
;file a2d_1.asm                STR2: MOV  R0,#20    ; 20 CHAR
;start date 1/4/98                MOV  DPTR,#TAB1    ; DATA ADDRESS
    ORG  0000H    ;STRAT AT 0000H(RESET)    STR1: MOVX  A,@DPTR
    LJMP  START                LCALL LCDWD
    ORG  000BH                INC  DPTR
    LJMP  1100H    ;INTERRUPT ROUTINE    DJNZ  R0,STR1
    ORG  10H                MOV  R2,#01H
NLOW: DS  8                LCALL DELAY
    ORG  18H                MOV  A,#0D4H    ; LINE 4
TIME: DS  4                LCALL LCDWI
;PROGRAM INTERRUPT SERVICE ROUNTINES    MOV  R0,#20    ; 20 CHAR
    ORG  1100H                MOV  DPTR,#TAB2    ; DATA ADDRESS
    MOV  A,ADDAT    STR3: MOVX  A,@DPTR
    MOV  R7,#01H                LCALL LCDWD
    RETI                INC  DPTR
;File name: tlcd.asm    DJNZ  R0,STR3
;date : 5/10/00                MOV  R2,#09H
;test lcd port4 & potr5 (80c535)    LCALL DELAY
    PDATA EQU  0E8H    ;PORT 4 DATAPORT (P4.0 - ;MAIN PROGRAM
P4.7)                ADCON EQU  0D8H
    PCONT EQU  0F8H    ;PORT 5 CONTROLPORT    ADDAT EQU  0D9H
                DAPR EQU  0DAH
                ; P5.0 = RS
                ; P5.1 = R/S
                ; P5.2 = E
    ORG  1200H                MAIN: LCALL PHA
                LCALL A2D
                LCALL PHB
                LCALL A2D
                LCALL PHC
                LCALL A2D
                LJMP  CCU
TAB1: DB  " SYMMETRICAL "
TAB2: DB  " COMPONENTS METER "
TAB3: DB  "POSITIVE = . A."
TAB4: DB  "NEGATIVE = . A."
TAB5: DB  "ZERO = . A."
TAB6: DB  "%UB = . %"
                ;subroutine input phase a
                ;SET STORE DATA OUTPUT
    IEN0 EQU  0A8H                PHA: MOV  R0,#00H    ;LOOP2
    ORG  100H                MOV  R5,#01H    ;LOOP1
START: CLR  IEN0.7    ;DISABLE INTERRUPT                MOV  DPTR,#9300H    ;BYTE STORE
    MOV  81H,#5FH    ;STACK POINTER = 4Fh    ;SET CHANNEL IN R3
    MOV  R2,#20H                MOV  R3,#00H    ;CHANNEL 0
    LCALL DELAY                RET
    LCALL INIT                ;subroutine input phase b

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;SET STORE DATA OUTPUT                                INC DPTR
PHB: MOV R0,#00H ;LOOP2                                DJNZ R0,WAIT
      MOV R5,#01H ;LOOP1                                DJNZ R5,WAIT
      MOV DPTR,#9500H ;BYTE STORE                       CLR TR0 ;STOP TIMER0
;SET CHANNEL IN R3                                     CLR IEN0.7 ;CLEAR INTERRUPT
      MOV R3,#01H ;CHANNEL 1                            CLR IEN0.1
      RET                                                RET
;subroutine input phase c                               ;test capture unit for time 3-phase angel mesuerment
;SET STORE DATA OUTPUT                                ;file ccu_3.asm
PHC: MOV R0,#00H ;LOOP2                                ;start date 22/4/98
      MOV R5,#01H ;LOOP1                                T2CO EQU 0C8H ;TIMER2 CONTROL
      MOV DPTR,#9700H ;BYTE STORE                       REGISTER
;SET CHANNEL IN R3                                     TL EQU 0CCH
      MOV R3,#02H ;CHANNEL 2                            TH EQU 0CDH
      RET                                                CCEN EQU 0C1H ;CAPTURE MODE
;subroutine a2d                                         REGISTER
;SET A2D REGISTER                                       CCL1 EQU 0C2H
A2D: MOV A,R3 ;SET CHANNEL 0                            CCH1 EQU 0C3H
      ORL A,#00011000B ;PRESET MODE 0                   CCL2 EQU 0C4H
      ANL A,#00111111B ;SET CHANNEL ,MODE              CCH2 EQU 0C5H
      MOV R4,A ;SAVE MODE,CHANNEL                       CCL3 EQU 0C6H
      MOV A,ADCON ;READ ADC CONTROL                     CCH3 EQU 0C7H
REGISTER                                                IRCO EQU 0C0H ;STATUS INTERRUPT
      ANL A,#11001000B ;RESET OLD A2D PART              IEN1 EQU 0B8H ;ENABLE/DISABLE
      ORL A,R4 ;SET NEW A2D PART                         INTERRUPT
      MOV ADCON,A ;SAVE NEW MODE                        CCU: SETB P1.1 ;ENABLE P1.1 FOR USE AS
;SET Vref +5,0 VOLT                                     INPUT
      MOV DAPR,#00H ;START CONVERSION 0-5              SETB P1.2 ;ENABLE P1.2 FOR USE AS
VOLT                                                    INPUT
;SETUP INTERRUPT REGISTER                               SETB P1.3 ;ENABLE P1.3 FOR USE AS
      MOV TMOD,#02H ;TIMER0 ON MODE 2                   INTERRUPT
      MOV TH0,#4EH                                       MOV IEN1,#00H
      MOV TL0,#4EH                                       LCALL PHA_B ;PHASE A COMPARE PHASE
      MOV IEN0,#082h ;SET INTERRUPT ENABLE              B
FLAG                                                    LCALL DPSUB1 ;TIME PHA. COMPARE PHB.
      ;SET ENABLE TIMER0 INTERRUPT                       LCALL PHA_C ;PHASE A COMPARE PHASE
      MOV R7,#00H                                       C
      SETB TR0 ;START TIMER0                             LCALL DPSUB2 ;TIME PHA. COMPARE PHC.
WAIT: CJNE R7,#01H,WAIT ;WAIT CHEAK                    LJMP RMS_A ;FINE RMS. VALUE
INTERRUPT                                               PHA_B: MOV T2CO,#00H ;STOP
      MOV R7,#00H                                       TIMER/COUNTER2
;STROED DATA TO REGISTER                               MOV TL,#00H
STORED: MOVX @DPTR,A                                    MOV TH,#00H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CLR IRCO.6 ;CLEAR T2 OVERFLOW FLAG          JNB IRCO.6,PHA2 ;WAIT FOR T2 OVER FLOW
CLR IRCO.3 ;CLEAR CAPTURE FLAG IEX4          CLR IRCO.6
MOV CCEN,#00000100B ;CAPTURE MODE FOR        LJMP PHA_C
CCU1.                                          CAPC: CLR IRCO.5 ;CLEAR CAPTURE FLAG
MOV T2CO,#01H ;START TIMER/COUNTER2          IEX6
(NO RELOAD)                                  MOV CCEN,#01000000B ;CAPTURE MODE FOR
PHA1: JB IRCO.3,CAPB ;WAIT FOR CAPTURE -      CCU3.
FLAG SET                                     PHC2: JB IRCO.5,STO2
JNB IRCO.6,PHA1 ;WAIT FOR T2 OVER FLOW        JNB IRCO.6,PHC2
CLR IRCO.6                                    CLR IRCO.6
LJMP PHA_0 ;PHA NO SIGNAL                     LJMP ZEC
CAPB: CLR IRCO.4 ;CLEAR CAPTURE FLAG          STO2: MOV T2CO,#00H ;STOP TIMER/COUNTER2
IEX5                                          MOV NLOW+4,CCL1 ;STORE DELAY TIME
MOV CCEN,#00010000B ;CAPTURE MODE FOR        MOV NLOW+5,CCH1
CCU2.                                          MOV NLOW+6,CCL3
PHB1: JB IRCO.4,STO1                          MOV NLOW+7,CCH3
JNB IRCO.6,PHB1                               RET
CLR IRCO.6                                    ZEC: MOV T2CO,#00H ;STOP TIMER/COUNTER2
LJMP ZEB                                       MOV CCL1,#00H
STO1: MOV T2CO,#00H ;STOP TIMER/COUNTER2      MOV CCH1,#00H
MOV NLOW,CCL1 ;STORE DELAY TIME              MOV CCL3,#00H
MOV NLOW+1,CCH1                                MOV CCH3,#00H
MOV NLOW+2,CCL2                                RET
MOV NLOW+3,CCH2                                PHA_0: MOV T2CO,#00H ;STOP
RET                                             TIMER/COUNTER2
ZEB: MOV T2CO,#00H                               MOV CCL1,#00H
MOV CCL1,#00H                                   MOV CCH1,#00H
MOV CCH1,#00H                                   MOV T2CO,#00H ;STOP TIMER/COUNTER2
MOV CCL2,#00H                                   MOV TL,#00H
MOV CCH2,#00H                                   MOV TH,#00H
RET                                             CLR IRCO.6 ;CLEAR T2 OVERFLOW FLAG
PHA_C: MOV T2CO,#00H ;STOP                     CLR IRCO.4 ;CLEAR CAPTURE FLAG IEX5
TIMER/COUNTER2                                MOV CCEN,#00010000B ;CAPTURE MODE FOR
MOV TL,#00H                                    CCU2.
MOV TH,#00H                                    MOV T2CO,#01H ;START TIMER/COUNTER2
CLR IRCO.6 ;CLEAR T2 OVERFLOW FLAG            (NO RELOAD)
CLR IRCO.3 ;CLEAR CAPTURE FLAG IEX4          PB: JB IRCO.4,CAPC1 ;WAIT FOR CAPTURE
MOV CCEN,#00000100B ;CAPTURE MODE FOR        FLAG
CCU1.                                          JNB IRCO.6,PB ;WAIT FOR TIMER2 OVER
MOV T2CO,#01H ;START TIMER/COUNTER2          FLOW
(NO RELOAD)                                  CLR IRCO.6
PHA2: JB IRCO.3,CAPC ;WAIT FOR CAPTURE -      LJMP PHB_0 ;PHB NO SIGNAL
FLAG SET

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CAPC1: CLR IRCO.5 ;CLEAR CAPTURE FLAG RET
IEX6 DPSUB2: CLR C
MOV CCEN,#01000000B ;CAPTURE MODE FOR MOV A,CCL3
CCU3. MOV R3,CCL1
PC1: JB IRCO.5,ST1 SUBB A,R3
JNB IRCO.6,PC1 MOV TIME+2,A
CLR IRCO.6 MOV A,CCH3
LJMP ZEC1 MOV R2,CCH1
ST1: MOV T2CO,#00H ;STOP TIMER/COUNTER2 SUBB A,R2
MOV NLOW,CCL1 ;STORE DELAY TIME MOV TIME+3,A
MOV NLOW+1,CCH1 MOV 12H,1AH
MOV NLOW+2,CCL2 MOV 13H,1BH
MOV NLOW+3,CCH2 RET
MOV NLOW+6,CCL3 ;caculate rms.value
MOV NLOW+7,CCH3 ;file rmstest.asm
LCALL DPSUB1 ;TIME PHA. COMPARE PHB. ;start date 29/10/98
LCALL DPSUB2 ;TIME PHA. COMPARE PHC. RMS A: MOV DPTR,#9300H
LJMP RMS_A ;FINE RMS. VALUE CALL RMS
ZEC1: MOV T2CO,#00H MOV DPTR,#9100H
MOV CCL3,#00H INC R0
MOV CCH3,#00H MOV A,R0
LCALL DPSUB1 ;TIME PHA. COMPARE PHB. MOVX @DPTR,A
LCALL DPSUB2 ;TIME PHA. COMPARE PHC. RMS B: MOV DPTR,#9500H
LJMP RMS_A ;FINE RMS. VALUE CALL RMS
PHB_0: MOV T2CO,#00H MOV DPTR,#9101H
MOV CCL1,#00H MOV A,R0
MOV CCH1,#00H MOVX @DPTR,A
MOV CCL2,#00H RMS C: MOV DPTR,#9700H
MOV CCH2,#00H CALL RMS
MOV CCL3,#00H MOV DPTR,#9102H
MOV CCH3,#00H MOV A,R0
LCALL DPSUB1 ;TIME PHA. COMPARE PHB. MOVX @DPTR,A
LCALL DPSUB2 ;TIME PHA. COMPARE PHC. LJMP PH ;GO TO PHASE SHIFT
LJMP RMS_A ;FINE RMS. VALUE RMS: MOV 10H,DPL ;SAVE ADDRESS
DPSUB1: CLR C MOV 11H,DPH ;SAVE ADDRESS
MOV A,CCL2 MOV R0,#00H ;LOOP 1
MOV R3,CCL1 MOV R6,#02H ;LOOP 2
SUBB A,R3 CALL RANDOM
MOV TIME,A MOV 1AH,1CH ;SAVE RESULT FROM
MOV A,CCH2 RANDOM
MOV R2,CCH1 MOV 1BH,#00H ;MSB RESULT
SUBB A,R2 DEC R0
MOV TIME+1,A RMS1: MOV DPL,10H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV DPH,11H          CALL DPDIV      ;SUB DIVIDER 16 BIT
INC DPTR             MOV 1CH,DPL
MOV 10H,DPL          MOV 1DH,DPH
MOV 11H,DPH          CALL DPCOM1     ;SUB COMPARE
CALL RANDOM          MOV 1CH,DPL     ;RESULT LSB
MOV 1DH,1CH          ;SAVE RESULT FROM
RANDOM                MOV 1DH,DPH     ;RESULT MSB
MOV DPL,1DH          MOV R2,#00H     ;
MOV DPH,#00H         MOV R3,#78H     ;+120'
MOV R3,1AH           CALL DPADD      ;SUB ADD 16 BIT
MOV R2,1BH           MOV 10H,DPL     ;LSB ANGLE A-B+120'
CALL DPADD           MOV 11H,DPH     ;MSB ANGLE A-B+120'
MOV 1AH,DPL          MOV DPL,1CH     ;
MOV 1BH,DPH          MOV DPH,1DH     ;
DJNZ R0,RMS1         MOV R2,#00H
DJNZ R6,RMS1         MOV R3,#0F0H     ;+240'
CALL ROOT            CALL DPADD
MOV R0,1EH           ;SAVE RESULT RMS.VALUE
INC R0               ;ADJUST ;angle A-C, A-C+120', A-C+240'
RET
;random sub
;x[n]^2/n
RANDOM: MOVX A,@DPTR  ;LODE DATA
MOV B,A              C/55MICROSEC
MUL AB              ;POWER 2
MOV DPL,A
MOV DPH,B
MOV R2,#02H
MOV R3,#00H
CALL DPDIV          ;SUB DIVIDER 16 BIT
MOV 1CH,DPL         ;SAVE RESULT
RET
;angle phase shift program A-B,A-C
;file pha.asm
;start date 27/5/98
;angle A-B, A-B+120', A-B+240'
PH: MOV 1AH,12H
MOV 1BH,13H
MOV DPL,18H         ;LSB ANGLE A-B
MOV DPH,19H         ;MSB ANGLE A-B
MOV R2,#00H
MOV R3,#37H        ;DIVIDER ANG.A-
B/55MICROSEC
CALL POS B
MOV 1CH,DPL         ;SUB DIVIDER 16 BIT
MOV 1DH,DPH
CALL DPCOM1         ;SUB COMPARE
MOV 1CH,DPL         ;RESULT LSB
MOV 1DH,DPH         ;RESULT MSB
MOV R2,#00H
MOV R3,#78H        ;+120'
CALL DPADD          ;SUB ADD 16 BIT
MOV 14H,DPL         ;LSB ANGLE A-C+120'
MOV 15H,DPH         ;MSB ANGLE A-C+120'
MOV DPL,1EH
MOV DPH,1FH
MOV R2,#00H
MOV R3,#0F0H       ;+240'
CALL DPADD
MOV 16H,DPL         ;LSB ANGLE A-C+240'
MOV 17H,DPH         ;MSB ANGLE A-C+240'
CALL POS B

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV R1,10H
CALL COS
MOV DPTR,#9107H
MOVX @DPTR,A
CALL SIN
MOV DPTR,#9109H
MOVX @DPTR,A
CALL POS_C
MOV R1,16H
CALL COS
MOV DPTR,#9108H
MOVX @DPTR,A
CALL SIN
MOV DPTR,#910AH
MOVX @DPTR,A
CALL NEG_B
MOV R1,12H
CALL COS
MOV DPTR,#910BH
MOVX @DPTR,A
CALL SIN
MOV DPTR,#910DH
MOVX @DPTR,A
CALL NEG_C
MOV R1,14H
CALL COS
MOV DPTR,#910CH
MOVX @DPTR,A
CALL SIN
MOV DPTR,#910EH
MOVX @DPTR,A
CALL ZERO_B
MOV R1,1CH
CALL COS
MOV DPTR,#9103H
MOVX @DPTR,A
CALL SIN
MOV DPTR,#9105H
MOVX @DPTR,A
CALL ZERO_C
MOV R1,1EH
CALL COS
MOV DPTR,#9104H

MOVX @DPTR,A
CALL SIN
MOV DPTR,#9106H
MOVX @DPTR,A
LJMP SYM1
;sub compare angle
DPCOM1: MOV R2,#01H
MOV R3,#2AH ;COMPARE ANGLE <#012AH
CALL DPCOM
JC DPCOM2 ;ANGLE <#012AH
MOV R2,#00H ;
MOV R3,#03H ;
CALL DPSUB ;SUB ANGLE-03H
RET
DPCOM2: MOV R2,#00H
MOV R3,#0C6H ;COMPARE ANGLE <#0C6H
CALL DPCOM
JC DPCOM3 ;ANGLE <#0C6H
MOV R2,#00H ;
MOV R3,#02H ;
CALL DPSUB ;SUB ANGLE-02H
RET
DPCOM3: MOV R2,#00H
MOV R3,#63H ;COMPARE ANGLE <#063H
CALL DPCOM
JC DPCOM4 ;ANGLE <#063H
MOV R2,#00H ;
MOV R3,#01H ;
CALL DPSUB ;SUB ANGLE-01H
RET
DPCOM4: RET
;sub angle and sign ("0"= +,"1"= - )
POS_B: MOV DPL,10H
MOV DPH,11H
CALL ANG1
MOV 10H,DPL ;LSB(A-B+120°)
MOV 11H,DPH ;MSB
MOV 12H,C ;SING SIN(A-B+120°)
CALL XR
MOV 0AH,C ;SING COS(A-B+120°)
RET
POS_C: MOV DPL,16H
MOV DPH,17H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CALL ANG1 ;sub slov angle (0-90',91'-180',181'-270',271'-360',>360')
MOV 16H,DPL ;LSB(A-C+240') ANG1: MOV R2,#00H
MOV 17H,DPH ;MSB MOV R3,#5BH ;#005BH = 91'
MOV 13H,C ;SING SIN(A-C+240') CALL DPCOM ;SUB COMPARE 16 BIT
CALL XR JNC ANG2 ;ANGLE >= 91'
MOV 0BH,C ;SING COS(A-C+240') CLR C ;ANGLE < 91' (+)SIN
RET CLR 07H ;(+)COS
RET

NEG_B: MOV DPL,12H
MOV DPH,13H ANG2: MOV R2,#00H
CALL ANG1 MOV R3,#0B5H ;#00B5H = 181'
MOV 12H,DPL ;LSB(A-B+240') CALL DPCOM ;SUB COMPARE 16 BIT
MOV 13H,DPH ;MSB JNC ANG3 ;ANGLE >= 181'
MOV 14H,C ;SING SIN(A-B+240') MOV R2,DPH ;ANGLE < 181'
CALL XR MOV R3,DPL
MOV 0CH,C ;SING COS(A-B+240') MOV DPL,#0B4H
RET MOV DPH,#00H
NEG_C: MOV DPL,14H CALL DPSUB ;180' - ANGLE
MOV DPH,15H CLR C ;(+) SIN
CALL ANG1 SETB 07H ;(-) COS
MOV 14H,DPL ;LSB(A-C+120') RET
MOV 15H,DPH ;MSB ANG3: MOV R2,#01H
MOV 15H,C ;SING SIN(A-C+120') MOV R3,#0FH ;#010FH = 271'
CALL XR CALL DPCOM ;SUB COMPARE 16 BIT
MOV 0DH,C ;SING COS(A-C+120') JNC ANG4 ;ANGLE >= 271'
RET MOV R2,#00H
ZERO_B: MOV DPL,1CH MOV R3,#0B4H
MOV DPH,1DH CALL DPSUB ;ANGLE -180'
CALL ANG1 SETB C ;(-)
MOV 1CH,DPL ;LSB(A-B) CLR 07H ;(-)
MOV 1DH,DPH ;MSB RET
MOV 10H,C ;SING SIN(A-B) ANG4: MOV R2,#01H
CALL XR MOV R3,#69H ;#0169H = 361'
MOV 08H,C ;SING COS(A-B) CALL DPCOM ;SUB COMPARE 16 BIT
RET JNC ANG5 ;ANGLE >= 361'
ZERO_C: MOV DPL,1EH MOV R2,DPH
MOV DPH,1FH MOV R3,DPL
CALL ANG1 MOV DPL,#68H
MOV 1EH,DPL ;LSB(A-C) MOV DPH,#01H
MOV 1FH,DPH ;MSB CALL DPSUB ;360' - ANGLE
MOV 11H,C ;SING SIN(A-C) SETB C ;(-)
CALL XR SETB 07H ;(+)
MOV 09H,C ;SING COS(A-C) RET
RET ANG5: MOV R2,#01H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV R3,#68H
CALL DPSUB ;ANGLE - 360'
LJMP ANG1
;program symmetrical component 1
;file sys1.asm
;date 29/5/98
SYMI: MOV DPTR,#9100H ;ADDRESS Vamax
MOVX A,@DPTR
MOV R7,A ;SAVE Vamax
MOV DPTR,#9103H ;ADDRESS COSB(ZERO_B)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9101H ;Vbmax
MOVX A,@DPTR
MUL AB ;Vb * COS (A-B)
MOV 00H,A ;LSB (RESULT)
MOV 06H,B ;MSB
MOV DPTR,#9104H ;ADDRESS COSC(ZERO_C)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9102H ;Vcmax
MOVX A,@DPTR
MUL AB ;Vc * COS (A-C)
MOV 0AH,A ;LSB (RESULT)
MOV 0BH,B ;MSB
MOV DPTR,#9105H ;ADDRESS SINB(ZERO_B)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9101H ;Vbmax
MOVX A,@DPTR
MUL AB ;Vb * SIN (A-B)
MOV 0CH,A ;LSB (RESULT)
MOV 0DH,B ;MSB
MOV DPTR,#9106H ;ADDRESS SINC(ZERO_C)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9102H ;Vcmax
MOVX A,@DPTR
MUL AB ;Vc * SIN (A-C)
MOV 0EH,A ;LSB (RESULT)
MOV 0FH,B ;MSB
MOV DPTR,#9107H ;ADDRESS COSB(POS_B)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9101H ;Vbmax
MOVX A,@DPTR
MUL AB ;Vb * COS (A-B+120')
MOV 10H,A ;LSB (RESULT)
MOV 11H,B ;MSB
MOV DPTR,#9108H ;ADDRESS COSC(POS_C)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9102H ;Vcmax
MOVX A,@DPTR
MUL AB ;Vc * COS (A-C+240')
MOV 12H,A ;LSB (RESULT)
MOV 13H,B ;MSB
MOV DPTR,#9109H ;ADDRESS SINB(POS_B)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9101H ;Vbmax
MOVX A,@DPTR
MUL AB ;Vb * SIN (A-B+120')
MOV 14H,A ;LSB (RESULT)
MOV 15H,B ;MSB
MOV DPTR,#910AH ;ADDRESS SINC(POS_C)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9102H ;Vcmax
MOVX A,@DPTR
MUL AB ;Vc * SIN (A-B+240')
MOV 16H,A ;LSB (RESULT)
MOV 17H,B ;MSB
MOV DPTR,#910BH ;ADDRESS COSB(NEG_B)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9101H ;Vbmax
MOVX A,@DPTR
MUL AB ;Vb * COS (A-B+240')
MOV 18H,A ;LSB (RESULT)
MOV 19H,B ;MSB
MOV DPTR,#910CH ;ADDRESS COSC(NEG_C)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9102H ;Vcmax
MOVX A,@DPTR

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MUL AB ;Vc * COS (A-C+120')
MOV 1AH,A ;LSB (RESULT)
MOV 1BH,B ;MSB
MOV DPTR,#910DH ;ADDRESS SINB(NEG_B)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9101H ;Vbmax
MOVX A,@DPTR
MUL AB ;Vb * SIN (A-B+240')
MOV 1CH,A ;LSB (RESULT)
MOV 1DH,B ;MSB
MOV DPTR,#910EH ;ADDRESS SIN(NEG_C)
MOVX A,@DPTR
MOV B,A
MOV DPTR,#9102H ;Vcmax
MOVX A,@DPTR
MUL AB ;Vc * SIN (A-B+120')
MOV 1EH,A ;LSB (RESULT)
MOV 1FH,B ;MSB
;(Vmax*angle)/FFH
MOV DPL,00H
MOV DPH,06H ;Vb * COS(A-B)
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,00H
MOV 09H,06H
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 00H,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 06H,DPH ;MSB
MOV DPL,0AH
MOV DPH,0BH ;Vc * COS(A-C)
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,0AH
MOV 09H,0BH
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 0AH,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 0BH,DPH ;MSB
MOV DPL,10H
MUL AB ;Vb * COS (A-B+120')
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,10H
MOV 09H,11H
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 10H,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 11H,DPH ;MSB
MOV DPL,12H
MOV DPH,13H ;Vc * COS(A-C+240')
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,12H
MOV 09H,13H
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 12H,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 13H,DPH ;MSB
MOV DPL,18H
MOV DPH,19H ;Vb * COS(A-B+240')
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,18H
MOV 09H,19H
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 18H,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 19H,DPH ;MSB
MOV DPL,1AH
MOV DPH,1BH ;Vb * COS(A-C+120')
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,1AH
MOV 09H,1BH
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 1AH,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 1BH,DPH ;MSB

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV DPL,0CH
MOV DPH,0DH ;Vb * SIN(A-B)
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,0CH
MOV 09H,0DH
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 0CH,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 0DH,DPH ;MSB
MOV DPL,0EH
MOV DPH,0FH ;Vc * SIN(A-C)
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,0EH
MOV 09H,0FH
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 0EH,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 0FH,DPH ;MSB
MOV DPL,14H
MOV DPH,15H ;Vb * SIN(A-B+120')
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,14H
MOV 09H,15H
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 14H,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 15H,DPH ;MSB
MOV DPL,16H
MOV DPH,17H ;Vc * SIN(A-C+240')
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,16H
MOV 09H,17H
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 16H,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 17H,DPH ;MSB
MOV DPL,1DH
MOV DPH,1EH ;Vb * SIN(A-B+240')
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,1DH
MOV 09H,1EH
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 1CH,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 1DH,DPH ;MSB
MOV DPL,1EH
MOV DPH,1FH ;Vc * SIN(A-C+120')
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPDIV ;SUB DIVIDER
MOV 08H,1EH
MOV 09H,1FH
CALL CHEAK ;SUB CHEAK FOR ERROR
DIVIDER(#OFFH)
MOV 1EH,DPL ;LSB (RESULT)
MOV 1FH,DPH ;MSB
LJMP CZ
;sub program cheak result afert #FFH divisor
CHEAK: MOV 24H,DPL ;LSB(RESULT) => 24H
MOV 25H,DPH ;MSB(RESULT) => 25H
MOV R2,#00H
MOV R3,#0FFH
CALL DPMUL ;DPTR*FF = DPTR
MOV R2,DPH
MOV R3,DPL
MOV DPH,09H
MOV DPL,08H
CALL DPSUB ;RESULT - (DPTR)
MOV R2,#00H
MOV R3,#80H
CALL DPCOM ;COMPARE #80H
JC SAVE ;<= #80H GOTO SAVE
INC 24H
SAVE: MOV DPL,24H
MOV DPH,25H
RET

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

:symmetrical component program
;file sym2.asm
:date 30/5/98
;select +,- operation
;cos zero
CZ: MOV 23H,00H ;COS(A-B)
MOV 13H,0AH ;COS(A-C)
MOV C,08H ;SING COS(A-B)
ORL C,09H ;ORL SING COS(A-C)
JNC CO1 ;IF (+,+)
MOV C,08H
ANL C,09H
JC CO4 ;IF (-,-)
SETB C
ANL C,08H
JC CO3 ;IF (-,+)
CALL COS2 ;IF (+,-)
MOV 00H,23H ;LSB (RESULT)
MOV 06H,13H ;MSB
MOV 30H,23H
MOV 31H,13H
MOV C,46H
MOV 40H,C ;SING (RESULT)
LJMP CP
CO1: CALL COS1 ;(+,+)
MOV 00H,23H
MOV 06H,13H
MOV 30H,23H
MOV 31H,13H
CLR 40H ;SING (+)
LJMP CP
CO3: CALL COS3 ;(-,+)
MOV 00H,23H
MOV 06H,13H
MOV 30H,23H
MOV 31H,13H
MOV C,46H
MOV 40H,C ;SING
LJMP CP
CO4: CALL COS4 ;(-,-)
MOV 00H,23H
MOV 06H,13H
MOV 30H,23H
MOV 31H,13H
MOV C,46H
MOV 40H,C ;SING
LJMP CP
;cos positive
CP: MOV 23H,10H ;COS(A-B+120')
MOV 13H,12H ;COS(A-C+240')
MOV C,0AH ;SING COS(A-B)
ORL C,0BH ;ORL SING COS(A-C)
JNC COO1 ;IF (+,+)
MOV C,0AH
ANL C,0BH
JC COO4 ;IF (-,-)
SETB C
ANL C,0AH
JC COO3 ;IF (-,+)
CALL COS2 ;IF (+,-)
MOV 10H,23H ;LSB (RESULT)
MOV 11H,13H ;MSB
MOV 46H,23H
MOV 47H,13H
MOV C,46H
MOV 42H,C ;SING (RESULT)
LJMP CN
COO1: CALL COS1 ;(+,+)
MOV 10H,23H
MOV 11H,13H
MOV 46H,23H
MOV 47H,13H
CLR 42H ;SING (+)
LJMP CN
COO3: CALL COS3 ;(-,+)
MOV 10H,23H
MOV 11H,13H
MOV 46H,23H
MOV 47H,13H
MOV C,46H
MOV 42H,C ;SING
LJMP CN
COO4: CALL COS4 ;(-,-)
MOV 10H,23H
MOV 11H,13H
MOV 46H,23H
MOV 47H,13H
MOV C,46H
MOV 42H,C ;SING
LJMP CN

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOV 47H,13H		MOV 4DH,13H	
MOV C,46H		MOV C,46H	
MOV 42H,C	;SING	MOV 44H,C	;SING (RESULT)
LJMP CN		LJMP SZ	
;cos negative		;sine zero	
CN: MOV 23H,18H	;COS(A-B+240°)	SZ: MOV 23H,0CH	;SIN(A-B)
MOV 13H,1AH	;COS(A-C+120°)	MOV 13H,0EH	;SIN(A-C)
MOV C,0CH	;SING COS(A-B)	MOV C,10H	;SING SIN(A-B)
ORL C,0DH	;ORL SING COS(A-C)	ORL C,11H	;ORL SING SIN(A-C)
JNC COO01	;IF (+,+)	JNC SN1	;IF (+,+)
MOV C,0CH		MOV C,10H	
ANL C,0DH		ANL C,11H	
JC COO04	;IF (-,+)	JC SN4	;IF (-,+)
SETB C		SETB C	
ANL C,0CH		ANL C,10H	
JC COO03	;IF (-,+)	JC SN3	;IF (-,+)
CALL COS2	;IF (+,-)	CALL SIN2	;IF (+,-)
MOV 18H,23H	;LSB (RESULT)	MOV 0CH,23H	;LSB (RESULT)
MOV 19H,13H	;MSB	MOV 0DH,13H	;MSB
MOV 4CH,23H		MOV 42H,23H	
MOV 4DH,13H		MOV 43H,13H	
MOV C,46H		MOV C,47H	
MOV 44H,C	;SING (RESULT)	MOV 41H,C	;SING (RESULT)
LJMP SZ		LJMP SPT	
COO01: CALL COS1	;(+,+)	SN1: CALL SIN1	;(+,+)
MOV 18H,23H		MOV 0CH,23H	
MOV 19H,13H		MOV 0DH,13H	
MOV 4CH,23H		MOV 42H,23H	
MOV 4DH,13H		MOV 43H,13H	
CLR 44H	;SING (+)	CLR 41H	;SING (+)
LJMP SZ		LJMP SPT	
COO03: CALL COS3	;IF (-,+)	SN3: CALL SIN3	;(-,+)
MOV 18H,23H	;LSB (RESULT)	MOV 0CH,23H	
MOV 19H,13H	;MSB	MOV 0DH,13H	
MOV 4CH,23H		MOV 42H,23H	
MOV 4DH,13H		MOV 43H,13H	
MOV C,46H		MOV C,47H	
MOV 44H,C	;SING (RESULT)	MOV 41H,C	;SING
LJMP SZ		LJMP SPT	
COO04: CALL COS4	;IF (-,-)	SN4: CALL SIN4	;(-,-)
MOV 18H,23H	;LSB (RESULT)	MOV 0CH,23H	
MOV 19H,13H	;MSB	MOV 0DH,13H	
MOV 4CH,23H		MOV 42H,23H	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV 43H,13H
SETB 41H ;SING
LJMP SPT
;sin positive
SPT: MOV 23H,14H ;SIN(A-B+120')
MOV 13H,16H ;SIN(A-C+240')
MOV C,12H ;SING SIN(A-B)
ORL C,13H ;ORL SING SIN(A-C)
JNC SNN1 ;IF (+,+)
MOV C,12H
ANL C,13H
JC SNN4 ;IF (-,-)
SETB C
ANL C,12H
JC SNN3 ;IF (-,+)
CALL SIN2 ;IF (+,-)
MOV 14H,23H ;LSB (RESULT)
MOV 15H,13H ;MSB
MOV 48H,23H
MOV 49H,13H
MOV C,47H
MOV 43H,C ;SING (RESULT)
LJMP SN
SNN1: CALL SIN1 ;(+,+)
MOV 14H,23H
MOV 15H,13H
MOV 48H,23H
MOV 49H,13H
CLR 43H ;SING (+)
LJMP SN
SNN3: CALL SIN3 ;IF (+,-)
MOV 14H,23H ;LSB (RESULT)
MOV 15H,13H ;MSB
MOV 48H,23H
MOV 49H,13H
MOV C,47H
MOV 43H,C ;SING (RESULT)
LJMP SN
SNN4: CALL SIN4 ;IF (+,-)
MOV 14H,23H ;LSB (RESULT)
MOV 15H,13H ;MSB
MOV 48H,23H
MOV 49H,13H
SETB 45H ;SING (RESULT)
SETB 43H ;SING (RESULT)
LJMP SN
;sin negative
SN: MOV 23H,1CH ;SIN(A-B+240')
MOV 13H,1EH ;SIN(A-C+120')
MOV C,14H ;SING SIN(A-B)
ORL C,15H ;ORL SING SIN(A-C)
JNC SNNN1 ;IF (+,+)
MOV C,14H
ANL C,15H
JC SNNN4 ;IF (-,-)
SETB C
ANL C,14H
JC SNNN3 ;IF (-,+)
CALL SIN2 ;IF (+,-)
MOV 1CH,23H ;LSB (RESULT)
MOV 1DH,13H ;MSB
MOV 2AH,23H
MOV 2BH,13H
MOV C,47H
MOV 45H,C ;SING (RESULT)
LJMP POWER
SNNN1: CALL SIN1 ;(+,+)
MOV 1CH,23H
MOV 1DH,13H
MOV 2AH,23H
MOV 2BH,13H
CLR 45H ;SING (+)
LJMP POWER
SNNN3: CALL SIN3 ;IF (+,-)
MOV 1CH,23H ;LSB (RESULT)
MOV 1DH,13H ;MSB
MOV 2AH,23H
MOV 2BH,13H
MOV C,47H
MOV 45H,C ;SING (RESULT)
LJMP POWER
SNNN4: CALL SIN4 ;IF (+,-)
MOV 1CH,23H ;LSB (RESULT)
MOV 1DH,13H ;MSB
MOV 2AH,23H
MOV 2BH,13H
SETB 45H ;SING (RESULT)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LJMP POWER
;sub cosine (Va+Vb.COSB+Vc.COSC)
;result sign in 28H(BIT 46H)
COS1: MOV DPH,#00H ;(+,+)
MOV DPL,R7 ;Va
MOV R2,#00H
MOV R3,23H ;Vb.COSB
CALL DPADD
MOV R2,#00H
MOV R3,13H ;Vc.COSC
CALL DPADD
MOV 23H,DPL ;LSB RESULT
MOV 13H,DPH ;MSB
CLR 46H ;SING (+)
RET
COS2: MOV DPH,#00H ;(+,-)
MOV DPL,R7 ;Va
MOV R2,#00H
MOV R3,23H ;Vb.COSB
CALL DPADD
MOV R2,#00H
MOV R3,13H
CALL DPSUB
JNC C2 ;IF SING "+"
SETB 46H ;IF SING "-"
MOV R2,DPH
MOV R3,DPL
MOV DPH,#0FFH
MOV DPL,#0FFH
CALL DPSUB
INC DPTR
LJMP C22
C2: CLR 46H ;SING "+"
C22: MOV 23H,DPL ;LSB RESULT
MOV 13H,DPH ;MSB
RET
COS3: MOV DPH,#00H ;(-,+)
MOV DPL,R7 ;Va
MOV R2,#00H
MOV R3,23H ;Vb.COSB
CALL DPSUB
JNC C3 ;IF SING "+"
MOV R2,DPH ;IF SING "-"
MOV DPL,R7 ;Va
MOV R3,23H ;Vb.COSB
CALL DPADD
MOV R2,#00H
MOV R3,13H ;Vc.COSC
CALL DPADD ;(XX+Vc)
MOV 23H,DPL ;LSB RESULT
MOV 13H,DPH ;MSB
RET
C33: MOV R2,#00H
MOV R3,13H ;Vc.COSC
CALL DPSUB ;(-).(XX - Vc)
JNC CCC ;IF (-).(+)
MOV R2,DPH ;IF (-).(-)
MOV R3,DPL
MOV DPL,#0FFH
MOV DPH,#0FFH
CALL DPSUB
INC DPTR
MOV 23H,DPL ;LSB RESULT
MOV 13H,DPH ;MSB
CLR 46H ;SING (+)
RET
CCC: MOV 23H,DPL ;LSB RESULT
MOV 13H,DPH ;MSB
SETB 46H ;SING (-)
RET
COS4: MOV DPH,#00H ;(-,-)
MOV DPL,23H ;VbCOSB
MOV R2,#00H
MOV R3,13H ;VcCOSC
CALL DPADD ;(-).(Vb+Vc)
MOV R2,DPH
MOV R3,DPL
MOV DPH,#00H
MOV DPL,R7 ;Va
MOV R3,DPL
MOV DPH,#0FFH
CALL DPSUB
INC DPTR
MOV 23H,DPL ;LSB RESULT
MOV 13H,DPH ;MSB
CLR 46H ;SING (+)
RET

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CALL DPSUB      ;Va - (Vb+Vc)
JNC C4          ;IF SING (+)
SETB 46H       ;IF SING (-)
MOV R2,DPH
MOV R3,DPL
MOV DPH,#0FFH
MOV DPL,#0FFH
CALL DPSUB
INC DPTR
LJMP C44

C4: CLR 46H     ;IF SING (+)
C44: MOV 23H,DPL
MOV 13H,DPH
RET

;sub sin (+VbSINB+VcSINC)
;result sign in 28H(BIT 47H)
SIN1: MOV DPH,#00H ;(+,+)
MOV DPL,23H ;VbSINB
MOV R2,#00H
MOV R3,13H ;VcSINC
CALL DPADD
MOV 23H,DPL ;LSB RESULT
MOV 13H,DPH ;MSB RESULT
CLR 47H ;SING (+)
RET

SIN2: MOV DPH,#00H ;(+,-)
MOV DPL,23H ;VbSINB
MOV R2,#00H
MOV R3,13H ;VcSINC
CALL DPSUB
JNC S2 ;IF SING (+)
SETB 47H ;IF SING (-)
MOV R2,DPH
MOV R3,DPL
MOV DPH,#0FFH
MOV DPL,#0FFH
CALL DPSUB
INC DPTR
LJMP S22

S2: CLR 47H ;IF SING (+)
S22: MOV 23H,DPL ;LSB RESULT
MOV 13H,DPH ;MSB
RET

SIN3: MOV DPH,#00H ;(-,+)
MOV DPL,13H ;VbSINB
MOV R2,#00H
MOV R3,23H ;VcSINC
CALL DPSUB ;(-).(Vb-Vc)
JNC S3 ;IF (-).(+XX) = (-XX)
CLR 47H ;IF (-).(-XX) = (XX)
MOV R2,DPH
MOV R3,DPL
MOV DPH,#0FFH
MOV DPL,#0FFH
CALL DPSUB
INC DPTR
LJMP S33

S3: SETB 47H
S33: MOV 23H,DPL ;LSB RESULT
MOV 13H,DPH ;MSB
RET

SIN4: MOV DPH,#00H ;(-,-)
MOV DPL,13H ;VbSINB
MOV R2,#00H
MOV R3,23H ;VcSINC
CALL DPADD ;(-).(Vb+Vc)
MOV 23H,DPL ;LSB RESULT
MOV 13H,DPH ;MSB
SETB 47H ;SING (-)
RET

;power 2 and divider 05H
;file pow2.asm
;date 31/5/98
POWER: MOV DPL,00H ;LSB
MOV DPH,06H ;MSB COS(ZERO)
MOV R2,#00H ;
MOV R3,#03H ;DIVIDER 03H
CALL DPDIV
MOV 26H,00H
MOV 27H,06H
CALL CHEAK3 ;CHEAK ERROR
MOV A,DPL
MOV B,DPL
MUL AB ;POWER 2
MOV DPL,A ;LSB
MOV DPH,B ;MSB

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV R2,#00H
MOV 03H,07H
CALL DPADD
MOV 00H,DPL ;LSB RESULT
MOV 06H,DPH ;MSB
MOV DPL,0CH ;LSB
MOV DPH,0DH ;MSB SIN(ZERO)
MOV R2,#00H ;
MOV R3,#03H ;DIVIDER 05H
CALL DPDIV
MOV 26H,0CH
MOV 27H,0DH
CALL CHEAK3 ;CHEAK ERROR
; MOV 08H,DPL ;FOR FIND ANGLE
MOV A,DPL
MOV B,DPL
MUL AB ;POWER 2
MOV DPL,A ;LSB
MOV DPH,B ;MSB
MOV R2,#00H
MOV 03H,07H
CALL DPADD
MOV 0CH,DPL ;LSB RESULT
MOV 0DH,DPH ;MSB
MOV DPL,10H ;LSB
MOV DPH,11H ;MSB COS(POS)
MOV R2,#00H ;
MOV R3,#03H ;DIVIDER 05H
CALL DPDIV
MOV 26H,10H
MOV 27H,11H
CALL CHEAK3 ;CHEAK ERROR
MOV A,DPL
MOV B,DPL
MUL AB ;POWER 2
MOV DPL,A ;LSB
MOV DPH,B ;MSB
MOV R2,#00H
MOV 03H,07H
CALL DPADD
MOV 10H,DPL ;LSB RESULT
MOV 11H,DPH ;MSB
MOV DPL,14H ;LSB
MOV DPH,15H ;MSB
MOV DPL,18H ;LSB
MOV DPH,19H ;MSB COS(ZERO)
MOV R2,#00H ;
MOV R3,#03H ;DIVIDER 05H
CALL DPDIV
MOV 26H,18H
MOV 27H,19H
CALL CHEAK3 ;CHEAK ERROR
MOV A,DPL
MOV B,DPL
MUL AB ;POWER 2
MOV DPL,A ;LSB
MOV DPH,B ;MSB
MOV R2,#00H
MOV 03H,07H
CALL DPADD
MOV 18H,DPL ;LSB RESULT
MOV 19H,DPH ;MSB
MOV DPL,1CH ;LSB
MOV DPH,1DH ;MSB SIN(ZERO)
MOV R2,#00H ;
MOV R3,#03H ;DIVIDER 05H
CALL DPDIV
MOV 26H,1CH
MOV 27H,1DH
MOV DPH,15H ;MSB SIN(POS)
MOV R2,#00H ;
MOV R3,#03H ;DIVIDER 05H
CALL DPDIV
MOV 26H,14H
MOV 27H,15H
CALL CHEAK3 ;CHEAK ERROR
MOV R2,#00H
MOV 03H,07H
CALL DPADD
MOV 14H,DPL ;LSB RESULT
MOV 15H,DPH ;MSB
MOV DPL,18H ;LSB
MOV DPH,19H ;MSB COS(ZERO)
MOV R2,#00H ;
MOV R3,#03H ;DIVIDER 05H
CALL DPDIV
MOV 26H,18H
MOV 27H,19H
CALL CHEAK3 ;CHEAK ERROR
MOV A,DPL
MOV B,DPL
MUL AB ;POWER 2
MOV DPL,A ;LSB
MOV DPH,B ;MSB
MOV R2,#00H
MOV 03H,07H
CALL DPADD
MOV 18H,DPL ;LSB RESULT
MOV 19H,DPH ;MSB
MOV DPL,1CH ;LSB
MOV DPH,1DH ;MSB SIN(ZERO)
MOV R2,#00H ;
MOV R3,#03H ;DIVIDER 05H
CALL DPDIV
MOV 26H,1CH
MOV 27H,1DH

```

```

CALL CHEAK3 ;CHEAK ERROR MOV DPL,24H
MOV 0AH,DPL ;FOR FIND ANGLE MOV DPH,25H
MOV A,DPL RET
MOV B,DPL ;CASE1 => = #01H
MUL AB ;POWER 2 SAVE1: MOV R2,#00H
MOV DPL,A ;LSB MOV R3,#02H
MOV DPH,B ;MSB MOV DPL,24H
MOV R2,#00H MOV DPH,25H
MOV 03H,07H CALL DPMUL ;MUL #02H
CALL DPADD MOV R2,#00H
MOV 1CH,DPL ;LSB RESULT MOV R3,#03H
MOV 1DH,DPH ;MSB CALL DPDIV ;DIV #03H
LJMP ADD INC DPL
;sub program cheak result afert #03H divisor MOV R7,DPL
CHEAK3: MOV 24H,DPL ;LSB(RESULT) => 24H MOV DPL,24H
MOV 25H,DPH ;MSB(RESULT) => 25H MOV DPH,25H
MOV R2,#00H RET
MOV R3,#03H ;CASE => = #00H
CALL DPMUL ;DPTR*03H = DPTR SAVE2: MOV R7,#00H
MOV R2,DPH MOV DPL,24H
MOV R3,DPL MOV DPH,25H
MOV DPH,27H RET
MOV DPL,26H ;addition zero
CALL DPSUB ;RESULT - (DPTR) ADD: MOV DPL,00H ;LSB
MOV R2,#00H MOV DPH,06H ;MSB COS(ZERO)
MOV R3,#01H MOV R2,0DH ;MSB
CALL DPCOM ;COMPARE #01H MOV R3,0CH ;LSB SIN(ZERO)
JC SAVE2 ;< #01H(= 00H) GOTO SAVE2 CALL DPADD
MOV R2,#00H MOV 00H,DPL ;LSB RESULT
MOV R3,#02H MOV 06H,DPH ;MSB
CALL DPCOM ;COMPARE #02H ;addition positive
JC SAVE1 ;< #02H(= 01H) GOTO SAVE1 MOV DPL,10H ;LSB
;CASE => = #02H MOV DPH,11H ;MSB COS(POS)
MOV R2,#00H MOV R2,15H ;MSB
MOV R3,#04H MOV R3,14H ;LSB SIN(POS)
MOV DPL,24H CALL DPADD
MOV DPH,25H MOV 10H,DPL ;LSB RESULT
CALL DPMUL ;MUL #04H MOV 11H,DPH ;MSB
MOV R2,#00H ;addition negative
MOV R3,#03H MOV DPL,18H ;LSB
CALL DPDIV ;DIV #03H MOV DPH,19H ;MSB COS(ZERO)
INC DPL MOV R2,1DH ;MSB
MOV R7,DPL MOV R3,1CH ;LSB SIN(ZERO)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CALL DPADD
MOV 18H,DPL ;LSB RESULT
MOV 19H,DPH ;MSB
;square root
;NEW X = (OLD X + S/OLDX)/2
;S = SQUARE ROOT TERM
MOV 1AH,00H
MOV 1BH,06H
CALL ROOT
MOV 00H,1EH ;RESULT ZERO
MOV 1AH,10H
MOV 1BH,11H
CALL ROOT
MOV 10H,1EH ;RESULT POSITIVE
MOV 1AH,18H
MOV 1BH,19H
CALL ROOT
MOV 18H,1EH ;RESULT NEGATIVE
LJMP FINAL
;sub root
ROOT: MOV 1DH,#0BH ;LOOP = 11 ROUND
MOV 1EH,#01H ;LSB X (START)
MOV 1FH,#00H ;MSB
SQR: MOV R2,1FH ;LSB X(OLD)
MOV R3,1EH ;MSB
MOV DPL,1AH
MOV DPH,1BH
CALL DPDIV ;(S/X(old)) = DPTR
CALL DPADD ;DPTR +X(old) = DPTR
MOV R2,#00H
MOV R3,#02H
CALL DPDIV ;DPTR/02H
MOV 1EH,DPL ;LSB SAVE X(new)
MOV 1FH,DPH ;MSB
MOV R2,#00H ;CHEAK X(new) = 00H
MOV R3,#00H
LCALL DPCOM
JZ STOP ;X(new) = 00H -> STOP
DJNZ 1DH,SQR ;CHEAK LOOP
STOP: RET
;display to decimal * 10e-2(R1.R2)
;final zero component
FINAL: MOV B,00H ;ZERO
MOV A,#33H ;3H(3)D = 033H
MUL AB ;
MOV DPL,A ;LSB
MOV DPH,B ;MSB
MOV R2,#00H
MOV R3,#33H ;DIV BY 033H = FFH/5H
CALL DPDIV
MOV 12H,DPL
MOV 13H,DPH
MOV R2,#01H
MOV R3,#27H ;MUL 0127H =7.5D/255D*10E-4
CALL DPMUL
MOV 12H,DPL
MOV 13H,DPH
CALL HTOD ;SUB HEX TO DECIMAL
MOV 12H,R2 ;LSB RESULT (ZERO)
MOV 13H,R1 ;MSB
;final positive component
MOV 1EH,10H ;POSITIVE FOR UNBALNCE
FACTOR
MOV B,10H ;POSITIVE
MOV A,#33H ;3H(3)D = 033H
MUL AB ;
MOV DPL,A ;LSB
MOV DPH,B ;MSB
MOV R2,#00H
MOV R3,#33H ;DIV BY 033H = FFH/5H
CALL DPDIV
MOV 10H,DPL
MOV 11H,DPH
MOV R2,#01H
MOV R3,#27H ;MUL 0127H =7.5D/255D*10E-4
CALL DPMUL
MOV 10H,DPL
MOV 11H,DPH
CALL HTOD ;SUB HEX TO DECIMAL
MOV 10H,R2 ;LSB RESULT (ZERO)
MOV 11H,R1 ;MSB
;final negative component
MOV 1FH,18H ;NEGATIVE FOR UNBALNCE
FACTOR
MOV B,18H ;NEGATIVE
MOV A,#33H ;3H(3)D = 033H

```

```

MUL AB ; INC DPTR ;INC ADDRESS DATA PRO.
MOV DPL,A ;LSB MEMORY
MOV DPH,B ;MSB DJNZ R0,TRAN
MOV R2,#00H LJMP DS_P
MOV R3,#33H ;DIV BY 033H = FFH/5H TRAN1: PUSH DPH
CALL DPDIV PUSH DPL
MOV 18H,DPL MOV DPH,R2 ;MSB DATA MEMORY
MOV 19H,DPH MOV DPL,R3 ;LSB DATA MEMORY
MOV R2,#01H MOVX @DPTR,A ;TRANSFER DATH
MOV R3,#27H ;MUL 0127H =7.5D/255D*10E-4 INC R3
CALL DPMUL POP DPL
MOV 18H,DPL POP DPH
MOV 19H,DPH RET
CALL HTOD ;SUB HEX TO DECIMAL DS_P: MOV DPTR,#0A034H ;ADDRESS POSITIVE
MOV 18H,R2 ;LSB RESULT (ZERO) LCD DISPLAY
MOV 19H,R1 ;MSB MOV A,19H ;MSB POSITIVE
;unbalance factor program LCALL FONT_2
MOV DPH,#27H MOV DPTR,#0A035H ;ADDRESS POSITIVE
MOV DPL,#10H ;DIV 10000/POS LCD DISPLAY
MOV R2,#00H MOV A,19H ;MSB POSITIVE
MOV R3,1FH ;POSITIVE LCALL FONT_1
CALL DPDIV MOV DPTR,#0A037H ;ADDRESS POSITIVE
MOV R2,#00H LCD DISPLAY
MOV R3,1EH ;NEGATIVE MOV A,18H ;LSB POSITIVE
CALL DPMUL LCALL FONT_2
CALL HTOD ;SUB HEX TO DECIMAL MOV DPTR,#0A038H ;ADDRESS POSITIVE LCD
MOV 1AH,R1 ;(MSB)RESULT UNBALANCE DISPLAY
FACTOR MOV A,18H ;LSB POSITIVE
MOV 1BH,R2 ;(LSB1) LCALL FONT_1
MOV 1CH,R3 ;(LSB2) DS_N: MOV DPTR,#0A048H ;ADDRESS NEGATIVE
;DISPALY FINAL LCD DISPLAY
MOV R0,#80 ;LOOP TRANFER DATA MOV A,11H ;MSB NEGATIVE
DISPLAY LCALL FONT_2
MOV R2,#0AH ;MSB ADDRESS DATA MOV DPTR,#0A049H ;ADDRESS POSITIVE
TRANSFER LCD DISPLAY
MOV R3,#28H ;LSB ADDRESS DATA MOV A,11H ;MSB NEGATIVE
TRANSFER LCALL FONT_1
CLR A MOV DPTR,#0A04BH ;ADDRESS POSITIVE
MOV DPTR,#1228H ;ADDRESS DATA LCD DISPLAY
PROGRAM MEMORY MOV A,10H ;LSB NEGATIVE
TRAN: MOVC A,@A+DPTR LCALL FONT_2
CALL TRAN1 MOV DPTR,#0A04CH ;ADDRESS POSITIVE LCD
CLR A DISPLAY

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV A,10H ;LSB NEGATIVE
LCALL FONT_1
DS_Z: MOV DPTR,#0A05CH ;ADDRESS POSITIVE
LCD DISPLAY
MOV A,13H ;MSB ZERO
LCALL FONT_2
MOV DPTR,#0A05DH ;ADDRESS POSITIVE
LCD DISPLAY
MOV A,13H ;MSB ZERO
LCALL FONT_1
MOV DPTR,#0A05FH ;ADDRESS POSITIVE
LCD DISPLAY
MOV A,12H ;LSB ZERO
LCALL FONT_2
MOV DPTR,#0A060H ;ADDRESS POSITIVE LCD
DISPLAY
MOV A,12H ;LSB ZERO
LCALL FONT_1
DS_UB: MOV DPTR,#0A06FH ;ADDRESS POSITIVE
LCD DISPLAY
MOV A,1AH ;LSB1 UNBALANCE FACTOR
LCALL FONT_1
MOV DPTR,#0A070H ;ADDRESS POSITIVE
LCD DISPLAY
MOV A,1BH ;LSB1 UNBALANCE FACTOR
LCALL FONT_2
MOV DPTR,#0A071H ;ADDRESS POSITIVE
LCD DISPLAY
MOV A,1BH ;LSB1 UNBALANCE FACTOR
LCALL FONT_1
MOV DPTR,#0A073H ;ADDRESS POSITIVE LCD
DISPLAY
MOV A,1CH ;LSB2 UNBALANCE FACTOR
LCALL FONT_2
MOV DPTR,#0A074H ;ADDRESS POSITIVE LCD
DISPLAY
MOV A,1CH ;LSB UNBALANCE FACTOR
LCALL FONT_1
DISP: MOV A,#080H ;LINE 1
LCALL LCDWI
MOV R0,#20 ;20 CHAR
MOV DPTR,#0A028H ;DATA ADDRESS
DISP1: MOVX A,@DPTR
LCALL LCDWD
INC DPTR
DJNZ R0,DISP1
MOV R2,#01H
LCALL DELAY
MOV A,#0C0H ;LINE 2
LCALL LCDWI
MOV R0,#20 ;20 CHAR
MOV DPTR,#0A03CH ;DATA ADDRESS
NEGATIVE
DISP2: MOVX A,@DPTR
LCALL LCDWD
INC DPTR
DJNZ R0,DISP2
MOV R2,#01H
LCALL DELAY
MOV A,#094H ;LINE 3
LCALL LCDWI
MOV R0,#20 ;20 CHAR
MOV DPTR,#0A050H ;DATA ADDRESS ZERO
DISP3: MOVX A,@DPTR
LCALL LCDWD
INC DPTR
DJNZ R0,DISP3
MOV R2,#01H
LCALL DELAY
MOV A,#0D4H ;LINE 4
LCALL LCDWI
MOV R0,#20 ;20 CHAR
MOV DPTR,#0A064H ;DATA ADDRESS UB%
DISP4: MOVX A,@DPTR
LCALL LCDWD
INC DPTR
DJNZ R0,DISP4
MOV R2,#01H
LCALL DELAY
LCALL MAIN ;LOOP
SJMP $ ;DYNAMIC STOP
;LCD INITIALIZE
INIT: MOV A,#00111000B ;FUNCTION SET
(8BIT,4LINE,5*7DOT)
LCALL LCDWI

```

POSITIVE

LCALL LCDWI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เปรียบเสมือนให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV A,#00001100B ;DISPLAY ON/OFF ;REG R2,R3,R4
LCALL LCDWI DELAY: MOV R3,#0
MOV A,#06H ;INCREMENT CURSOR DELAY1: MOV R4,#0
LCALL LCDWI DJNZ R4,$
MOV A,#01H ;CLEAR AND HOME DJNZ R3,DELAY1
LCALL LCDWI DJNZ R2,DELAY
MOV R2,#2 RET
LCALL DELAY DELAY2: PUSH ACC
RET MOV A,#15H ;DELAY
;LCD WRITE INSTRUCTION (RS=0) LCDWT: DEC A ;A-1
;INPUT = A JNZ LCDWT ;A<>1 LCDWII
LCDWI: MOV PDATA,A ;DATA TO PORT4 POP ACC
CLR ACC.0 ;RS = 0 RET
CLR ACC.1 ;R/W = 0 ;DECIMAL TO ASCII FOR DISPLAY LCD
CLR ACC.2 ;ENABLE = 0 FONT_1: ANL A,#0FH
MOV PCONT,A ORL A,#30H
LCALL DELAY2 MOVX @DPTR,A ;ASCII
SETB ACC.2 ;ENABLE = 1 RET
MOV PCONT,A FONT_2: MOV B,#10H
LCALL DELAY2 DIV AB
CLR ACC.2 ;ENABLE = 0 ORL A,#30H
MOV PCONT,A MOVX @DPTR,A
MOV A,#0 ;DELAY RET
LCDWII: DEC A ;A-1 ;sub program
JNZ LCDWII ;A<>1 LCDWII ;file sub.asm
RET ;date 31/5/98
;LCD WRITE DATA (RS=1) ;sub xor program C,07H
;INPUT: A ;(C.07H + C/07H)
LCDWD: MOV PDATA,A ;DATA TO PORT4 XR: MOV 06H,C
SETB ACC.0 ;RS = 1 CPL C
CLR ACC.1 ;R/W = 0 ANL C,07H
CLR ACC.2 ;ENABLE = 1 MOV 0EH,C
MOV PCONT,A MOV C,06H
SETB ACC.2 ;ENABLE = 1 ANL C,/07H
MOV PCONT,A ORL C,0EH
CLR ACC.2 ;ENABLE = 0 RET
MOV PCONT,A ;divider program
MOV A,#0 ;DELAY ;IN = DPTR DIVIDEND
LCDWDI: DEC A ;A-1 ; = R2,R3 DIVISOR
JNZ LCDWDI ;A<>1 LCDWII ;OUT = DPTR RESULT
RET ; = R4,R5 REMAINDER
;DELAY SUBROUTINE ; = CARRY FLAG SET WHEN HAS REMAINDER
;IN = R2 ;RES = A,R1,R2,R3,R4,R5,DPTR

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DPDIV: CLR C
MOV R4,#0 ;CLEAR RESULT
MOV R5,#0
MOV R1,#16
DPDIV1: MOV A,DPL
RLC A
MOV DPL,A
MOV A,DPH
RLC A
MOV DPH,A
MOV A,R5 ;*2(WITH CARRY)
ADDC A,R5
MOV R5,A
MOV A,R4
ADDC A,R4
MOV R4,A
MOV A,R5 ;R4R5=R4R5-R2R3 (WITH
CARRY)
SUBB A,R3
MOV R5,A
MOV A,R4
SUBB A,R2
MOV R4,A
JNC DPDIV2
MOV A,R5 ;R4R5=R4R5+R2R3
ADD A,R3
MOV R5,A
MOV A,R4
ADDC A,R2
MOV R4,A
DPDIV2: CPL C
DJNZ R1,DPDIV1
MOV A,DPL ;*2 (WITH CARRY)
ADDC A,DPL
MOV DPL,A
MOV A,DPH
ADDC A,DPH
MOV DPH,A
MOV A,R4
ORL A,R5
JZ DPDIV3
SETB C
RET
DPDIV3: CLR C ;NO REMAINDET -> CARRY
CLEAR
RET
;sub add program
;DPTR = DPTR + R2,R3
;IN = DPTR,R2,R3
;OUT = DPTR
;REG = A,DPTR
DPADD: MOV A,DPL
ADD A,R3
MOV DPL,A
MOV A,DPH
ADDC A,R2
MOV DPH,A
RET
;sub subtract program
;DPTR = DPTR - R2,R3
;IN = DPTR,R2,R3
;OUT = DPTR
;REG = A,DPTR
DPSUB: CLR C
MOV A,DPL
SUBB A,R3
MOV DPL,A
MOV A,DPH
SUBB A,R2
MOV DPH,A
RET
;sub mul program
;IN = DPTR MULTIPLER
; = R2,R3 MULTIPLICAND
;OUT = DPTR RESULT
; = CARRY FLAG SET WHEN RESULT OVERFLOW
;REG = A,R1,R2,R3,R4,R5,DPTR
DPMUL: MOV R4,#0 ;CLEAR RESULT
MOV R5,#0
CLR PSW.2
MOV R1,#16
DPMUL1: MOV A,R5 ;*2
ADD A,R5
MOV R5,A
MOV A,R4
ADDC A,R4

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV R4,A
JNC DPMUL2 ;NO CARRY
SETB PSW.2 ;OVERFLOW
DPMUL2: MOV A,R3
RLC A
MOV R3,A
MOV A,R2
RLC A
MOV R2,A
JNC DPMUL3
MOV A,R5 ;R4R5=R4R5-DPTR
ADD A,DPL
MOV R5,A
MOV A,R4
ADDC A,DPH
MOV R4,A
JNC DPMUL3 ;NO CARRY
SETB PSW.2
DPMUL3: DJNZ R1,DPMUL1
MOV DPH,R4
MOV DPL,R5
MOV C,PSW.2
RET
;sub compare program
;COMPARE WORD (16 BIT) DPTR<-> R2,R3
;IN = DPTR,R2,R3
;OUT = CY,A
;REG = A
DPCOM: PUSH DPL
CLR C
MOV A,DPL
SUBB A,R3
MOV DPL,A
MOV A,DPH
SUBB A,R2
ORL A,DPL
POP DPL
RET
;sub hex to decimal program
;IN = DPTR
;OUT = R1,R2,R3
;REG = A,R0,R1,R2,R3,R4,R5,DPTR
HTOD: CLR A ;CLEAR OUTPUT
MOV R1,A
MOV R2,A
MOV R3,A
MOV R4,#16 ;SHIFT 16 BIT
HTOD1: MOV A,DPL
RLC A
MOV DPL,A
MOV A,DPH
RLC A
MOV DPH,A
MOV R5,#3 ;ADD DECIMAL
MOV R0,#3 ;INDEX TO R3
HTOD2: MOV A,@R0
ADDC A,ACC
DA A
MOV @R0,A
DEC R0
DJNZ R5,HTOD2
DJNZ R4,HTOD1
RET
;sub sin.cos program
COS: MOV DPTR,#1500H
CLR C
MOV A,#5AH
SUBB A,R1
MOVC A,@A+DPTR
RET
SIN: MOV DPTR,#1500H
MOV A,R1
MOVC A,@A+DPTR
RET
;table sinx
;file sin.asm
;date 2/6/98
ORG 1500H
SINX: DB 00H ;SIN 0° = 0
DB 04H ;SIN 1° = 0.01745
DB 09H ;0.0348
DB 0DH ;0.0523
DB 12H ;0.0697
DB 16H ;0.08715
DB 1BH ;0.1045
DB 1FH ;0.1218

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DB 23H ;0.13917	DB 0C6H ;0.7771
DB 28H ;0.15643	DB 0C9H ;0.788
DB 2CH ;0.1736	DB 0CCH ;0.7986
DB 31H ;0.1908	DB 0CEH ;0.8090
DB 35H ;0.2079	DB 0D1H ;0.8191
DB 39H ;0.2249	DB 0D3H ;0.829
DB 3EH ;0.2419	DB 0D6H ;0.838
DB 42H ;0.2588	DB 0D8H ;0.848
DB 46H ;0.2756	DB 0DAH ;0.8571
DB 4AH ;0.2923	DB 0DDH ;0.866
DB 4FH ;0.3090	DB 0DFH ;0.8746
DB 53H ;0.3255	DB 0E1H ;0.8829
DB 57H ;0.3420	DB 0E3H ;0.891
DB 5BH ;0.3583	DB 0E6H ;0.898
DB 5FH ;0.3746	DB 0E7H ;0.9063
DB 64H ;0.3907	DB 0E9H ;0.9135
DB 68H ;0.4067	DB 0EBH ;0.920
DB 6CH ;0.4226	DB 0ECH ;0.927
DB 70H ;0.4383	DB 0EEH ;0.9335
DB 74H ;0.4539	DB 0EFH ;0.9396
DB 78H ;0.4694	DB 0F1H ;0.9455
DB 7CH ;0.4848	DB 0F2H ;0.951
DB 7FH ;0.5	DB 0F4H ;0.9563
DB 83H ;0.515	DB 0F5H ;0.9612
DB 87H ;0.5299	DB 0F6H ;0.9659
DB 8BH ;0.5446	DB 0F7H ;0.9703
DB 8EH ;0.5591	DB 0F8H ;0.9743
DB 92H ;0.5735	DB 0F9H ;0.9781
DB 96H ;0.5877	DB 0FAH ;0.9816
DB 99H ;0.6018	DB 0FBH ;0.9848
DB 9DH ;0.6156	DB 0FCH ;0.9876
DB 0A0H ;0.6293	DB 0FCH ;0.9902
DB 0A4H ;0.6427	DB 0FDH ;0.9925
DB 0A7H ;0.656	DB 0FDH ;0.9945
DB 0ABH ;0.6691	DB 0FEH ;0.9962
DB 0AEH ;0.6819	DB 0FEH ;0.9975
DB 0B1H ;0.6946	DB 0FEH ;0.9986
DB 0B4H ;0.707	DB 0FEH ;0.9993
DB 0B7H ;0.7193	DB 0FFH ;0.9998
DB 0BAH ;0.7313	DB 0FFH ;1.0
DB 0BDH ;0.7431	END
DB 0C0H ;0.7541	
DB 0C3H ;0.7660	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

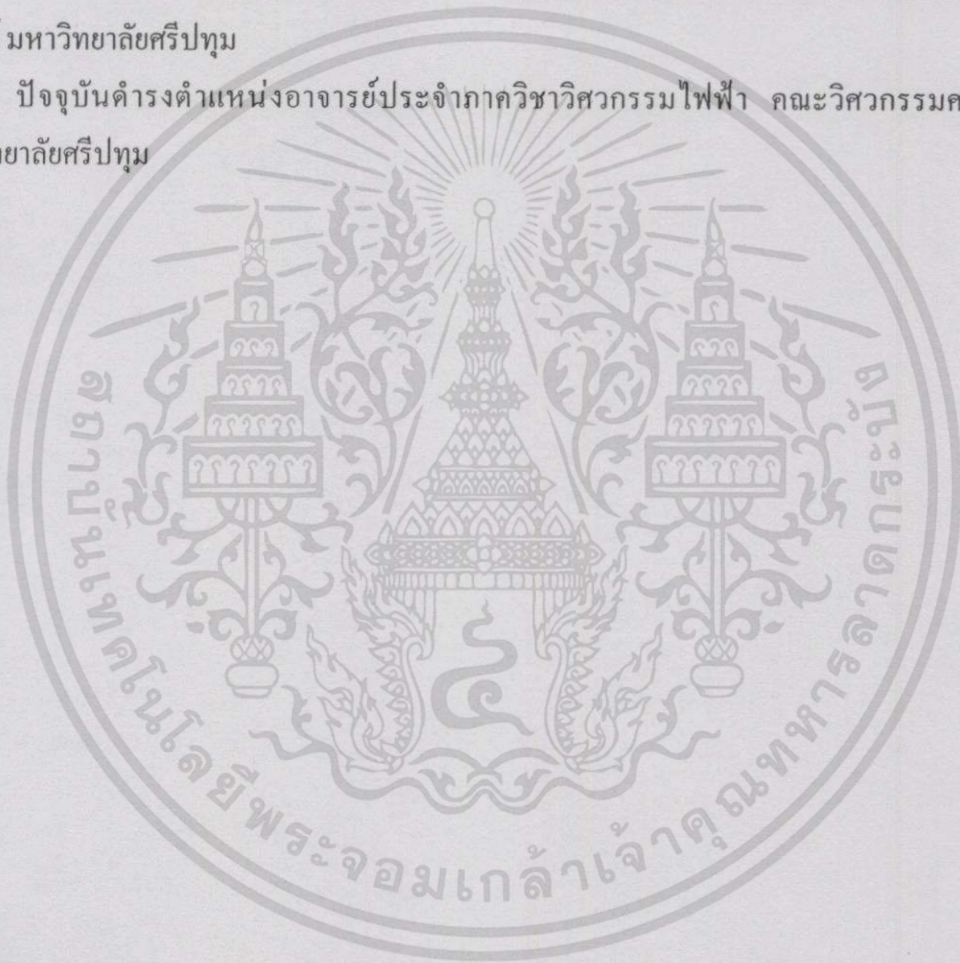
ประวัติผู้เขียน

นายสาขันธ์ ศรีโหมด เกิดเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม 2514 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ไฟฟ้ากำลัง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2537

ปี พ.ศ. 2538 เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า บริษัท ที เจ พี เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด

ปี พ.ศ. 2540 เข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม
ศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีปทุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้