

การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ปรับปรุงกำลังรีแอกทีฟในระบบ
ไฟฟ้าโดยมีผลตอบสนองแบบเวลาจริง

A MICROCONTROLLER-BASED ADAPTIVE REACTIVE POWER
IN ELECTRIC SYSTEMS WITH A REAL-TIME RESPONSE

วิทยานิพนธ์
ห้ามนำออกนอกห้องสมุด

นายศิริโชค ปริตโตทกพร
Mr. SIRICHOK PARITTOTAGAPRON



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2538

ISBN 974-621-405-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 23851
วัน, เดือน, ปี 19 ก.ย. 2538

**A MICROCONTROLLER-BASED ADAPTIVE REACTIVE POWER
IN ELECTRIC SYSTEMS WITH A REAL-TIME RESPONSE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
1995
ISBN 974-621-405-5**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ปรับปรุงกำลังรีแอคทีฟในระบบไฟฟ้าโดยมีผลตอบสนองแบบเวลาจริง
ชื่อนักศึกษา	นายศิริโชค ปริตโตทกพร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ศศ. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง 2538

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุง ค่ารีแอคทีฟเพาเวอร์ (Reactive power) หรือดิสเพลสเมนต์แฟคเตอร์ (Displacement factor) ของระบบไฟฟ้าโดยใช้หลักการของ รีแอคเตอร์แบบควบคุมโดยไทรสเตอร์ (Thyristor controlled reactor) กับตัวเก็บประจุคงที่ (Fixed - capacitor) และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นตัวควบคุม ทำให้การคำนวณง่ายและไม่ยุ่งยากเหมือนกับระบบอนาล็อก (Analog) และใช้การตรวจจับค่ากระแสสูงสุดเพียง 1 จุดต่อ 1 ลูกคลื่น (Cycles) เป็นค่าในการเปิดตารางค่ามอดุลิกให้กับ รีแอคเตอร์แบบควบคุมโดยไทรสเตอร์ จากการตรวจจับลักษณะนี้ทำให้ระบบควบคุมมีความเร็วในการปรับค่า ดิสเพลสเมนต์แฟคเตอร์ ให้ถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณครึ่งลูกคลื่น เร็วกว่าระบบอนาล็อกซึ่งใช้เวลาประมาณ 50 ลูกคลื่น อยู่ในเอกสารอ้างอิง[1]

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ ที่ได้ให้การประสิทธิ์ประสาทวิชา ให้คำแนะนำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ แก่ผู้เขียน ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ฟูศักดิ์ ชิวสุวิทย์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำต่าง ๆ ขอขอบพระคุณท่านกรรมการสอบทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่า ขอขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่มอบทุนการศึกษา ให้สามารถทำการศึกษาวิจัยได้เต็มเวลา ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ , รุ่นพี่และเพื่อน ๆ ที่ได้ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ศิริโชค ปรีตโตทกพร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึ๓ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น.....	3
2.1 ชนิดของพลังงานไฟฟ้า.....	3
2.2 กล่าวนำ ความจำเป็นที่ต้องการ การชดเชยกำลังรีแอกทีฟ.....	3
2.3 ผลที่ได้จากการชดเชย.....	4
2.4 การชดเชยทางอุดมคติ.....	4
2.5 การชดเชยทางปฏิบัติ.....	4
บทที่ 3 หลักการของ Static compensations.....	7
3.1 คุณสมบัติของ Static compensations.....	7
3.2 ชนิดของ Static compensations.....	7
3.3 รีแอกเตอร์แบบควบคุมโดยไทรสเตอร์	
Thyristor-controlled reactor (TCR).....	9
3.4 คาปาซิเตอร์ สวิตซ์โดย ไทรสเตอร์	
Thyristor-switched capacitor (TSC).....	16
บทที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	17
4.1 ความสัมพันธ์พื้นฐานของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	17
4.2 แนวคิดขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	19
4.3 การท	21

บทที่ 5 ส่วนฮาร์ดแวร์ของตัวควบคุมการชดเชยกำลังรีแอ็กทีฟ.....	23
5.1 การทำงานของส่วนฮาร์ดแวร์โดยรวม.....	23
5.2 การทำงานของส่วนต่างๆ.....	25
บทที่ 6 การทดสอบและผลการทดลอง.....	30
บทที่ 7 สรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อไป.....	35
เอกสารอ้างอิง.....	36
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	37
ภาคผนวก ก. การคำนวณค่าตาราง.....	39
ภาคผนวก ข. โปรแกรมควบคุม.....	51
ประวัติผู้เขียน.....	55



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทย เป็นประเทศที่กำลังพัฒนาด้านอุตสาหกรรมอย่างสูง ซึ่งต้องการระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ มารองรับ พลังงานไฟฟ้าก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีปัญหาเพราะกำลังในการผลิตมีจำกัด และแนวโน้มในการขยายระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้ายังต้องใช้เวลานาน เพราะฉะนั้นการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าคือการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างประหยัด และทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด แต่อุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนใหญ่เวลาใช้งานจะมีพลังงานส่วนหนึ่งที่สูญเสียโดยเปล่าประโยชน์ ที่เรียกว่ารีแอกทีฟเพาเวอร์ (Reactive power) (ซึ่งทางการไฟฟ้าที่กำหนดให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต้องมีค่า ตัวประกอบกำลัง ไม่ต่ำกว่า 0.8) ค่าตัวประกอบกำลัง ของระบบไฟฟ้ายังมีค่าสูง ยิ่งดี ค่าตัวประกอบกำลังสูงสุดมีค่าเป็น 1

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ต้องการนำเสนอ แนวทางการสร้างระบบควบคุมค่า คิสเพลสเมนต์ แฟลคเตอร์ของระบบไฟฟ้าซึ่งปกติจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทำให้ระบบควบคุม และอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมค่าคิสเพลสเมนต์แฟลคเตอร์ต้องมีความไวสูงเพื่อให้ค่าคิสเพลสเมนต์แฟลคเตอร์ของระบบมีค่าเป็น 1 คงที่มากที่สุด เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าสูงสุด แต่ระบบที่มีใช้กันอยู่ส่วนใหญ่ ที่ต้องการความเร็วสูงจะเป็นระบบอะนาล็อกที่มีการสร้าง การคำนวณ การปรับปรุง และการแก้ไข เป็นไปได้ยาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอระบบควบคุมแบบดิจิทัลที่ใช้ตัวควบคุมเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้ความยุ่งยากแบบอะนาล็อกลดลงมาก และความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่า คิสเพลสเมนต์แฟลคเตอร์ ของระบบยังมีความไวสูงกว่าแบบอะนาล็อก ด้วยการตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่มุม 0 องศาของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ทำให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในส่วนที่ทำให้เกิดรีแอกทีฟเพาเวอร์ จากหลักการตรวจจับแบบนี้จึงไม่มีความจำเป็นต้องทราบค่ามุมต่างเฟสของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าทำให้ตัดขั้นตอน การคำนวณที่ยุ่งยากของระบบควบคุมออกไป ซึ่งเป็นผลทำให้ระบบควบคุมสามารถทำงานด้วยความเร็วสูง และลดขนาดของตารางเก็บข้อมูลทำให้ใช้ขนาดของหน่วยความจำน้อยลงมาก

1.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในส่วนของการวิจัยได้เสนอเทคนิคการตรวจจับค่า รีแอคทีฟเพาเวอร์ เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุม ค่าคิสเพลสเมนต์เฟลคเตอร์ ด้วยระบบดิจิทัลให้มีการทำงานทันต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคิสเพลสเมนต์เฟลคเตอร์ ของระบบแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า รายละเอียดการวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้จัดแบ่งออกเป็น 7 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เป็นทฤษฎีเบื้องต้น ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชนิดของพลังงานไฟฟ้า ความจำเป็นที่ต้องมีการควบคุมค่าคิสเพลสเมนต์เฟลคเตอร์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในขั้นตอนที่เกี่ยวข้อง และจำเป็นต้องนำไปใช้เป็นพื้นฐานในบทต่อไป

บทที่ 3 เป็นหลักการของตัวชดเชยแบบสถิต (Static) กล่าวถึงความหมายของตัวชดเชยแบบสถิต และหลักการของตัวชดเชยแบบสถิตบางชนิด โดยเน้นที่ตัวชดเชยแบบ รีแอคเตอร์แบบควบคุมโดยไทรสเตอร์ เพราะใช้ในงานวิจัยนี้

บทที่ 4 เป็นการอธิบายหลักการที่ใช้ในการตรวจจับและการทำงานของโปรแกรม

บทที่ 5 เป็นการอธิบายการทำงานของฮาร์ดแวร์ของระบบทั้งหมด และวิธีการคำนวณความถี่ของตัวนับ วิธีการปรับแต่งส่วนต่าง ๆ ของวงจร

บทที่ 6 เป็นการกล่าวถึงผลการทดลอง และวงจรส่วนที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 7 เป็นบทสรุปงานวิจัยพร้อมทั้งปัญหาของงานวิจัย และขอเสนอแนะแนวทางการพัฒนาต่อไปเพื่อให้สามารถใช้งานได้ดีขึ้น

ส่วนภาคผนวก ได้กล่าวถึงวิธีการหาค่ามุลทริกไทแรนส์ และโปรแกรมที่ใช้ในการทำวิจัยทั้งหมด

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ชนิดของพลังงานไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือพลังงานที่จ่ายจริง (Apparent power (S)) พลังงานที่ใช้งานจริง (True power (P)) พลังงานสูญเสีย (Reactive power (Q)) ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายจริงมีค่าเท่ากับการทอดกำลังสองสมบูรณ์ของผลรวมกำลังสองของพลังงานที่ใช้งานจริงกับพลังงานสูญเสีย

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

- S = เป็นพลังงานที่การไฟฟ้าต้องจ่ายออกมาจริง (I)
- P = เป็นพลังงานที่ไหลนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ (²G)
- Q = เป็นพลังงานสูญเสียที่ไหล (²B)
- V = แรงดันไฟฟ้า
- I = กระแสไฟฟ้า
- G = ค่าความนำ (conductance)
- B = ค่า susceptance (susceptance)

2.2 กล่าวนำความจำเป็นที่ต้องการ การชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์ (Q)

พลังงานสูญเสีย เป็นพลังงานที่สูญเปล่า ถ้าสามารถลดพลังงานสูญเสียให้มีค่าน้อยลงก็เท่ากับเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ เพราะทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายจริง มีค่าลดลง จากการลดลงของพลังงานที่จ่ายจริงก็เท่ากับลดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด และการที่กระแสไฟฟ้ามี่ค่าน้อยลง จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสายส่งมีค่าน้อยลงด้วยซึ่งอาจจะสามารถประหยัดค่าสายไฟฟ้าลง เพราะสามารถใช้สายไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กกลงได้ ดังนั้นการชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์จึงมีความสำคัญมาก

2.3 ผลที่ได้จากการชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์

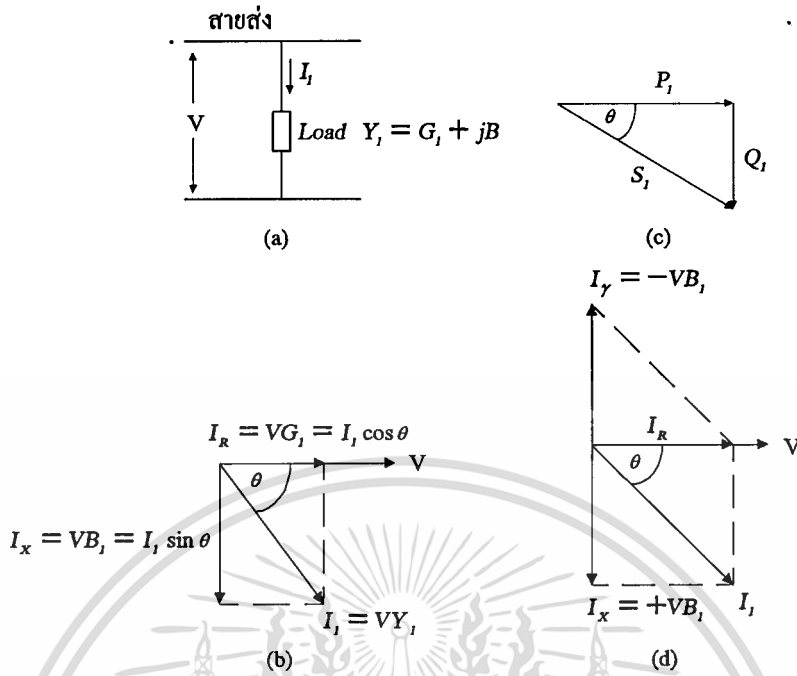
จากการชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์ที่เหมาะสมจะทำให้ พลังงานที่จ่ายจริง มีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้จริง ในทางอุดมคติซึ่งจะมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งมีค่าลดลงทำให้ใช้สายขนาดเล็กลงเป็นการประหยัดค่าสายส่ง และยังทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ไม่สามารถรู้ล่วงหน้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโหลด มีค่าลดลงทำให้ระบบส่วนรวมมีความแน่นอน(stability) เพิ่มขึ้น และที่สำคัญเป็นการช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าเพราะเป็นการลดค่าพลังงาน สูญเสีย

2.4 การชดเชยทางอุดมคติ

การชดเชยทางอุดมคตินั้น ตัวชดเชยสามารถทำการชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์ได้โดยที่ตัวชดเชยเองมีค่าพลังงานเฉลี่ยเท่ากับ "0" ซึ่งหมายถึงตัวชดเชยต้องไม่ทำให้เกิดค่าพลังงานในส่วนที่เรียกว่าพลังใช้งานจริง และต้องทำให้เกิดความสมดุลทางเฟสในกรณีที่ระบบไฟฟ้าเป็นระบบ 3 เฟส และต้องทำให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของระบบที่ทำการชดเชยอยู่นั้นมีค่าเท่ากับ 1 ตลอดเวลา การติดตั้งตัวชดเชยไว้ที่โหลดแต่ละตัวโดยตัวชดเชยที่มีค่าเหมาะสมจะทำให้ระบบโดยรวมทั้งหมดมีความใกล้เคียงกับระบบทางอุดมคติ

2.5 การชดเชยทางปฏิบัติ

โหลดในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังไม่แน่นอน เช่น เตาหลอมโลหะที่เป็นระบบอินดักชันฮีท (Induction Heat) ฯลฯ ดังนั้น ตัวชดเชยของโหลดชนิดนี้ต้องสามารถเปลี่ยนแปลงตามการใช้พลังงานของโหลดได้ ไม่สามารถใช้ตัวชดเชยแบบค่าคงที่เหมือนทางอุดมคติได้ เพราะจะทำให้การชดเชยไม่ถูกต้องซึ่งเป็นผลทำให้เกิดพลังงานสูญเสีย และแรงดันไฟฟ้าของระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ตัวชดเชยในทางปฏิบัติจะต้องมีความสามารถในการชดเชยที่ใกล้เคียงกับทางอุดมคติได้เท่านั้นต้องพิจารณาในหลายๆส่วน เช่น ความเร็วของการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานของโหลด ความละเอียดที่สามารถปรับค่าชดเชยได้ การทำให้เกิดความถี่ฮาร์โมนิกส์ (Harmomic) สามารถรับลักษณะโหลดที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้านำหน้า และถ้าหลังแรงดันไฟฟ้าได้หรือไม่ ฯลฯ



รูปที่ 2.1

จากรูปที่ 2.1 (a) แสดงแบบจำลองของระบบไฟฟ้า 1ϕ เฟส โดยมีโหลดเขียนในรูปความนำ (Y_1) ซึ่งมีส่วนประกอบอยู่สองส่วนที่เป็นจำนวนจริง (G_1) กับส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ (jB_1) ในที่นี้จะตัดไม่คิดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสายส่ง ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย (V) ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด (I_1)

$$I_1 = VY_1 = VG_1 + jVB_1 = I_R + jI_X \quad (2.1)$$

Y_1 = แอดมิตแตนซ์ (Admittance) ของโหลด

G_1 = ค่าความนำ (Conductance) ของโหลด

B_1 = ค่าซัสเซพแตนซ์ (Susceptance) ของโหลด

ค่า V และ I_1 ในสมการ (2.1) ทั้งหมดเป็นปริมาณเวกเตอร์ จากรูปที่ 2.1 (b) ให้เวกเตอร์ V เป็นเวกเตอร์อ้างอิง และสามารถแยกแวกเตอร์ I_1 ออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่พสเดียวกับ V คือ I_R กับส่วนที่ล้าหลัง V เป็นมุม 90° คือ I_X ในที่นี้ I_X ล้าหลังแสดงว่าโหลดมีตัวเหนี่ยวนำประกอบมากกว่าตัวเก็บประจุ แต่ถ้าตัวเก็บประจุมีค่ามากกว่าจะทำให้ I_X มีมุมนำหน้า V เป็นมุม 90° พลังงานที่แหล่งจ่ายส่งออกมาทั้งหมด (Apparent power) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 S &= VI_1 \\
 &= \sqrt{V^2 G_1 + jV^2 B_1} \\
 &= \sqrt{P_1 + jQ_1}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

จากสมการที่ 2.2 จะเห็นว่าถ้าพลังงานที่แหล่งจ่ายส่งออกมาแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นจำนวนจริง P_1 ที่เรียกว่าพลังงานที่ใช้งานจริง กับส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ Q_1 ที่เรียกว่า พลังงานสูญเสีย เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของพลังงานทั้ง 3 ตัวนี้จากรูปที่ 2.1 (c) จากภาพค่า $\cos \theta$ นั้นคือค่า คอสเฟลตเมนต์แฟคเตอร์

$$\frac{I_1}{I_x} = \frac{1}{\cos \theta} \tag{2.3}$$

จากสมการที่ (2.3) ถ้าค่า $\cos \theta$ มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าค่า $P_1 = S_1$ ซึ่งหมายความว่าค่า $Q_1 = 0$ แสดงว่าไม่เกิดการสูญเสียพลังงานเลย ดังนั้นการชดเชยสามารถทำได้โดยการทำให้ค่า คอสเฟลตเมนต์แฟคเตอร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 ให้มากที่สุด และดีที่สุดถ้าทำได้เท่ากับ 1 การทำให้ค่า คอสเฟลตเมนต์แฟคเตอร์ มีค่าเพิ่มขึ้นก็คือการลดค่า Q_1 ลง ค่าพลังงานสูญเสียสามารถเขียนให้มีความสัมพันธ์กัน ดังสมการที่ (2.4)

$$Q_1 = V(I_x + I_y) \tag{2.4}$$

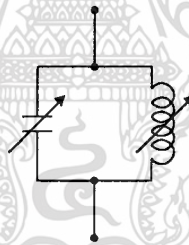
จากสมการที่ (2.4) การชดเชยจะกระทำโดยการลดค่า $I_x + I_y$ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้านี้เกิดจากส่วนที่เป็นส่วนจินตภาพของโหลด B_1 การลดทำได้โดยการปรับค่าความเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุของระบบทั้งหมดให้มีค่าเหมาะสมจะทำให้ I_x ที่ตัวเหนี่ยวนำ หักล้างกับ I_y ที่เกิดจากตัวเก็บประจุ ทำให้ค่า $I_x + I_y = 0$ ดังรูปที่ 2.1 (d) จึงสรุปได้ว่าการชดเชยค่ารีแอคทีฟเพาเวอร์คือการปรับค่าความเหนี่ยวนำ หรือค่าตัวเก็บประจุในระบบให้มีค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากัน หรือให้มีเฉพาะค่าความต้านทานเท่ากันนั่นเอง

บทที่ 3

หลักการของ Static compensations

3.1 คุณสมบัติของตัวชดเชยแบบสแตติก (Static Compensator)

อุปกรณ์สแตติก หมายถึงอุปกรณ์ที่ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวทางกล ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะตัวชดเชยสแตติกแบบต่อขนานเท่านั้น จากรูปที่ 3.1 เป็นรูปความคิดพื้นฐานของตัวชดเชยทางอุดมคติที่สามารถปรับการชดเชยกำลังรีแอคทีฟที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าได้ทั้งนำหน้าหรือล่าหลังแรงดันไฟฟ้า และใช้เวลาในการปรับค่าชดเชยเป็น 0 คือมีการตอบสนองที่ถูกต้องตลอดเวลา แต่ในทางปฏิบัติในตัวชดเชยกำลังรีแอคทีฟ แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน บางชนิดสามารถชดเชยโหลดที่ทำให้เกิดกระแสล่าหลังอย่างเดียว บางอย่างสามารถชดเชยโหลดที่ทำให้เกิดกระแสที่ล่าหลังและนำหน้าด้วย ในแต่ละชนิดนั้นยังมีความสามารถที่สำคัญมากอย่างหนึ่งคือ เวลาที่ตัวชดเชยใช้ในการปรับค่ากำลังรีแอคทีฟของระบบให้ถูกต้อง

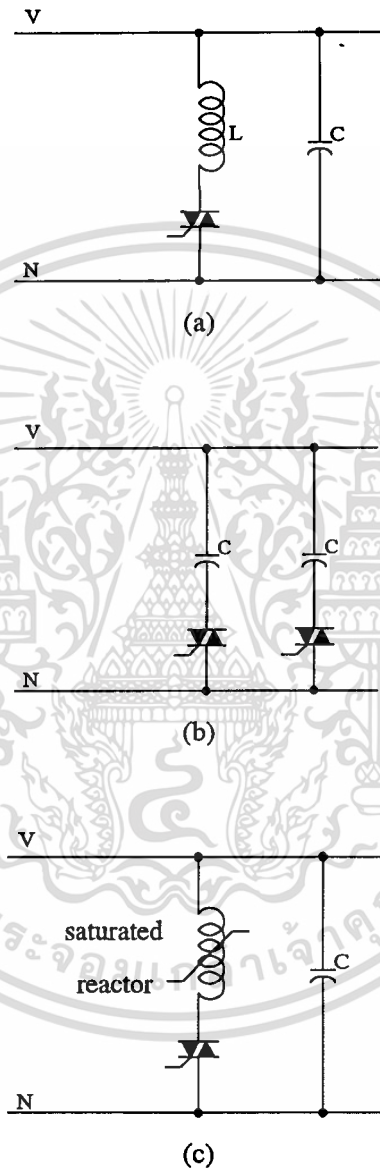


รูปที่ 3.1 ตัวชดเชยสแตติกทางอุดมคติ

3.2 ชนิดของตัวชดเชยแบบสแตติก (Static Compensations)

จากรูปที่ 3.2 แสดงภาพโคจรแอมพลิจูดของอุปกรณ์ชดเชยแบบสแตติกเพียง 1 ϕ เฟส รูปที่ 3.2 (a) แบบแรกเป็นการรวมกันของตัวเก็บประจุ ที่มีค่าคงที่ต่อขนานกับรีแอคเตอร์แบบควบคุมโดยทรินสเตอร์ การปรับค่าชดเชยกระทำโดยการปรับค่ามุมทริกทรินสเตอร์ชนิดนี้สามารถปรับการชดเชยโหลดที่มีกระแสนำหน้าหรือล่าหลังก็ได้ ส่วนรูปที่ 3.2 (b) เป็นการต่อตัวเก็บประจุเข้าไปที่ละชุดหรือที่เรียกว่า คาปาซิเตอร์แบงก์ (Capacitor bank) ตัวชดเชยแบบนี้สามารถปรับกับโหลดที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำเท่านั้นไม่สามารถชดเชยโหลดที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้านำหน้าได้ และชนิดสุดท้ายรูปที่ 3.2 (c) ตัวเก็บประจุคงที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์ที่เรียกว่า

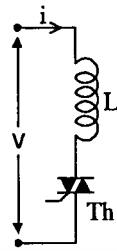
ขดลวดอิ่มตัว(Saturated reactor) แต่ในงานวิจัยที่เสนอนี้ใช้หลักการแรกดังแสดงในรูปที่ 3.2(a) ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงกล่าวเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ชนิดของตัวชดเชยแบบสแตติกยังมีอีกหลายชนิดแต่จะไม่กล่าวถึงเพราะใช้หลักการที่แตกต่างกันมาก



รูปที่ 3.2 ภาพอุปกรณ์ชดเชยแบบสแตติกเพียง 1 ϕ เฟส

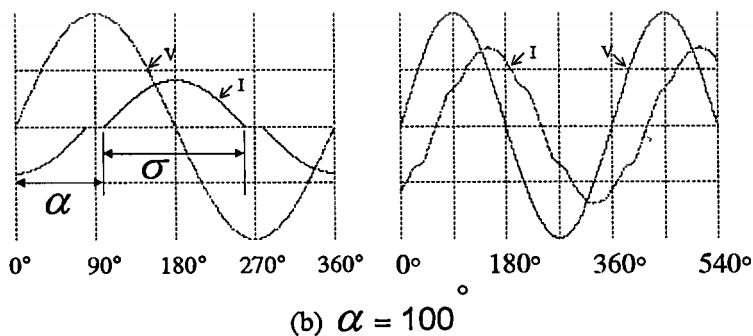
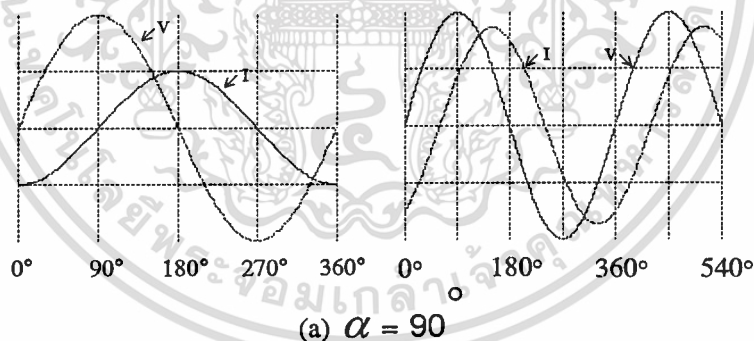
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 รีแอกเตอร์แบบควบคุมโดยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Reactor)



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของรีแอกเตอร์แบบควบคุมโดยไทรสเตอร์

จากรูปที่ 3.3 ด้านบนเป็นรูปพื้นฐานของรีแอกเตอร์แบบควบคุมโดยไทรสเตอร์ ซึ่งใช้ในการอธิบายการทำงาน โดยมีเงื่อนไขว่า อุปกรณ์ทุกตัวมีคุณสมบัติเป็นอุดมคติ จากรูปที่ 3.3 ถ้า Th นำกระแสไฟฟ้าที่ทุกยอดสูงสุดทั้งด้านบวกและลบ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดมีลักษณะเหมือนกันกับการช็อตตัว Th คือ กระแสไฟฟ้าจะล้าหลังแรงดันไฟฟ้าเป็นมุม 90 องศา ดังรูปที่ 3.4 (a) ด้านซ้าย

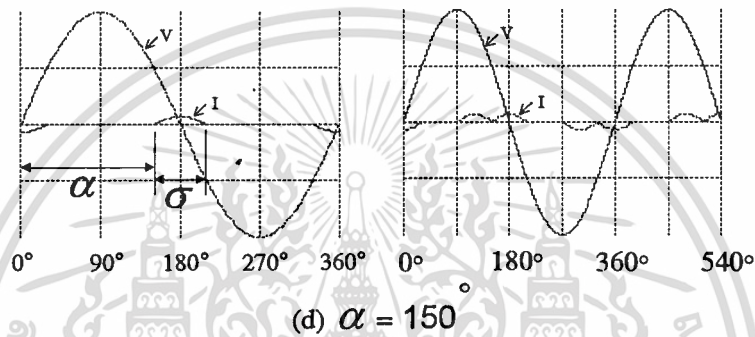
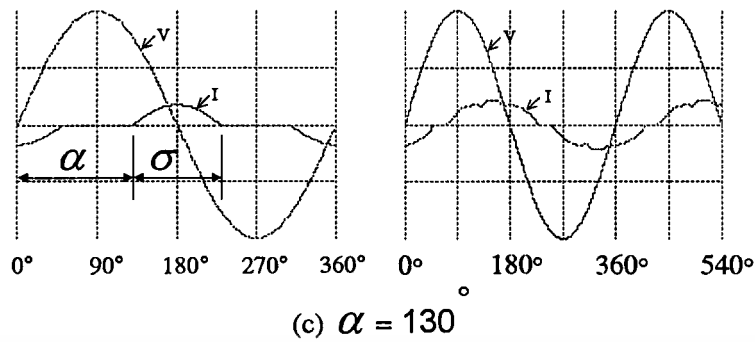


รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ รีแอกเตอร์แบบควบคุมโดยไทร

เตอร์รูปด้านซ้ายเป็นความสัมพันธ์ของ 1ϕ เฟส ส่วนด้านขวาเป็นของ 3ϕ เฟสแบบเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของรีแอคเตอร์แบบควบคุมโดยทริสเตอร์รูปด้านซ้ายเป็นความสัมพันธ์ของ 1ϕ เฟส ส่วนด้านขวาเป็นของ 3ϕ เฟสแบบเดลต้า

แต่ถ้าการนำกระแสไฟฟ้าของ Th มีการหน่วงเวลาออกไปอีก โดยการหน่วงเวลาการนำกระแสไฟฟ้าของ Th กระทำที่แรงดันไฟฟ้าด้านบวกและด้านลบมีความสมมาตรกัน เป็นผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าได้เหมือนรูปที่ 3.4 (b-d) โดยมุมในการนำกระแสไฟฟ้าของ Th คือ มุม 90 , 100 , 130 , 150 องศา ตามลำดับซึ่งวัดเทียบกับมุม 0 องศา ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจาก รูปที่ 3.4 (a) ด้านบนจะเห็นว่า การนำกระแสไฟฟ้าเต็มรูปคลื่นค่ามุมในการนำของ Th จะมีค่าเท่ากับ 90 องศา และเงื่อนไขในการนำกระแสไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง $90 - 180$ องศา ผลทางด้านความถี่คือขนาดของความถี่หลักจะลดลงเมื่อมุมการนำกระแสไฟฟ้า (α) ของ Th มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้เท่ากับว่าค่าความต้านทานของขดลวด มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่า รีแอคทีฟเพาเวอร์ ที่เกิดจาก ขดลวดมีค่าลดลงและกระแสไฟฟ้าโดยเฉลี่ยมีค่าลดลง ซึ่งการควบคุมสามารถทำได้โดยการควบคุมมุมนำกระแสไฟฟ้าของ Th จากหลักการดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ ชดเชยกำลัง รีแอคทีฟ แบบสแตติก (Static) ได้จากรูปที่ 3.4 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} V}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t), & \alpha < \omega t < \alpha + \delta \\ 0 & , \alpha + \delta < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (3.1)$$

= ค่า r.m.s ของแรงดันไฟฟ้า

$$X_L = \omega L$$

$$\omega = 2\pi f$$

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

α = มุมทริกที่ทำให้ Th เริ่มนำกระแสไฟฟ้า

จากสมการที่ 3.1 สามารถหาของกระแสไฟฟ้าสูงสุด (Peak Current) ของความถี่หลัก (Fundamental frequency) โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ฟูเรียร์ซึ่งได้ผลออกมาเป็นสมการ 3.2

$$I_1 = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} V \quad (3.2)$$

σ จากรูปที่ 3.4 เป็นค่ามุมในช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโดยที่

$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi \quad (3.3)$$

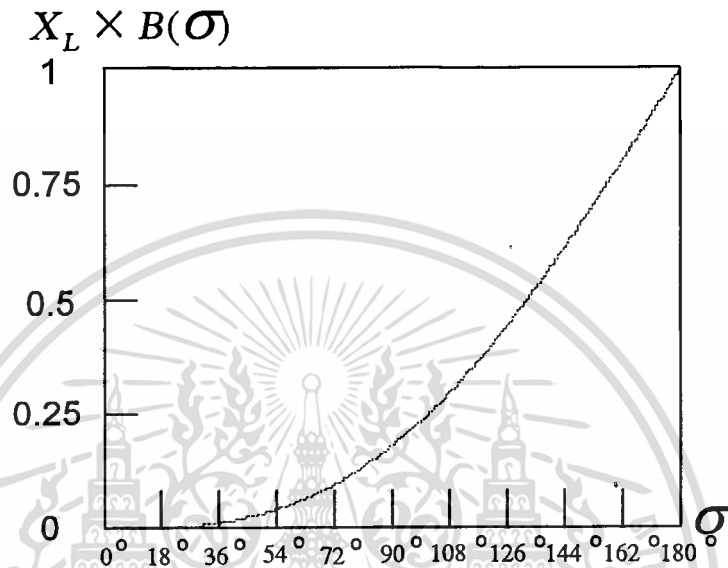
ถ้าเรากำหนดให้ $I_1 = B_L(\sigma)V$ (3.4)

เราสามารถเขียนค่า $B_L(\sigma)$ จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.1 กับ 3.4 เป็น

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} \quad (3.5)$$

ค่า $B_L(\sigma)$ เป็นค่าความนำของขดลวด ที่ความถี่หลัก ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ σ จากสมการที่ 3.5 สามารถเขียนเป็นกราฟดังรูปที่ 3.5 จากรูปจะเห็นว่าค่าความนำ $B_L(\sigma)$ มีค่าสูงสุดที่ค่า

มุมนำกระแสไฟฟ้า (α) ของ Th มีค่าเท่ากับ 90 องศา โดยมีค่าเท่ากับ X_L^{-1} และมีค่าเท่ากับ 0 ที่มุม 180 องศา หลักการนี้อาจเรียกว่า การควบคุมเฟส (Phase Control)

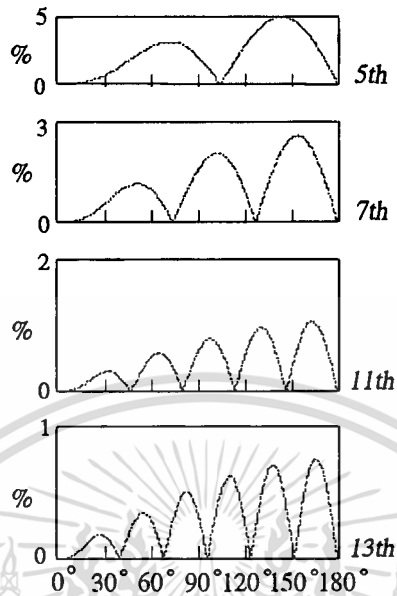


รูปที่ 8.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำกับมุมนำกระแสไฟฟ้า (σ) ของรีแอกเตอร์แบบควบคุมโดยไทรสเตอร์

ในการปรับเปลี่ยนค่า α จะมีผลทำให้สัญญาณกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนไปจากสัญญาณรูปไซน์ (Sine) ทำให้เกิดความถี่ฮาร์โมนิกส์คี่ (Odd Harmonics) โดยใช้หลักการของวิเคราะห์ฟูเรียร์จะได้ค่าของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์คี่ต่างๆ เท่ากับ

$$I_n = \frac{4V}{\pi X_L} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos \alpha \frac{\sin n\alpha}{n} \right] \quad (3.6)$$

$n = 3, 5, 7, \dots$



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 5,7,11,13 กับมุมนำกระแสไฟฟ้าของรีแอกเตอร์แบบควบคุมโดยไทรสเตอร์ (T)

จากรูปที่ 3.6 ข้างบนนี้เป็นรูปแสดงขนาด (Amplitude) ของความถี่ฮาร์โมนิกส์บางความถี่ เป็นเปอร์เซ็นต์ (%) เทียบกับความถี่หลักขณะที่ค่ามุมการนำกระแสไฟฟ้าของ Th เท่ากับ 90 องศา และตาราง 3.1 ด้านล่างเป็นตารางแสดงความถี่ฮาร์โมนิกส์ จากความถี่หลักจนถึง ความถี่ที่ 37

ตาราง 3.1

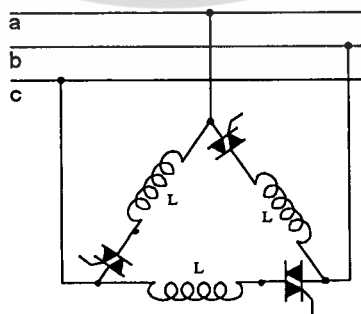
เทียบอัตราส่วนเป็น % ของค่าขนาดสูงสุดของความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 - 37 กับ ความถี่หลักขณะที่ค่ามุมการนำกระแสไฟฟ้าของ Th เท่ากับ 90 องศา

Harmonic Order	Percentage
1	100
3	(13.78)
5	5.05
7	2.59
9	(1.57)
11	1.05
13	0.75

15	(0.57)
17	0.44
19	0.35
21	(0.29)
23	0.24
25	0.20
27	(0.17)
29	0.15
31	0.13
33	(0.12)
35	0.12
37	0.09

หมายเหตุ (%) ในระบบแบบ 3 ϕ เฟส ที่สมดุล line current ของระบบโดยรวมมีค่าเป็นศูนย์

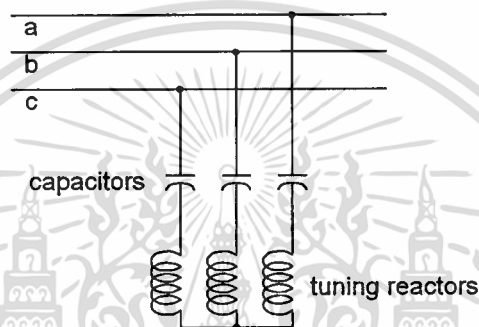
จากหลักการที่ว่ามันเป็นเพียง 1 ϕ เฟสสัญญาณ แต่ถ้าแบบ 3 ϕ เฟส ซึ่งต่อกันแบบ เดลต้า (Delta) แสดงดังรูปที่ 3.7 เมื่อระบบมีความสมดุลทั้ง 3 ϕ เฟส จะมีผลทำให้กระแสไฟฟ้า ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ของสายส่งกำลัง (Line current) ของระบบโดยรวมมีค่าเป็นศูนย์ส่วน ความถี่ฮาร์โมนิกส์อื่น ๆ ยังคงมีปรากฏอยู่ในระบบ และอัตราส่วนของสัญญาณยังคงเหมือนกับ ในรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.1 แต่มีส่วนที่ต่างกันไปคือเฟสของสัญญาณ ส่วนรูปของกระแสไฟฟ้า ที่สายส่งกำลังแสดงไว้ดังรูปที่ 3.4 ด้านขวา



รูปที่ 3.7 การต่อรีแอคเตอร์แบบควบคุมโดยไทรสเตอร์ 3 ϕ เฟสแบบเดลต้า

ในทางปฏิบัติมุมการนำกระแสไฟฟ้าของ Th ในช่วงแรงดันไฟฟ้าเป็นบวกและลบของรีแอกเตอร์แบบควบคุมโดยไทรสเตอร์ มีความสำคัญมากเพราะถ้าการนำกระแสไฟฟ้าของ Th ในช่วงแรงดันไฟฟ้าบวก และลบไม่สมดุลกันเป็นผลทำให้เกิดความถี่ฮาร์โมนิกส์คู่ของกระแสไฟฟ้าขึ้นและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ 0 คือทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงเกิดขึ้น

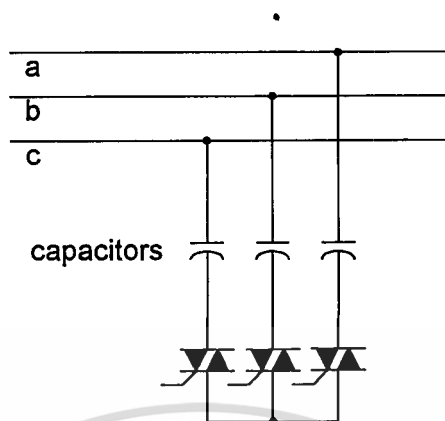
จากที่กล่าวถึงความถี่ฮาร์โมนิกส์ของกระแสไฟฟ้า ความถี่ฮาร์โมนิกส์บางความถี่สามารถทำให้ลดลงได้โดยการใช้ตัวกรองความถี่ (filter) ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งโดยมากจะหมายถึงความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 และ 7



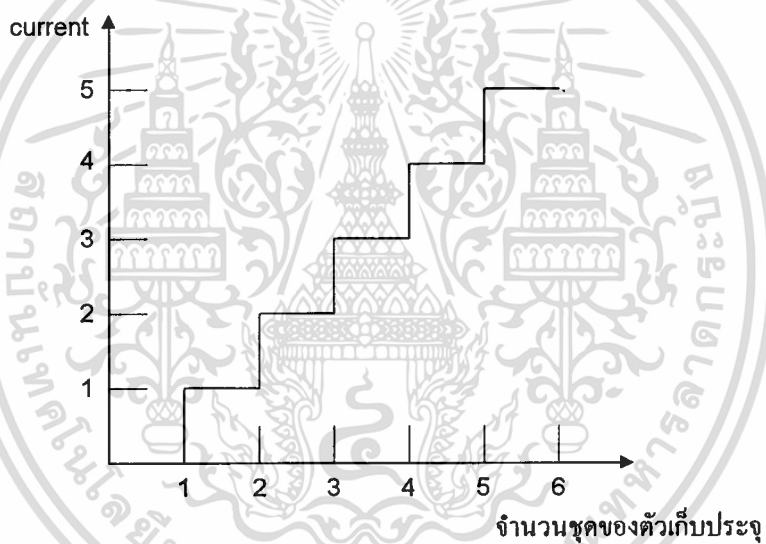
รูปที่ 3.8 ตัวกรองความถี่ (Filter)

3.4 สวิตช์ คาปาซิเตอร์ (The thyristor - switched capacitor)

หลักการพื้นฐานของไทรสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 เป็นลักษณะการปรับเปลี่ยนค่าซัสเซปแทนซ์ (Susceptance) ของสวิตช์คาปาซิเตอร์ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยเปิดหรือปิดไทรสเตอร์ เพื่อเป็นการเพิ่มหรือลดจำนวนชุดของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานกัน ส่วนความละเอียดในการปรับขึ้นอยู่กับค่าของตัวคาปาซิเตอร์ที่ใช้ ถ้ามีค่าน้อยก็จะมีค่าความละเอียดในการปรับสูง , ค่าซัสเซปแทนซ์สูงสุดเท่ากับการต่อขนานตัวคาปาซิเตอร์ทั้งหมด



รูปที่ 3.9 สวิตช์คาปาซิเตอร์ (1ชุด)



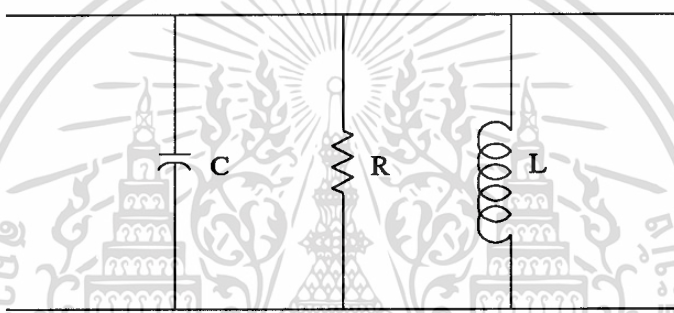
รูปที่ 3.10 ลักษณะการปรับเปลี่ยนค่า ำตเซ็บแท็นซ์

บทที่ 4

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

4.1 ทฤษฎีพื้นฐาน

ปกติโดยทั่วไปโหลดทางไฟฟ้าสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าความต้านทาน (R) ค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าตัวเก็บประจุ (C) ผสมกันอยู่ดังรูปที่ 4.1 ทำให้เกิดมุมระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V) กับกระแสไฟฟ้า (I) มีเฟส(Phas) ต่างกันเป็นมุมซัด้า (θ) ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 คุณสมบัติของโหลดทางไฟฟ้า

ถ้าในระบบไฟฟ้ามีโหลดที่เป็นคุณสมบัติของค่าตัวเหนี่ยวนำมากกว่าค่าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะทำให้กระแสไฟฟ้ามีเฟสล่าหลังแรงดันไฟฟ้าเป็นมุมซัด้า (θ) แต่ถ้าค่าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ามากกว่าค่าตัวเหนี่ยวนำจะทำให้กระแสไฟฟ้ามีเฟสของสัญญาณนำหน้าแรงดันไฟฟ้า

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_T}{R}$$

R = ค่าความต้านทานของโหลดในระบบไฟฟ้า

$$X_T = X_L + X_C$$

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_C = 2\pi fC^{-1}$$

L = ค่าความเหนี่ยวนำของโหลดในระบบไฟฟ้า

C = ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของโหลดในระบบไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าที่มีมุมต่างเฟสกับแรงดันไฟฟ้า สามารถแตกเทอมกระแสไฟฟ้า ออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่มีเฟสเหมือนกับแรงดันไฟฟ้า และส่วนที่มีเฟสต่างจากแรงดันไฟฟ้าไป 90 องศา ดังสมการ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

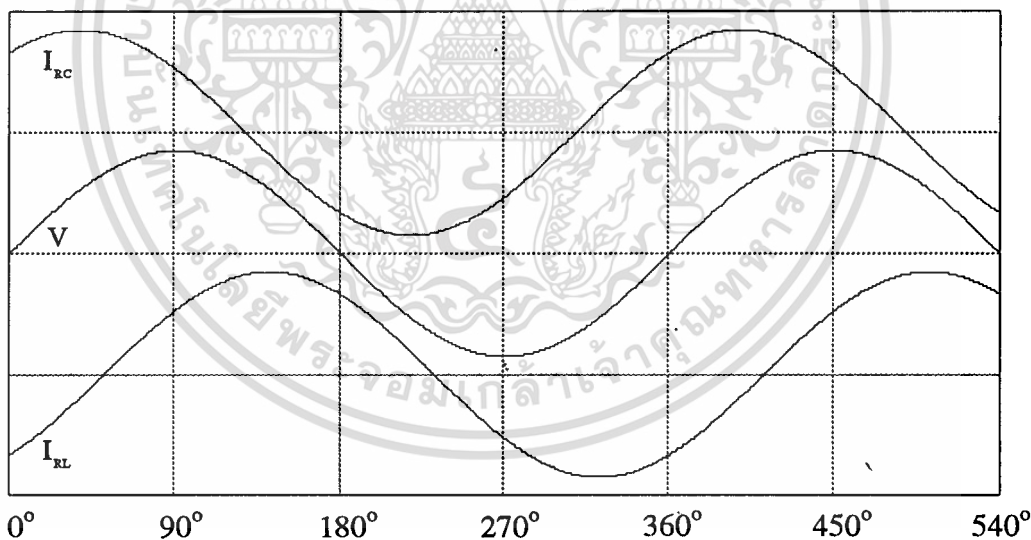
1.กระแสไฟฟ้าที่มีมุมตรงกับแรงดันไฟฟ้า คือ

$$I_{in-phas} = I \cos \theta \quad (4.1)$$

2.กระแสไฟฟ้าที่มีมุมต่างกับแรงดันไฟฟ้าเป็นมุม 90 องศา (กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิด รีแอกทีฟเพาเวอร์) คือ

$$I_{out-phas} = I \sin \theta \quad (4.2)$$

$$(I = I_m \sin \omega t)$$



V = แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย

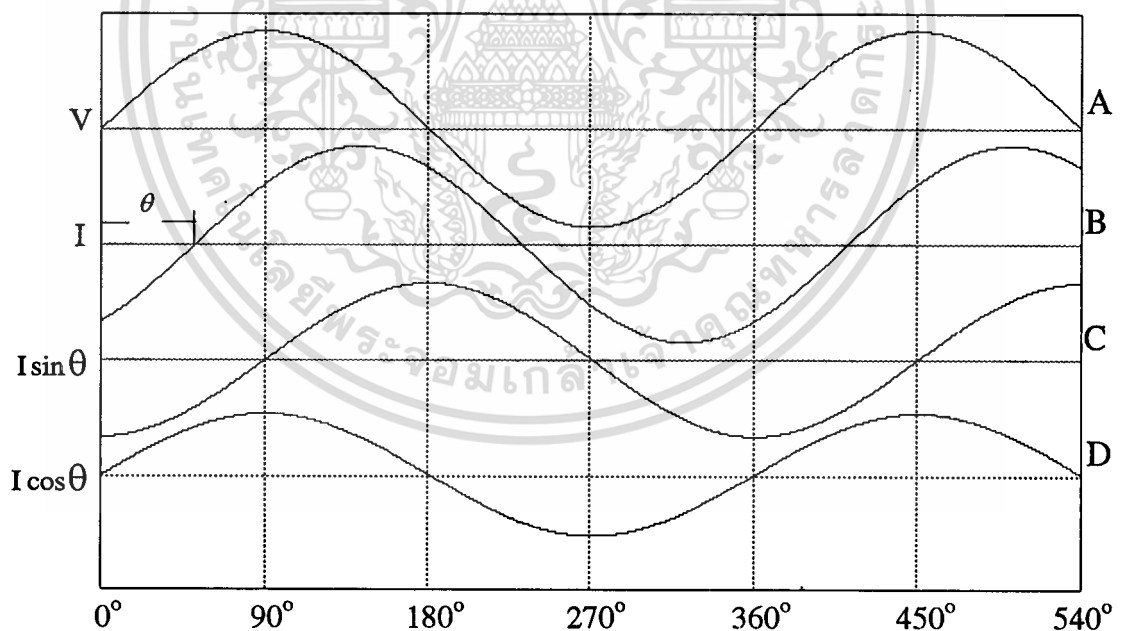
I_{RL} = กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากโหลดของระบบมีค่าเป็น ความต้านทานกับค่าความเหนี่ยวนำ

I_{RC} = กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากโหลดของระบบมีค่าเป็น ความต้านทานกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กับกระแสไฟฟ้า

จากทฤษฎีพื้นฐานในการแตกทอมของกระแสไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วน คือกระแสไฟฟ้าที่มีเฟสสัญญาณเดียวกับแรงดันไฟฟ้า ($I_{in-phas}$) กับกระแสไฟฟ้าที่มีเฟสสัญญาณต่างกับแรงดันไฟฟ้า 90 องศา ($I_{out-phas}$) จากรูปที่ 4.3 หลักการพื้นฐานถ้าเราต้องการประมวลผลด้วยระบบดิจิทัลเพื่อทำให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดรีแอ็คทีฟเพาเวอร์ ($I \sin \omega t$) จะต้องทราบค่ากระแสไฟฟ้า และมุมต่างเฟสของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า โดยนำข้อมูลทั้งสองมาคูณกัน ถ้าใช้วิธีนี้จะทำให้เกิดความผิดพลาดสูงเพราะการประมวลผลทางดิจิทัลต้องมีการแปลงสัญญาณอะนาล็อก (Analog) มาเป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital) ซึ่งจากหลักการนี้มีการแปลงสัญญาณ 2 สัญญาณทำให้ผลรวมของความผิดพลาดมีมากขึ้น และการประมวลผลต้องใช้เวลามาก เพราะมีการคูณกันของข้อมูลทางดิจิทัล หรือถ้าใช้หลักการ การคำนวณค่าให้สำเร็จแล้วนำค่าไปเก็บในตารางที่เรียกว่า ลูคอัพเทเบิล (Look up table) ก็ต้องใช้ขนาดของหน่วยความจำในการทำเป็นตารางจำนวนมากในการเก็บข้อมูล

4.2 แนวคิดในการตรวจจับ (Sensor) กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดรีแอ็คทีฟเพาเวอร์



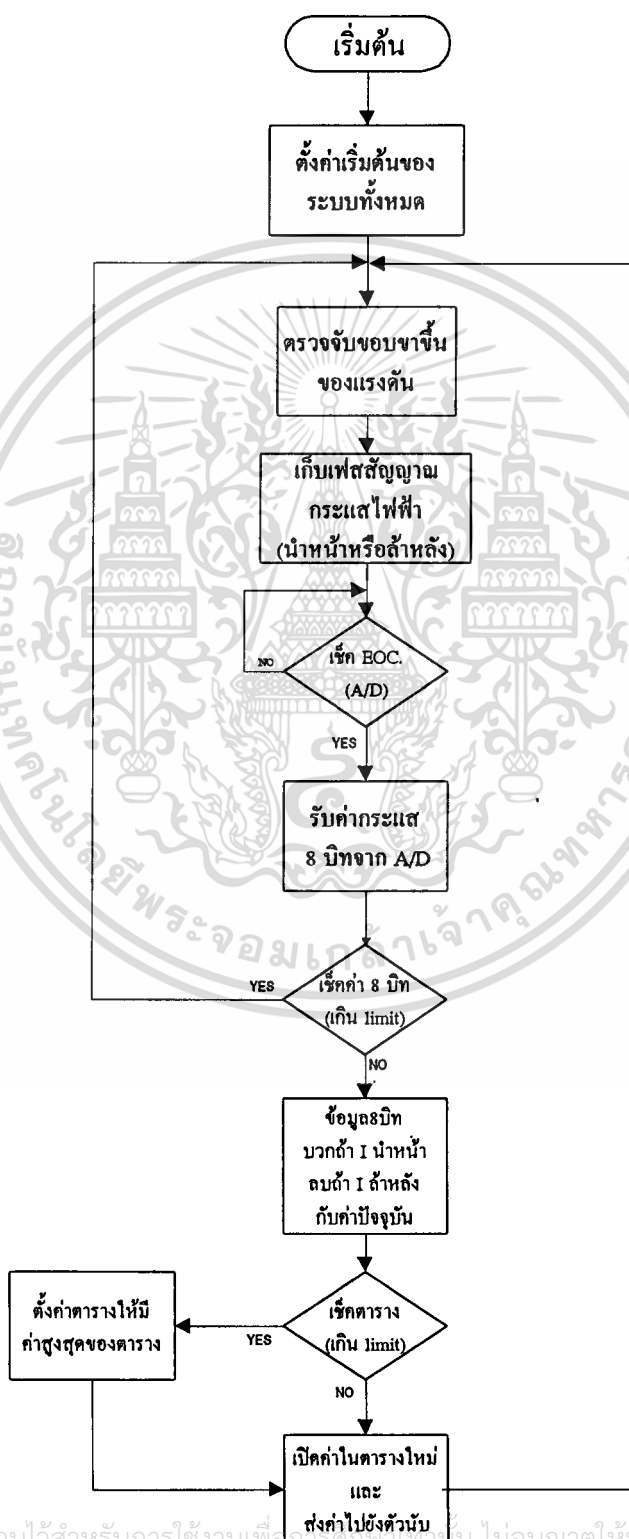
รูปที่ 4.3 แสดงเฟสสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่มีการแยกทอมแล้ว

จากรูปที่ 4.3 เส้น C สังกัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า $I \sin \theta$ จะมีค่าสูงสุด (I_{peak}) ที่ตำแหน่ง 0 องศาของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และค่าของ $I \cos \theta$ จะมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าที่ตำแหน่ง 0 องศา สัญญาณกระแสไฟฟ้า (เส้น B) จะมีค่าเท่ากับค่าสูงสุด (I_{peak}) ของกระแสไฟฟ้า $I \sin \theta$ (เส้น C) ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้การตรวจจับกระแสไฟฟ้าในส่วนที่ทำให้เกิดรีแอกทีฟเพาเวอร์ จะตรวจจับกระแสไฟฟ้า (I) ที่มุม 0 องศา ของทุกๆ คาบสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (V) โดยใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ถูกแปลงเป็นพัลส์ (Pulse) แล ล้วเป็นสัญญาณเริ่มต้น (Start) ของวงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D) และเป็นสัญญาณซิงค์ (Sync) ให้กับวงจรมับ (Counter) โดยสัญญาณที่ได้จาก A/D จะเป็นข้อมูลขนาด 8 บิต (Bit) ของขนาดกระแสไฟฟ้า สูงสุด (เส้น C) ที่ใช้เป็นข้อมูลนำไปเปิดตารางซึ่งค่าในตารางหาได้โดยการคำนวณหาค่ามุมทริกไทเอ็ค (α) จากสมการ (3.5) วิธีการคำนวณแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก.

จากเทคนิคการตรวจจับลักษณะนี้ ทำให้ไม่ต้องรู้ค่ามุมต่างเฟส (θ) ระหว่างกระแสไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้า ทำให้ลดเวลาในการตรวจจับ และไม่มีกรคำนวณที่ยุ่งยากจึงสามารถใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขีดความสามารถในการคำนวณต่ำ ซึ่งมีราคาถูกหาง่ายแต่ยังคงสามารถทำงานทันกับการเปลี่ยนแปลงค่า ดิสเพิลสเม้นต์แฟกเตอร์ของระบบไฟฟ้า

4.8 การทำงานของ SOFTWARE

โฟลว์ชาร์ตขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโพล์ซาร์ที่ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

-การตั้งค่าเริ่มต้นของระบบเป็นการตั้งค่ามุมทริกเริ่มแรกให้กับ ไทรแอ็ค และค่าเริ่มต้นของอุปกรณ์ต่างๆ

-การตรวจจับขอบขาขึ้นของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเพื่อเป็นสัญญาณ อ้างอิงให้กับการตรวจสอบเฟสของกระแสไฟฟ้า

-การตรวจสอบกระแสไฟฟ้าว่ามีเฟสของสัญญาณนำหน้าหรือล่าหลังสัญญาณแรงดันไฟฟ้า โปรแกรมใช้ตำแหน่ง 0 องศา ของทุกคาบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยอาศัยขอบขาขึ้นของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นจุดสังเกตสัญญาณกระแสไฟฟ้าว่าสถานะเป็น 1 หรือ 0 ถ้าค่าเป็น 1 แสดงว่า กระแสไฟฟ้านำหน้า , ถ้าเป็น 0 หมายถึงกระแสไฟฟ้าล่าหลัง

-เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับสัญญาณ BOC. เป็นสัญญาณบอกให้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ไปปรับค่ากระแสไฟฟ้าขนาด 8 บิต (Bit) จาก A/D

-ค่ากระแสไฟฟ้าที่รับจาก A/D ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 ถือว่าค่า รีแอ็คทีฟเพาเวอร์ ของระบบไฟฟ้าเป็น 0 แต่ถ้าไม่เป็น 0 ก็นำค่ากระแสไฟฟ้า 8 บิต นำมาบวกกับค่าตารางปัจจุบันถ้าเฟสสัญญาณกระแสไฟฟ้านำหน้า สัญญาณแรงดันไฟฟ้า แต่ถ้าสัญญาณกระแสไฟฟ้าล่าหลังค่ากระแสไฟฟ้า 8 บิต จาก A/D จะต้องนำมาลบกับค่าตารางปัจจุบัน

-ค่าตารางใหม่ที่ได้ ต้องนำมาเปรียบเทียบกับช่วงขีดจำกัดว่าค่าตารางใหม่ที่ได้มีค่าเกินช่วงจำกัดหรือไม่ ถ้ามีค่าเกินช่วงจำกัด ก็จะทำการปรับให้ค่าตารางมีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดขึ้นอยู่กับว่าเฟสกระแสไฟฟ้ามีค่าล่าหลัง หรือนำหน้าเพื่อทำให้การชดเชยค่ารีแอ็คทีฟเพาเวอร์ เป็นไปให้ได้มากที่สุดเท่าที่ระบบควบคุมจะสามารถทำได้

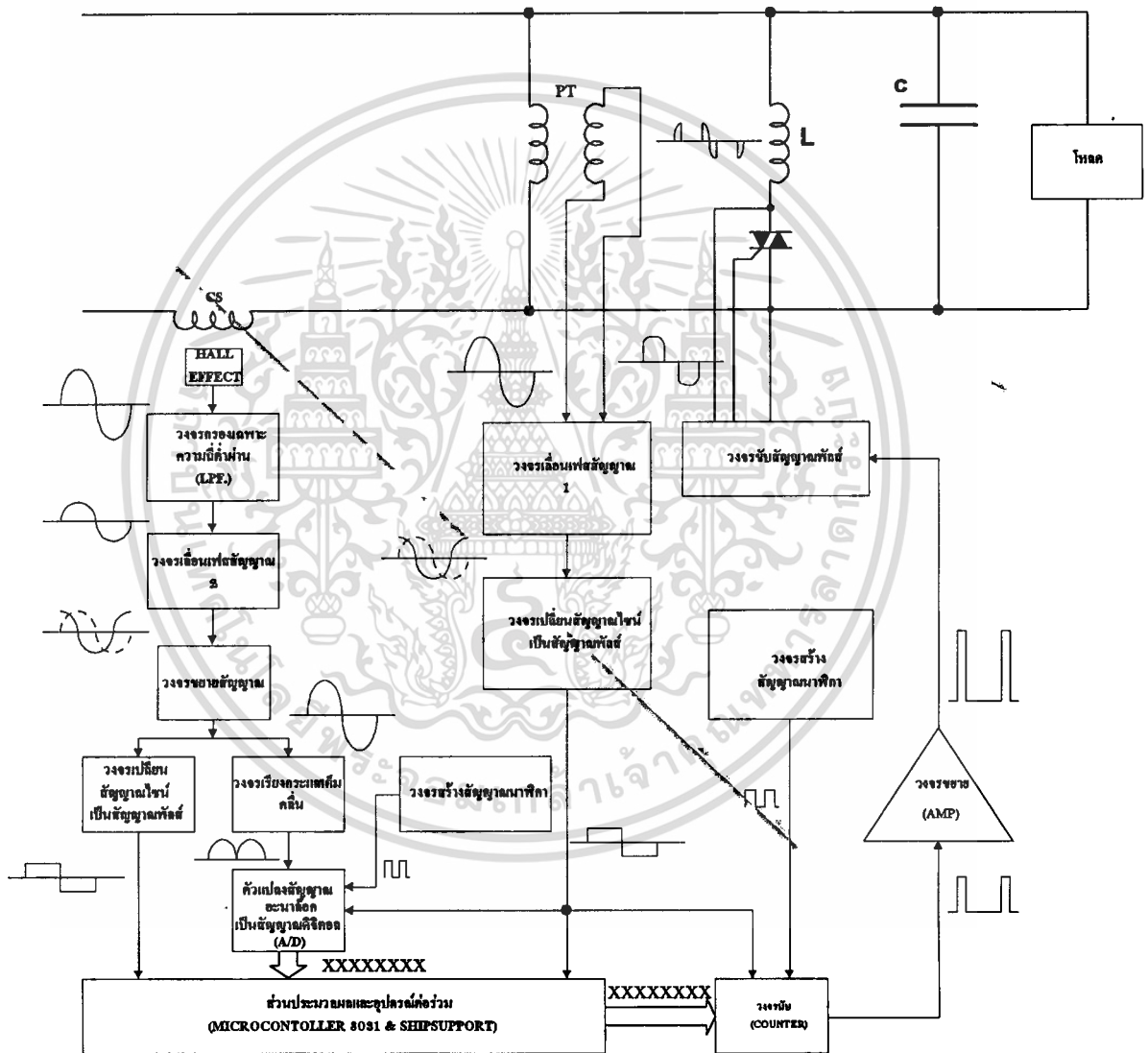
-จากค่าตารางใหม่ที่ได้ นำค่าไปเปิดค่าในตาราง และส่งค่าในตารางไปยังตัวนับสัญญาณเพื่อทำการปรับมุมทริกไทรแอ็ค หลังจากนั้นการทำงานก็จะเริ่มการทำซ้ำตั้งแต่การตรวจจับสัญญาณขอบขาขึ้นของแรงดันไฟฟ้าอีก

(ตัวโปรแกรมแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข.)

บทที่ 5

ส่วนฮาร์ดแวร์ของตัวควบคุมการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ

5.1 การทำงานของส่วนฮาร์ดแวร์โดยรวม

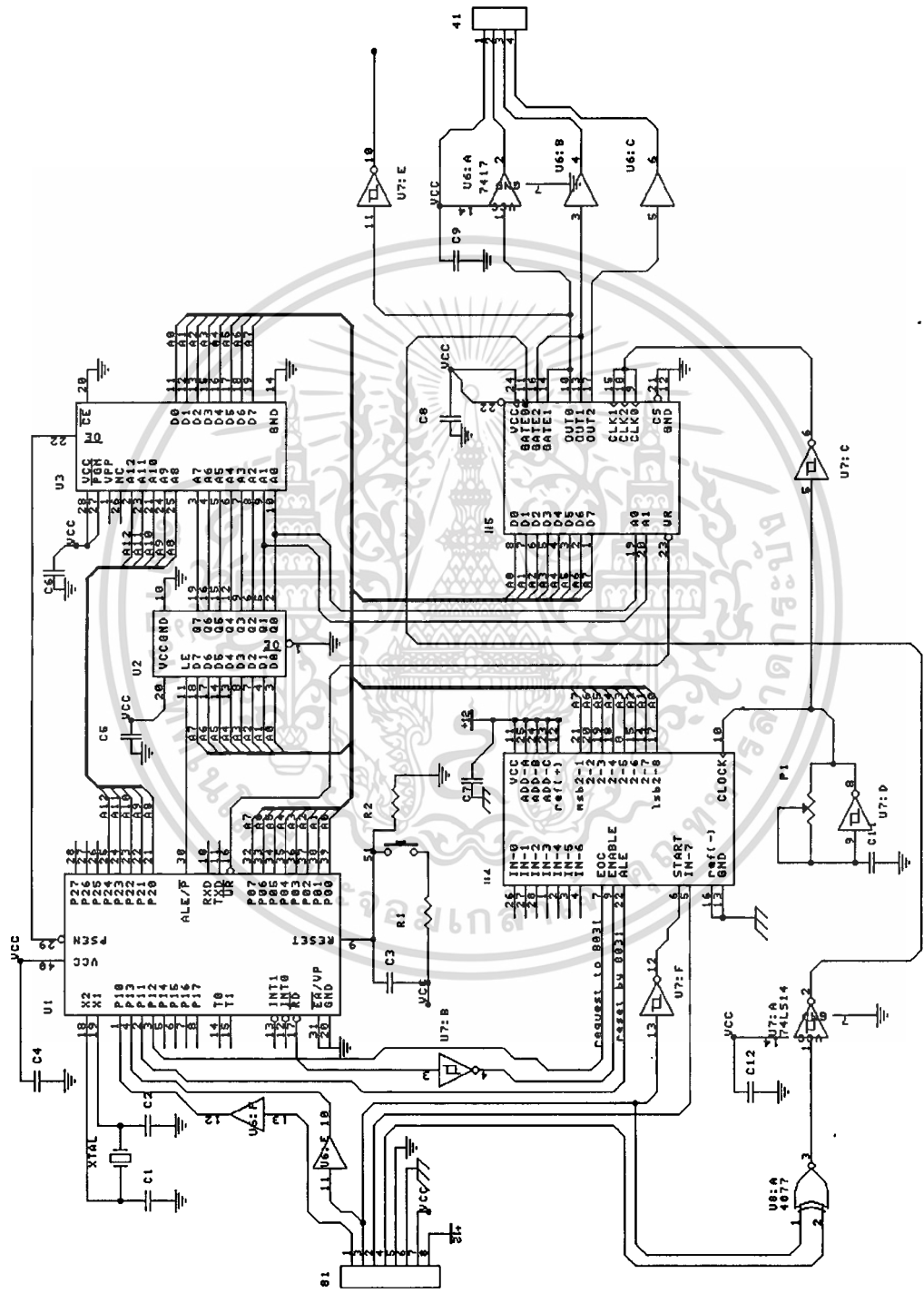


รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของฮาร์ดแวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บล็อกไดอะแกรมทั้งหมดแสดงในรูปที่ 5.1 มีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 ใช้คริสตัล (Crystal) 12 MHz ในการทำงาน ตัวนับใช้ไอซี (IC) เบอร์ 8253 , การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลใช้ไอซี เบอร์ ADC 8080 , ชุดในการชดเชยกำลังรีแอคทีฟ เป็นตัวเก็บประจุค่าคงที่ต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับไทโรเอ็ค (Thiac) หรือที่เรียกว่ารีแอคเตอร์แบบควบคุมโดยไทโรเอ็คเตอร์ , ไทโรเอ็คใช้ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ PT. เป็นหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าต่ำลง และแยกกราวด์ (Ground) ไฟฟ้าของชุดกำลังไฟฟ้าออกจากชุดควบคุมตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า CS ใช้ไอซีฮอลล์เอฟเฟ็คท์ (Hall effect) ในการตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้กำลัง LPF. (Low pass filter) ทำหน้าที่กรองสัญญาณกระแสไฟฟ้า ความถี่ต่ำผ่านเฉพาะในส่วนที่เป็นสัญญาณที่มีความถี่หลัก[50Hz] เท่านั้น , เฟสชิฟท์ (Phase shift)1 ทำหน้าที่เลื่อนเฟสสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตรวจจับ ให้มีเฟสสัญญาณตรงกับแหล่งจ่ายกำลังจริงเฟสของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามีความสำคัญมาก เพราะใช้เป็นสัญญาณซิงค์ให้กับตัวนับ และเป็นสัญญาณเริ่มต้นให้กับ A/D จำเป็นต้องมีเฟสที่ไม่สิดเพี้ยน , ตัวขยายสัญญาณ (AMP) มีหน้าที่ปรับขนาดของสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้ได้ตามความต้องการของ A/D , ตัวแปลงสัญญาณไซน์เป็นพัลส์(Sine to pulse) 1 และ 2 ทำการเปลี่ยนคลื่นไซน์ให้เป็นคลื่นพัลส์ เพื่อป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์อื่นๆ , ตัวเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Full waved rectify) ทำหน้าที่เรียงสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้มีแต่ด้านบวกเพราะ A/D ที่ใช้เป็นแบบใช้แหล่งจ่ายไฟเดี่ยว (Single Supply)

5.2 การทำงานของส่วนต่างๆ



รูปที่ 5.2 วงจรส่วนควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดส่วนวงจรควบคุม

U_1 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ 8031 โดยมี U_2 และ U_3 เป็น IC ต่อร่วม

U_2 เป็น IC Latch เบอร์ 74373

U_3 เป็น IC ROM เบอร์ 2764

U_4 เป็น IC A/D เบอร์ 0809 โดยความถี่ Clock ที่ใช้ในการแซมปิงก์ เท่ากับ 360 KHz ที่ใช้ความถี่นี้เพราะเป็นความถี่เดียวกันกับความถี่ Clock ของตัวนับ เพื่อป้องกันการรบกวนกันของความถี่

U_5 เป็น IC ตัวนับ เบอร์ 8257 ความถี่ Clock เท่ากับ 360 KHz จำนวนจากข้อมูลในตารางที่ภาคผนวก ก. โดยสังเกตค่ามุมต่ำสุดที่มีการเปลี่ยนแปลงคือ มีค่าเท่ากับ 0.05

วิธีการคำนวณความถี่ (f_{clock})

$$f_{\text{clock}} = \frac{360 \times f}{s}$$

f = ความถี่ของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า (50 Hz)

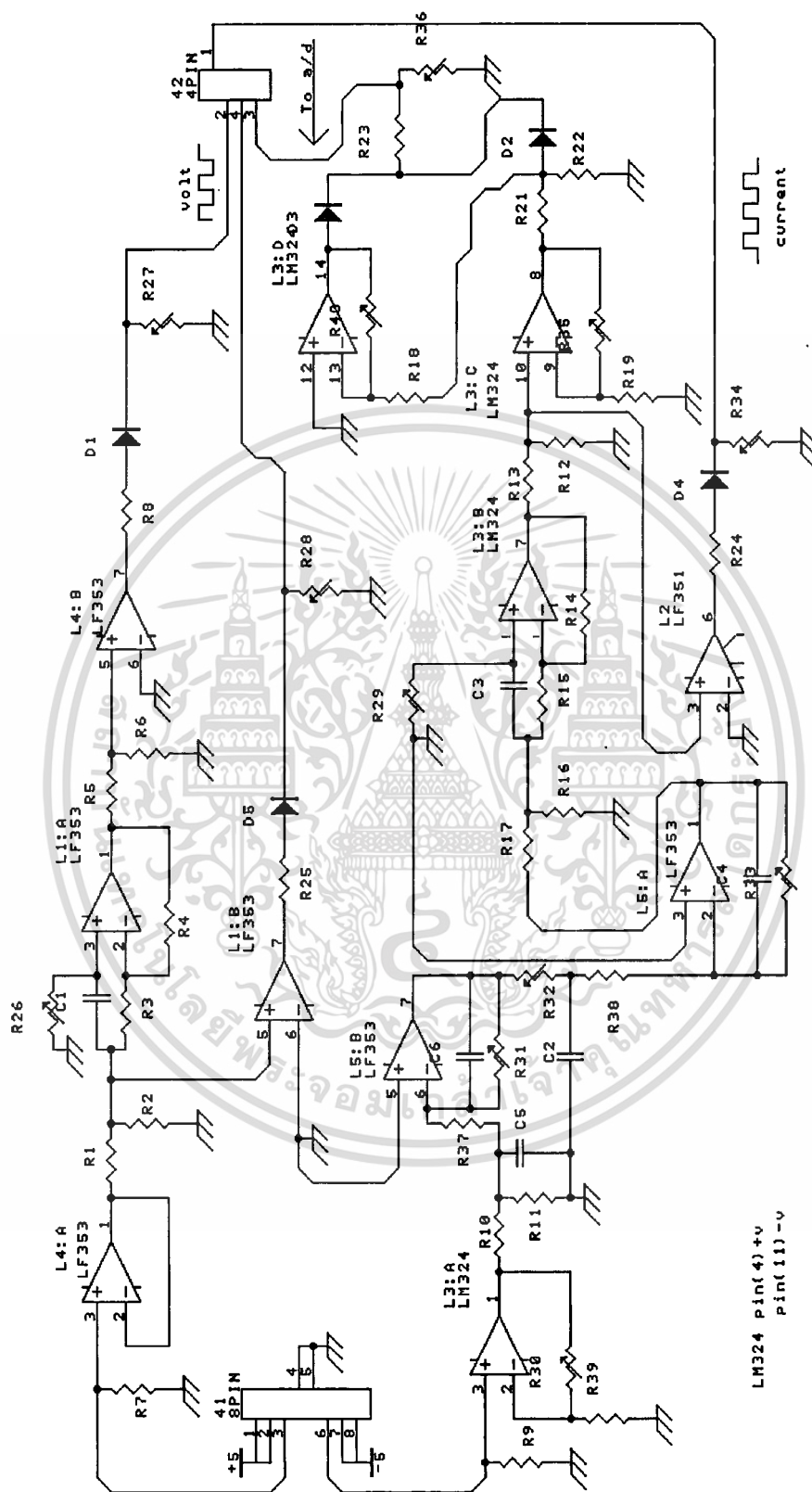
s = ค่ามุมต่ำสุดที่มีการเปลี่ยนแปลง (0.05)

$$\begin{aligned} f_{\text{clock}} &= \frac{360 \times f}{0.05} \\ &= 360 \text{ KHz} \end{aligned}$$

U_6 เป็น IC Buffer เบอร์ 7417 ทำหน้าที่ปรับระดับ สัญญาณ Input ที่ได้จากวงจรตรวจจับให้ได้ระดับที่ U_1 ต้องการ และทำหน้าที่วงจรถับกระแสให้กับวงจรทรานซิสเตอร์

U_7 เป็น IC Invertor เบอร์ 7414 ทำหน้าที่ผลิตความถี่ 360 KHz และกลับสัญญาณดิจิตอลให้ได้ตามต้องการ

U_8 เป็น IC Exclusive NOR เบอร์ 4077 ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณซิงค์ให้กับตัวนับ



รูปที่ 5.3 วงจรส่วนตรวจจับสนัยญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดส่วนวงจรตรวจจับ

L1: A , R₃ , R₄ , C₁ , R₂₆

เป็นส่วนวงจรเลื่อนเฟสสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเพื่อชดเชยความผิดพลาดจากวงจรส่วนอื่น ๆ โดยวิธีการปรับโดยวัดเทียบกับสัญญาณแหล่งจ่ายโดยตรง ด้วยออสซิลอสโคปการปรับเฟสสัญญาณทำได้โดยการปรับค่าความต้านทานของ R₂₆

L4: A , R₇ , R₁ , R₂

เป็นวงจร Buffer ให้กับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตรวจจับเข้ามา

L4: B , R₈ , D₁ , R₂₇

เป็นวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณพัลส์ และปรับขนาดของสัญญาณด้วย R₂₇

L1: B , R₂₅ , D₅ , R₂₈

เป็นวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณพัลส์ แต่สัญญาณ Input มีเฟสต่างกันเพื่อที่จะนำสัญญาณที่ได้จาก L4: B กับ L1: B มาทำเป็นสัญญาณซิงค์ให้กับตัวนับ

L3: A , R₉ , R₃₉ , R₃₀ , R₁₀ , R₁₁

เป็นวงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ตรวจจับเข้ามา เพื่อให้ได้ขนาดสัญญาณที่ต้องการ

L5: B , C₅ , R₃₇ , R₃₁ , C₆ , R₃₂ , R₃₈ , R₃₃ , C₄ , L5: A

เป็นวงจรรอบความถี่ต่ำเพื่อสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่นำไปประมวลผลจะมีแต่ความถี่หลักเท่านั้น

L3: B , R₂₉ , C₃ , R₁₅ , R₁₄

ทำหน้าที่เลื่อนเฟสสัญญาณกระแสไฟฟ้า การปรับแต่งกระทำโดยการต่อโหลดเฉพาะค่าความต้านทาน ให้กับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า และทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาเป็นสัญญาณอ้างอิง และทำการปรับค่า R₂₉ เพื่อปรับเฟสสัญญาณของกระแสไฟฟ้าให้มีเฟสสัญญาณเดียวกับ

เฟสของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการทำเช่นนี้เพราะการทำงานเราต้องการความเร็วสูงเพราะ
 ฉะนั้นการประมวลผลเราจึงกำหนดให้กระทำที่มุม 0 องศาของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

L2 , R24 , D4 , R34

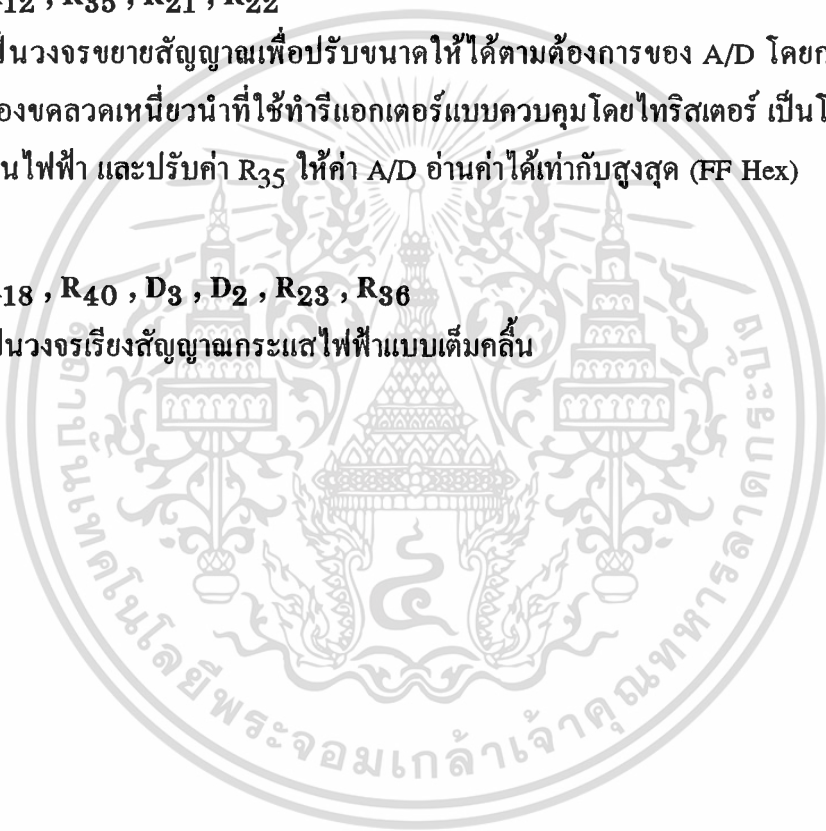
เป็นวงจรแปลงสัญญาณ ไซน์เป็นสัญญาณพัลส์ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าเพื่อนำไป
 ประมวลผลว่าสัญญาณกระแสไฟฟ้ามีเฟสหน้าหรือล้าหลังสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

L3: C , R12 , R35 , R21 , R22

เป็นวงจรขยายสัญญาณเพื่อปรับขนาดให้ได้ตามต้องการของ A/D โดยการปรับกระทำ
 โดยการต้องขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ทำรีแอคเตอร์แบบควบคุมโดยทรินสเตอร์ เป็นโหลดของแหล่ง
 จ่ายพลังงานไฟฟ้า และปรับค่า R35 ให้ค่า A/D อ่านค่าได้เท่ากับสูงสุด (FF Hex)

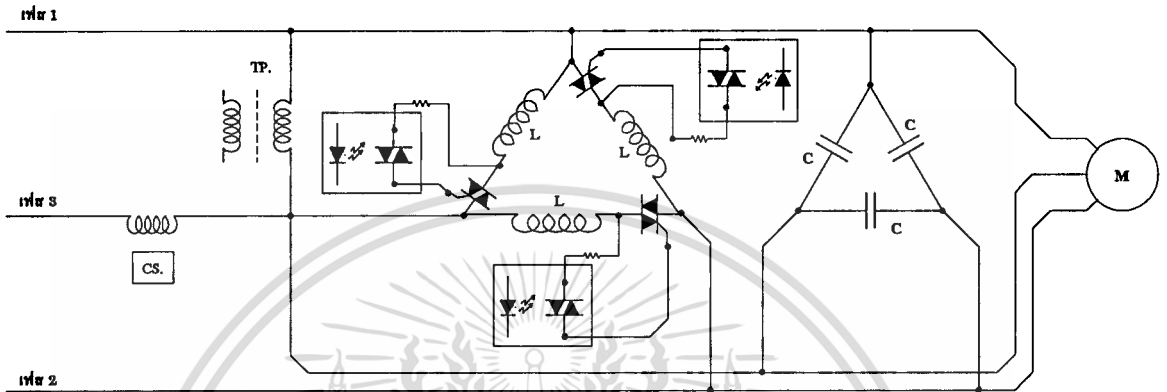
L3: D , R18 , R40 , D3 , D2 , R23 , R36

เป็นวงจรเรียงสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น



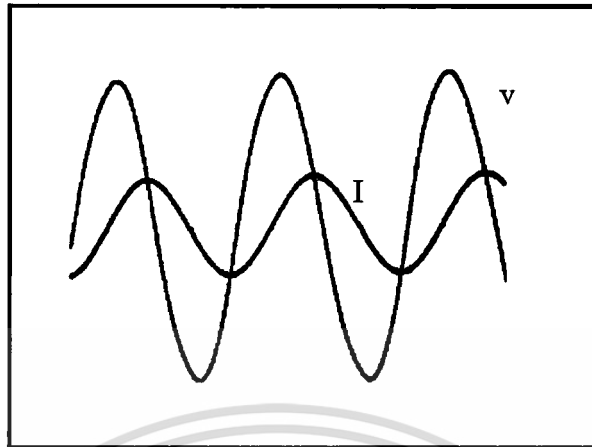
บทที่ 6

ผลการทดลอง



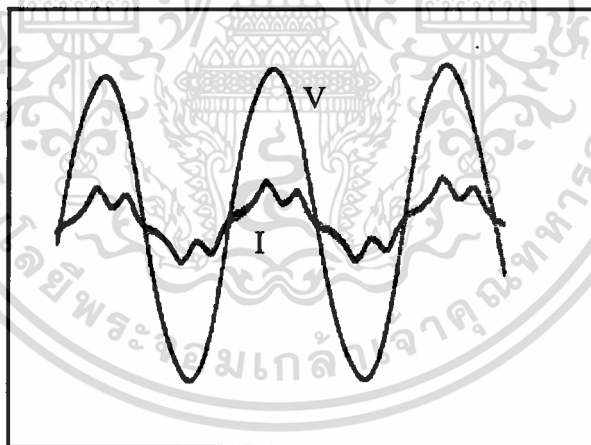
รูปที่ 6.1 รูปที่ใช้ทดลองในส่วนชดเชย (TCR & FC) กับ มอเตอร์ 3 เฟส (motor 3 ϕ)

ในการทดลองใช้แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 50 V ในแต่ละเฟส (50Hz) , $L = 533.87$ mH $C = 15$ μ F โหลด (load) ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์ 3 เฟสขนาด 1 แรงม้า และรูปผลการทดลองที่แสดงให้เห็นได้มาจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอ และใช้แผ่นเก็บข้อมูลภาพ (Image card) ในการเก็บภาพแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ผลที่นำมาแสดงตามรูปไม่ได้วัดจากสายส่งกำลังโดยตรงแต่วัดจากวงจรตรวจจับ (Sensored) และทำการวัดเพียง 1 เฟสสัญญาณเพราะข้อจำกัดของกราวด์ออสซิลโลสโคป (Ground oscilloscope) จากจุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ ต้องการเสนอแนวคิดในการควบคุม ดิสเพนสเม้นแพคเตอร์ ดังนั้น รูปภาพผลการทดลองจึงเน้นที่จะแสดงเฉพาะความต่างเฟสของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้านั้น ส่วนขนาดของสัญญาณจึงไม่กล่าวในรายละเอียด



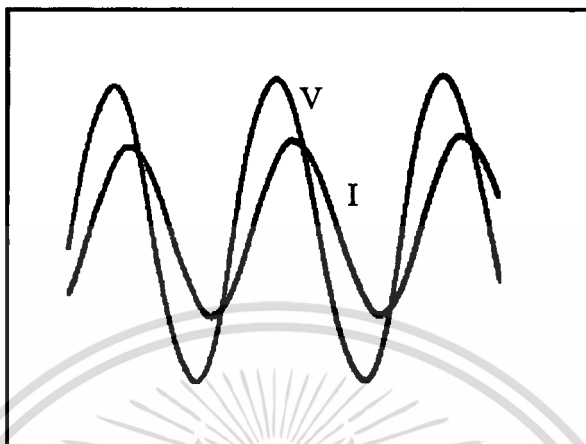
รูปที่ 6.2 มอเตอร์ ไม่มีโหลดและชุดขดเชยค่า คิสเพลสเม้นแฟคเตอร์

รูปที่ 6.2 เก็บภาพด้วยกล้องวิดีโอจำนวน 5 เฟรม (Frame) เพื่อชดเชยการกระพริบของจอออสซิลโลสโคป กระแสไฟฟ้าล้าหลังแรงดันไฟฟ้าประมาณ 90 องศา เพราะมอเตอร์ ไม่ได้ต่อโหลด , ค่าคิสเพลสเม้นแฟคเตอร์มีค่าจึงเข้าใกล้ 0



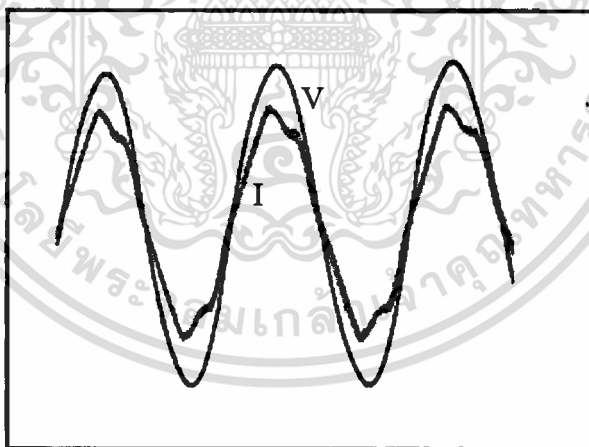
รูปที่ 6.3 มอเตอร์ ไม่มีโหลด แต่มีชุดขดเชยค่า คิสเพลสเม้นแฟคเตอร์

รูปที่ 6.3 เก็บภาพจำนวน 5 เฟรม จะเห็นว่าค่าความต่างเฟสของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0 องศา ทำให้ค่าคิสเพลสเม้นแฟคเตอร์ มีค่าเข้าใกล้ 1



รูปที่ 6.4 มอเตอร์ มีโหลดคงที่แต่ไม่มีชุดชดเชย

รูปที่ 6.4 เก็บภาพ 5 เฟรม สังเกตเฟสของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า มีเฟสล้าหลังไม่
ถึง 90 องศา เฟสล้าหลังจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดมอเตอร์

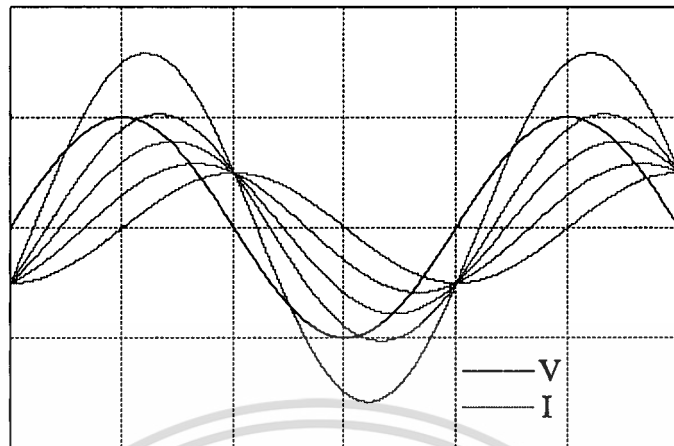


รูปที่ 6.5 มอเตอร์ มีโหลดคงที่และมีชุดชดเชย

รูปที่ 6.5 เก็บภาพ 5 เฟรม หลังจากมีชุดชดเชยแล้วจะทำให้ความต่างเฟสของสัญญาณทั้ง
สองมีค่าประมาณ 0 องศา ทำให้ค่าคอสเฟลสเป็นแฟคเตอร์ประมาณ 1

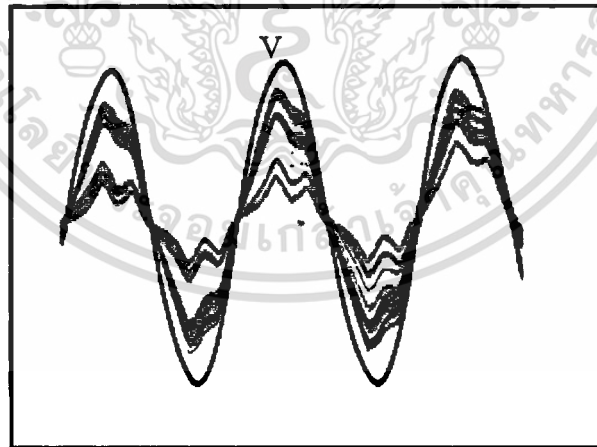


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 มอเตอร์ มีโหลด เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และไม่มีชุดชดเชย

รูปที่ 6.6 มิได้เป็นรูปที่ได้จากการทดลอง แต่มาจากโปรแกรมจำลองการทำงานของมอเตอร์ เพราะรูปภาพที่ได้จากการทดลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้ามีรูปร่างคล้ายคลึงกันจึงไม่สามารถแสดงให้เห็นได้ชัดเจน ดังนั้นเพื่อความชัดเจนของผลการทดลองระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีชุดควบคุมคิสเพลสเม้นท์เฟลคเตอร์กับระบบที่ไม่มีชุดควบคุมจึงมีความจำเป็นต้องใช้รูปจากโปรแกรมจำลองการทำงานของมอเตอร์



รูปที่ 6.7 มอเตอร์ มีโหลด เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และมีชุดชดเชย
(V เส้นนอกสุดเส้นเดียวเส้นในที่เหลือ เป็น I ที่เปลี่ยนตามโหลด)

รูปที่ 6.7 เก็บภาพ 20 เฟรมที่ต้องเก็บ 20 เฟรม เพราะต้องการแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตลอดเวลาที่เกิดจากโหลดของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงแต่

ชุดชดเชยสามารถทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า อินเฟส ตลอดเวลา สังเกตในขณะที่ โหลดของมอเตอร์ มีการเปลี่ยนแปลงจากรูป จะเห็นว่าขนาดของกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ตามโหลดของมอเตอร์ ถ้าโหลดมากขนาดกระแสไฟฟ้าจะมีมาก แต่ความต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้า กับกระแสไฟฟ้า มีค่าประมาณ 0 องศา ตลอดทำให้ค่าคอสเฟลสเป็นแฟคเตอร์ของระบบมีค่า ประมาณ 1 ตลอดเวลา ซึ่งถ้าไม่มีชุดชดเชยนี้ค่าคอสเฟลสเป็นแฟคเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงไป ตามโหลดของมอเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

บทสรุปการวิจัย

7.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการปรับ คิสเพลสमेंแพคเตอร์ ของระบบไฟฟ้าแบบสมมูลที่เปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนให้มีค่าประมาณ 1 คงที่สูงโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมโดยอาศัยหลักการตรวจจับ ดังที่กล่าวมาทำให้ระบบควบคุมมีการทำงานที่เร็ว และทันต่อการเปลี่ยนแปลงค่า คิสเพลสमेंแพคเตอร์ ของระบบไฟฟ้ากำลัง และใช้ขนาดของตารางเก็บข้อมูลน้อยลงมาก จากผลการทดลองแสดงว่าหลักการนี้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้งานได้จริง

7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะ

จากวงจรการทำงานทั้งหมด มีส่วนที่ต้องปรับแต่งเป็นจำนวนมากดังนี้ การปรับเฟส การปรับขนาดสัญญาณ , การปรับความถี่ และการปรับวงจรกรองสัญญาณ อาจทำให้เกิดความผิดพลาดจากการปรับแต่งวงจร

จากการวิจัยครั้งนี้ได้ผลการวิจัยที่สามารถจะนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ และอาจจะสามารถประยุกต์นำหลักการของแคปแบ็ง (Cap bank) มาใช้ร่วมกันเพื่อให้สามารถทำให้รับโหลดได้เพิ่มขึ้น สำหรับการใช้งานจริงที่ต้องการเสถียรภาพของระบบสูงความถี่ที่ป้อนให้กับ วงจรนับควร์ได้มาจากวงจรผลิตความถี่ที่ใช้หลักการของ เฟส ล็อก ลูป(Phase lock loop)

เอกสารอ้างอิง

1. J. E. Miller , Reactive power control in electric system. NewYork::Wilcy , 1982.2.
2. H. M. Elbolok , M.E. Masoud , and M. M. Mahmoud " A microprocessor - based adaptive power factor corrector for nonlinear loads " IEEE Trans. Industrial electronics , vol. 37 , No 1 , February 1990
3. Laszlo Gyugyi and Edgar R " Characteristics of static , Thyristor controlled shunt compensators for power transmission system applications " IEEE Transactions on power apparatus and systems ,vol.PAS-99, No.5, Sept/Oct 1980
4. S E Hague , N H Malik , W Shepherd " Operation of a fixed capacitor - thyristor controlled reactor (FC.-TCR.) power factor compensator " IEEE Transactions on power apparatus and systems, vol. pas-104 , No.6 , June 1985

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] ศิริโชค ปรีตโตทกพร และสิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์, "วงจรถักสัดมอดูเลเตอร์ ที่สามารถควบคุมฮาร์โมนิกส์ได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 15, E-10, 3-4 ธันวาคม 2535

[2] ศิริโชค ปรีตโตทกพร และสิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์, ชัยรัตน์ ฤทธิรงค์ "การวิเคราะห์อย่างง่ายของวงจรถยายแบบ Class E", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16, EL 002, 25-26 พฤศจิกายน 2536

[3] ศิริโชค ปรีตโตทกพร และสิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์, "การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ปรับปรุงกำลังรีแอคทีฟในระบบไฟฟ้าโดยมีผลตอบสนองแบบเวลาจริง", สหภาพวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2537, EE 127-136, 5-8 ตุลาคม 2537



ภาคผนวก ก.

การคำนวณค่าตาราง

การชี้ไปยังตารางอาศัยข้อมูลจาก A/D ขนาด 8 บิต และข้อมูลตารางปัจจุบัน โดยข้อมูลในการคำนวณโดยอาศัยสมการที่ 3.5

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L}$$

การแปลงสัญญาณของ A/D มีการแปลงในลักษณะแบบเชิงเส้นแต่สมการที่เป็นสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพราะฉะนั้นการคำนวณหาค่ามุนำกระแสไฟฟ้าของไทรแอดิก (α) ที่เป็นข้อมูลในตารางจึงใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาค่าในตารางโดยอัตราส่วนของค่าความนำในสมการที่ 3.5 ที่มุนำกระแสไฟฟ้าของไทรแอดิก ที่ได้จากรายที่ N กับ $N + 1$ ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2

เนื่องจากข้อมูลของ A/D มีขนาด 8 บิต ค่า $LSB = 256^{-1}$ ดังนั้นค่า Offset error (Zero error) = 512^{-1} เพราะฉะนั้นเราสามารถใช้อคอมพิวเตอร์คำนวณหาค่ามุนำกระแสไฟฟ้าของไทรแอดิก โดยกำหนดให้ค่า Error ที่ยอมรับได้โดยไม่เกิน 512^{-1}

โปรแกรมที่ใช้หาค่ามุนำ α

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>

#define STD stdout
#define PI (double)3.141592654
#define K (double)2.329e-5
#define XL (double)167.721
#define Step (double)0.05*PI/180.0
```

```

#define Start PI/2

#define Stop PI

#define EA 1e-5

#define EL(x) (double)((PI-x)*2.0)

#define F(x,n) fabs(((x-sin(x))/(PI*XL))-K*n)

double LF;

void main()
{
    double X,Result,OLD_Result=1.0,OLD_LF=0.0;
    int N,N_OLD;

    clrscr();
    for(N=N_OLD=1;N<=256;N++)
    {
        LF = PI/2.0;
        do {
            X = EL(LF);
            Result = F(X,N);
            if(Result <= EA)
            {
                if(N_OLD != N)
                {
                    fprintf(STD,"LF = %0.1lfHex %x\nDEG %0.2lfError = %le\nN= %d\n",
(OLD_LF*180.0/PI)/0.05,
(int)((OLD_LF*180.0/PI)/0.05+0.5),OLD_LF*180.0/
PI,OLD_Result,N_OLD);
                    N_OLD = N;
                    OLD_Result = 1.0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else
{
    if(OLD_Result>Result)
    {
        OLD_Result = Result;
        OLD_LF = LF;
    }
}
}
LF += Step;
} while(LF<= Stop+Step);
}
fprintf(STD,"LF = %0.1lf\tHex %xh\tDEG %0.2lf\tError = %le\tN= %d \n", (OLD_LF*180.0/PI)
/0.05,
(int)((OLD_LF*180.0/PI)/0.05+0.5),OLD_LF*180.0/PI,OLD_Result,N_OLD);
}

```

ผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมที่ใช้หาค่ามุม α

ค่าในตาราง	ค่า α	Error แต่ A/Dจับไม่ได้	ลำดับ
LF = 3359.0	Hex d1fh	DEG 167.95	Error = 4.200089e-08 N = 1
LF = 3296.0	Hex ce0h	DEG 164.80	Error = 5.335339e-09 N = 2
LF = 3252.0	Hex cb4h	DEG 162.60	Error = 2.927702e-07 N = 3
LF = 3216.0	Hex c90h	DEG 160.80	Error = 5.386485e-08 N = 4
LF = 3186.0	Hex c72h	DEG 159.30	Error = 1.980374e-07 N = 5
LF = 3159.0	Hex c57h	DEG 157.95	Error = 2.787033e-07 N = 6
LF = 3136.0	Hex c40h	DEG 156.80	Error = 4.581396e-07 N = 7
LF = 3114.0	Hex c2ah	DEG 155.70	Error = 1.046137e-07 N = 8
LF = 3094.0	Hex c16h	DEG 154.70	Error = 8.122728e-08 N = 9
LF = 3075.0	Hex c03h	DEG 153.75	Error = 4.306815e-07 N = 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF = 3058.0	Hex bf2h	DEG 152.90	Error = 1.607657e-07	N = 11
LF = 3041.0	Hex be1h	DEG 152.05	Error = 6.027845e-07	N = 12
LF = 3026.0	Hex bd2h	DEG 151.30	Error = 3.155531e-07	N = 13
LF = 3011.0	Hex bc3h	DEG 150.55	Error = 1.381179e-07	N = 14
LF = 2997.0	Hex bb5h	DEG 149.85	Error = 5.206851e-07	N = 15
LF = 2983.0	Hex ba7h	DEG 149.15	Error = 8.095689e-08	N = 16
LF = 2970.0	Hex b9ah	DEG 148.50	Error = 1.309366e-07	N = 17
LF = 2957.0	Hex b8dh	DEG 147.85	Error = 5.276651e-07	N = 18
LF = 2945.0	Hex b81h	DEG 147.25	Error = 1.252117e-07	N = 19
LF = 2933.0	Hex b75h	DEG 146.65	Error = 4.802658e-07	N = 20
LF = 2922.0	Hex b6ah	DEG 146.10	Error = 4.636132e-07	N = 21
LF = 2911.0	Hex b5fh	DEG 145.55	Error = 7.598432e-07	N = 22
LF = 2900.0	Hex b54h	DEG 145.00	Error = 4.034696e-07	N = 23
LF = 2889.0	Hex b49h	DEG 144.45	Error = 6.102216e-07	N = 24
LF = 2879.0	Hex b3fh	DEG 143.95	Error = 1.134660e-08	N = 25
LF = 2869.0	Hex b35h	DEG 143.45	Error = 8.279372e-08	N = 26
LF = 2859.0	Hex b2bh	DEG 142.95	Error = 3.988975e-07	N = 27
LF = 2850.0	Hex b22h	DEG 142.50	Error = 1.021289e-06	N = 28
LF = 2840.0	Hex b18h	DEG 142.00	Error = 5.190730e-07	N = 29
LF = 2831.0	Hex b0fh	DEG 141.55	Error = 5.592776e-08	N = 30
LF = 2822.0	Hex b06h	DEG 141.10	Error = 4.886327e-08	N = 31
LF = 2813.0	Hex afdh	DEG 140.65	Error = 4.994903e-07	N = 32
LF = 2805.0	Hex af5h	DEG 140.25	Error = 1.302282e-06	N = 33
LF = 2796.0	Hex aech	DEG 139.80	Error = 1.686909e-08	N = 34
LF = 2788.0	Hex ae4h	DEG 139.40	Error = 1.010760e-06	N = 35
LF = 2779.0	Hex adbh	DEG 138.95	Error = 1.181494e-06	N = 36
LF = 2771.0	Hex ad3h	DEG 138.55	Error = 9.317382e-07	N = 37
LF = 2763.0	Hex acbh	DEG 138.15	Error = 1.049135e-06	N = 38
LF = 2756.0	Hex ac4h	DEG 137.80	Error = 1.457736e-06	N = 39
LF = 2748.0	Hex abch	DEG 137.40	Error = 6.503589e-07	N = 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF = 2740.0	Hex ab4h	DEG 137.00	Error = 5.257113e-07	N = 41
LF = 2733.0	Hex aadh	DEG 136.65	Error = 1.053721e-06	N = 42
LF = 2725.0	Hex aa5h	DEG 136.25	Error = 8.146599e-07	N = 43
LF = 2718.0	Hex a9eh	DEG 135.90	Error = 1.585454e-07	N = 44
LF = 2711.0	Hex a97h	DEG 135.55	Error = 8.486156e-07	N = 45
LF = 2704.0	Hex a90h	DEG 135.20	Error = 1.255463e-06	N = 46
LF = 2697.0	Hex a89h	DEG 134.85	Error = 1.379043e-06	N = 47
LF = 2690.0	Hex a82h	DEG 134.50	Error = 1.219351e-06	N = 48
LF = 2683.0	Hex a7bh	DEG 134.15	Error = 7.764277e-07	N = 49
LF = 2676.0	Hex a74h	DEG 133.80	Error = 5.035419e-08	N = 50
LF = 2669.0	Hex a6dh	DEG 133.45	Error = 9.587457e-07	N = 51
LF = 2663.0	Hex a67h	DEG 133.15	Error = 1.278313e-06	N = 52
LF = 2656.0	Hex a60h	DEG 132.80	Error = 2.559348e-07	N = 53
LF = 2650.0	Hex a5ah	DEG 132.50	Error = 1.531329e-06	N = 54
LF = 2643.0	Hex a53h	DEG 132.15	Error = 5.272240e-07	N = 55
LF = 2637.0	Hex a4dh	DEG 131.85	Error = 8.110826e-07	N = 56
LF = 2630.0	Hex a46h	DEG 131.50	Error = 1.770662e-06	N = 57
LF = 2624.0	Hex a40h	DEG 131.20	Error = 8.802431e-07	N = 58
LF = 2618.0	Hex a3ah	DEG 130.90	Error = 1.961167e-07	N = 59
LF = 2612.0	Hex a34h	DEG 130.60	Error = 2.820164e-07	N = 60
LF = 2606.0	Hex a2eh	DEG 130.30	Error = 5.544785e-07	N = 61
LF = 2600.0	Hex a28h	DEG 130.00	Error = 6.216141e-07	N = 62
LF = 2594.0	Hex a22h	DEG 129.70	Error = 4.837906e-07	N = 63
LF = 2588.0	Hex a1ch	DEG 129.40	Error = 1.413975e-07	N = 64
LF = 2582.0	Hex a16h	DEG 129.10	Error = 4.051529e-07	N = 65
LF = 2576.0	Hex a10h	DEG 128.80	Error = 1.155426e-06	N = 66
LF = 2571.0	Hex a0bh	DEG 128.55	Error = 1.945720e-06	N = 67
LF = 2565.0	Hex a05h	DEG 128.25	Error = 8.231572e-07	N = 68
LF = 2559.0	Hex 9ffh	DEG 127.95	Error = 5.017761e-07	N = 69
LF = 2553.0	Hex 9f9h	DEG 127.65	Error = 2.028560e-06	N = 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF = 2548.0	Hex 9f4h	DEG 127.40	Error = 4.269853e-07	N = 71
LF = 2542.0	Hex 9eeh	DEG 127.10	Error = 1.468435e-06	N = 72
LF = 2537.0	Hex 9e9h	DEG 126.85	Error = 6.807150e-07	N = 73
LF = 2531.0	Hex 9e3h	DEG 126.55	Error = 1.581384e-06	N = 74
LF = 2526.0	Hex 9deh	DEG 126.30	Error = 2.630582e-07	N = 75
LF = 2521.0	Hex 9d9h	DEG 126.05	Error = 1.969585e-06	N = 76
LF = 2515.0	Hex 9d3h	DEG 125.75	Error = 8.220924e-07	N = 77
LF = 2510.0	Hex 9ceh	DEG 125.50	Error = 5.823814e-07	N = 78
LF = 2505.0	Hex 9c9h	DEG 125.25	Error = 1.850200e-06	N = 79
LF = 2499.0	Hex 9c3h	DEG 124.95	Error = 1.466215e-06	N = 80
LF = 2494.0	Hex 9beh	DEG 124.70	Error = 4.975581e-07	N = 81
LF = 2489.0	Hex 9b9h	DEG 124.45	Error = 3.358111e-07	N = 82
LF = 2484.0	Hex 9b4h	DEG 124.20	Error = 1.034342e-06	N = 83
LF = 2479.0	Hex 9afh	DEG 123.95	Error = 1.598492e-06	N = 84
LF = 2474.0	Hex 9aah	DEG 123.70	Error = 2.028733e-06	N = 85
LF = 2468.0	Hex 9a4h	DEG 123.40	Error = 2.289063e-06	N = 86
LF = 2463.0	Hex 99fh	DEG 123.15	Error = 2.151722e-06	N = 87
LF = 2458.0	Hex 99ah	DEG 122.90	Error = 2.146721e-06	N = 88
LF = 2453.0	Hex 995h	DEG 122.65	Error = 2.273548e-06	N = 89
LF = 2449.0	Hex 991h	DEG 122.45	Error = 2.188426e-06	N = 90
LF = 2444.0	Hex 98ch	DEG 122.20	Error = 1.825631e-06	N = 91
LF = 2439.0	Hex 987h	DEG 121.95	Error = 1.332496e-06	N = 92
LF = 2434.0	Hex 982h	DEG 121.70	Error = 7.095705e-07	N = 93
LF = 2429.0	Hex 97dh	DEG 121.45	Error = 4.258653e-08	N = 94
LF = 2424.0	Hex 978h	DEG 121.20	Error = 9.234051e-07	N = 95
LF = 2419.0	Hex 973h	DEG 120.95	Error = 1.932306e-06	N = 96
LF = 2415.0	Hex 96fh	DEG 120.75	Error = 1.826751e-06	N = 97
LF = 2410.0	Hex 96ah	DEG 120.50	Error = 5.887937e-07	N = 98
LF = 2405.0	Hex 965h	DEG 120.25	Error = 7.755710e-07	N = 99
LF = 2400.0	Hex 960h	DEG 120.00	Error = 2.265727e-06	N = 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF = 2396.0	Hex 95ch	DEG 119.80	Error = 1.109998e-06	N = 101
LF = 2391.0	Hex 957h	DEG 119.55	Error = 6.049993e-07	N = 102
LF = 2386.0	Hex 952h	DEG 119.30	Error = 2.444012e-06	N = 103
LF = 2382.0	Hex 94eh	DEG 119.10	Error = 6.539252e-07	N = 104
LF = 2377.0	Hex 949h	DEG 118.85	Error = 1.406664e-06	N = 105
LF = 2373.0	Hex 945h	DEG 118.65	Error = 1.514873e-06	N = 106
LF = 2368.0	Hex 940h	DEG 118.40	Error = 7.651249e-07	N = 107
LF = 2364.0	Hex 93ch	DEG 118.20	Error = 1.981769e-06	N = 108
LF = 2359.0	Hex 937h	DEG 117.95	Error = 5.154146e-07	N = 109
LF = 2355.0	Hex 933h	DEG 117.75	Error = 2.058636e-06	N = 110
LF = 2350.0	Hex 92eh	DEG 117.50	Error = 6.534576e-07	N = 111
LF = 2346.0	Hex 92ah	DEG 117.30	Error = 1.749591e-06	N = 112
LF = 2341.0	Hex 925h	DEG 117.05	Error = 1.175082e-06	N = 113
LF = 2337.0	Hex 921h	DEG 116.85	Error = 1.058850e-06	N = 114
LF = 2332.0	Hex 91ch	DEG 116.60	Error = 2.076023e-06	N = 115
LF = 2328.0	Hex 918h	DEG 116.40	Error = 9.281887e-09	N = 116
LF = 2324.0	Hex 914h	DEG 116.20	Error = 1.983781e-06	N = 117
LF = 2319.0	Hex 90fh	DEG 115.95	Error = 1.450402e-06	N = 118
LF = 2315.0	Hex 90bh	DEG 115.75	Error = 3.783251e-07	N = 119
LF = 2311.0	Hex 907h	DEG 115.55	Error = 2.134662e-06	N = 120
LF = 2306.0	Hex 902h	DEG 115.30	Error = 1.593600e-06	N = 121
LF = 2302.0	Hex 8feh	DEG 115.10	Error = 1.339895e-09	N = 122
LF = 2298.0	Hex 8fah	DEG 114.90	Error = 1.525215e-06	N = 123
LF = 2293.0	Hex 8f5h	DEG 114.65	Error = 2.491744e-06	N = 124
LF = 2289.0	Hex 8f1h	DEG 114.45	Error = 1.126243e-06	N = 125
LF = 2285.0	Hex 8edh	DEG 114.25	Error = 1.695550e-07	N = 126
LF = 2281.0	Hex 8e9h	DEG 114.05	Error = 1.396075e-06	N = 127
LF = 2277.0	Hex 8e5h	DEG 113.85	Error = 2.553748e-06	N = 128
LF = 2272.0	Hex 8e0h	DEG 113.60	Error = 1.917819e-06	N = 129
LF = 2268.0	Hex 8dch	DEG 113.40	Error = 9.134668e-07	N = 130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF = 2264.0	Hex 8d8h	DEG 113.20	Error = 2.345718e-08	N = 131
LF = 2260.0	Hex 8d4h	DEG 113.00	Error = 8.933962e-07	N = 132
LF = 2256.0	Hex 8d0h	DEG 112.80	Error = 1.696797e-06	N = 133
LF = 2252.0	Hex 8cch	DEG 112.60	Error = 2.434111e-06	N = 134
LF = 2247.0	Hex 8c7h	DEG 112.35	Error = 2.558993e-06	N = 135
LF = 2243.0	Hex 8c3h	DEG 112.15	Error = 1.968714e-06	N = 136
LF = 2239.0	Hex 8bfh	DEG 111.95	Error = 1.443038e-06	N = 137
LF = 2235.0	Hex 8bbh	DEG 111.75	Error = 9.815012e-07	N = 138
LF = 2231.0	Hex 8b7h	DEG 111.55	Error = 5.836360e-07	N = 139
LF = 2227.0	Hex 8b3h	DEG 111.35	Error = 2.489727e-07	N = 140
LF = 2223.0	Hex 8afh	DEG 111.15	Error = 2.296173e-08	N = 141
LF = 2219.0	Hex 8abh	DEG 110.95	Error = 2.326434e-07	N = 142
LF = 2215.0	Hex 8a7h	DEG 110.75	Error = 3.805514e-07	N = 143
LF = 2211.0	Hex 8a3h	DEG 110.55	Error = 4.671678e-07	N = 144
LF = 2207.0	Hex 89fh	DEG 110.35	Error = 4.929780e-07	N = 145
LF = 2203.0	Hex 89bh	DEG 110.15	Error = 4.584699e-07	N = 146
LF = 2199.0	Hex 897h	DEG 109.95	Error = 3.641345e-07	N = 147
LF = 2195.0	Hex 893h	DEG 109.75	Error = 2.104660e-07	N = 148
LF = 2191.0	Hex 88fh	DEG 109.55	Error = 2.039047e-09	N = 149
LF = 2187.0	Hex 88bh	DEG 109.35	Error = 2.728807e-07	N = 150
LF = 2183.0	Hex 887h	DEG 109.15	Error = 6.015566e-07	N = 151
LF = 2179.0	Hex 883h	DEG 108.95	Error = 9.875611e-07	N = 152
LF = 2175.0	Hex 87fh	DEG 108.75	Error = 1.430386e-06	N = 153
LF = 2171.0	Hex 87bh	DEG 108.55	Error = 1.929521e-06	N = 154
LF = 2167.0	Hex 877h	DEG 108.35	Error = 2.484452e-06	N = 155
LF = 2164.0	Hex 874h	DEG 108.20	Error = 2.885544e-06	N = 156
LF = 2160.0	Hex 870h	DEG 108.00	Error = 2.234215e-06	N = 157
LF = 2156.0	Hex 86ch	DEG 107.80	Error = 1.528516e-06	N = 158
LF = 2152.0	Hex 868h	DEG 107.60	Error = 7.689717e-07	N = 159
LF = 2148.0	Hex 864h	DEG 107.40	Error = 4.389196e-08	N = 160

LF = 2144.0	Hex 860h	DEG 107.20	Error = 9.095459e-07	N = 161
LF = 2140.0	Hex 85ch	DEG 107.00	Error = 1.827459e-06	N = 162
LF = 2136.0	Hex 858h	DEG 106.80	Error = 2.797096e-06	N = 163
LF = 2133.0	Hex 855h	DEG 106.65	Error = 2.264555e-06	N = 164
LF = 2129.0	Hex 851h	DEG 106.45	Error = 1.205692e-06	N = 165
LF = 2125.0	Hex 84dh	DEG 106.25	Error = 9.658637e-08	N = 166
LF = 2121.0	Hex 849h	DEG 106.05	Error = 1.062219e-06	N = 167
LF = 2117.0	Hex 845h	DEG 105.85	Error = 2.270177e-06	N = 168
LF = 2114.0	Hex 842h	DEG 105.70	Error = 2.614426e-06	N = 169
LF = 2110.0	Hex 83eh	DEG 105.50	Error = 1.321769e-06	N = 170
LF = 2106.0	Hex 83ah	DEG 105.30	Error = 1.852847e-08	N = 171
LF = 2102.0	Hex 836h	DEG 105.10	Error = 1.405912e-06	N = 172
LF = 2098.0	Hex 832h	DEG 104.90	Error = 2.839823e-06	N = 173
LF = 2095.0	Hex 82fh	DEG 104.75	Error = 1.877045e-06	N = 174
LF = 2091.0	Hex 82bh	DEG 104.55	Error = 3.630547e-07	N = 175
LF = 2087.0	Hex 827h	DEG 104.35	Error = 1.195921e-06	N = 176
LF = 2083.0	Hex 823h	DEG 104.15	Error = 2.799316e-06	N = 177
LF = 2080.0	Hex 820h	DEG 104.00	Error = 1.791828e-06	N = 178
LF = 2076.0	Hex 81ch	DEG 103.80	Error = 1.120643e-07	N = 179
LF = 2072.0	Hex 818h	DEG 103.60	Error = 1.610554e-06	N = 180
LF = 2069.0	Hex 815h	DEG 103.45	Error = 2.892205e-06	N = 181
LF = 2065.0	Hex 811h	DEG 103.25	Error = 1.095972e-06	N = 182
LF = 2061.0	Hex 80dh	DEG 103.05	Error = 7.415324e-07	N = 183
LF = 2057.0	Hex 809h	DEG 102.85	Error = 2.619731e-06	N = 184
LF = 2054.0	Hex 806h	DEG 102.70	Error = 1.767764e-06	N = 185
LF = 2050.0	Hex 802h	DEG 102.50	Error = 1.802499e-07	N = 186
LF = 2046.0	Hex 7feh	DEG 102.30	Error = 2.167355e-06	N = 187
LF = 2043.0	Hex 7fbh	DEG 102.15	Error = 2.139514e-06	N = 188
LF = 2039.0	Hex 7f7h	DEG 101.95	Error = 8.540996e-08	N = 189
LF = 2035.0	Hex 7f3h	DEG 101.75	Error = 2.006169e-06	N = 190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF = 2032.0	Hex 7f0h	DEG 101.60	Error = 2.223409e-06	N = 191
LF = 2028.0	Hex 7ech	DEG 101.40	Error = 6.767217e-08	N = 192
LF = 2024.0	Hex 7e8h	DEG 101.20	Error = 2.123909e-06	N = 193
LF = 2021.0	Hex 7e5h	DEG 101.05	Error = 2.031740e-06	N = 194
LF = 2017.0	Hex 7e1h	DEG 100.85	Error = 2.211339e-07	N = 195
LF = 2013.0	Hex 7ddh	DEG 100.65	Error = 2.508209e-06	N = 196
LF = 2010.0	Hex 7dah	DEG 100.50	Error = 1.576902e-06	N = 197
LF = 2006.0	Hex 7d6h	DEG 100.30	Error = 7.685788e-07	N = 198
LF = 2002.0	Hex 7d2h	DEG 100.10	Error = 3.146604e-06	N = 199
LF = 1999.0	Hex 7cfh	DEG 99.95	Error = 8.713835e-07	N = 200
LF = 1995.0	Hex 7cbh	DEG 99.75	Error = 1.562138e-06	N = 201
LF = 1992.0	Hex 7c8h	DEG 99.60	Error = 2.414925e-06	N = 202
LF = 1988.0	Hex 7c4h	DEG 99.40	Error = 7.223091e-08	N = 203
LF = 1984.0	Hex 7c0h	DEG 99.20	Error = 2.589196e-06	N = 204
LF = 1981.0	Hex 7bdh	DEG 99.05	Error = 1.326386e-06	N = 205
LF = 1977.0	Hex 7b9h	DEG 98.85	Error = 1.241271e-06	N = 206
LF = 1974.0	Hex 7b6h	DEG 98.70	Error = 2.636997e-06	N = 207
LF = 1970.0	Hex 7b2h	DEG 98.50	Error = 2.052869e-08	N = 208
LF = 1966.0	Hex 7aeh	DEG 98.30	Error = 2.622983e-06	N = 209
LF = 1963.0	Hex 7abh	DEG 98.15	Error = 1.199507e-06	N = 210
LF = 1959.0	Hex 7a7h	DEG 97.95	Error = 1.489844e-06	N = 211
LF = 1956.0	Hex 7a4h	DEG 97.80	Error = 2.298979e-06	N = 212
LF = 1952.0	Hex 7a0h	DEG 97.60	Error = 4.343100e-07	N = 213
LF = 1948.0	Hex 79ch	DEG 97.40	Error = 3.191851e-06	N = 214
LF = 1945.0	Hex 799h	DEG 97.25	Error = 5.469522e-07	N = 215
LF = 1941.0	Hex 795h	DEG 97.05	Error = 2.251529e-06	N = 216
LF = 1938.0	Hex 792h	DEG 96.90	Error = 1.457288e-06	N = 217
LF = 1934.0	Hex 78eh	DEG 96.70	Error = 1.380216e-06	N = 218
LF = 1931.0	Hex 78bh	DEG 96.55	Error = 2.300053e-06	N = 219
LF = 1927.0	Hex 787h	DEG 96.35	Error = 5.745523e-07	N = 220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF = 1924.0	Hex 784h	DEG 96.20	Error = 3.078614e-06	N = 221
LF = 1920.0	Hex 780h	DEG 96.00	Error = 1.688349e-07	N = 222
LF = 1916.0	Hex 77ch	DEG 95.80	Error = 2.760176e-06	N = 223
LF = 1913.0	Hex 779h	DEG 95.65	Error = 8.533259e-07	N = 224
LF = 1909.0	Hex 775h	DEG 95.45	Error = 2.107818e-06	N = 225
LF = 1906.0	Hex 772h	DEG 95.30	Error = 1.482310e-06	N = 226
LF = 1902.0	Hex 76eh	DEG 95.10	Error = 1.509027e-06	N = 227
LF = 1899.0	Hex 76bh	DEG 94.95	Error = 2.059186e-06	N = 228
LF = 1895.0	Hex 767h	DEG 94.75	Error = 9.603991e-07	N = 229
LF = 1892.0	Hex 764h	DEG 94.60	Error = 2.587358e-06	N = 230
LF = 1888.0	Hex 760h	DEG 94.40	Error = 4.585253e-07	N = 231
LF = 1885.0	Hex 75dh	DEG 94.25	Error = 3.070240e-06	N = 232
LF = 1881.0	Hex 759h	DEG 94.05	Error = 1.157809e-11	N = 233
LF = 1877.0	Hex 755h	DEG 93.85	Error = 3.083251e-06	N = 234
LF = 1874.0	Hex 752h	DEG 93.70	Error = 4.186346e-07	N = 235
LF = 1870.0	Hex 74eh	DEG 93.50	Error = 2.685896e-06	N = 236
LF = 1867.0	Hex 74bh	DEG 93.35	Error = 8.007731e-07	N = 237
LF = 1863.0	Hex 747h	DEG 93.15	Error = 2.323064e-06	N = 238
LF = 1860.0	Hex 744h	DEG 93.00	Error = 1.149862e-06	N = 239
LF = 1856.0	Hex 740h	DEG 92.80	Error = 1.991317e-06	N = 240
LF = 1853.0	Hex 73dh	DEG 92.65	Error = 1.469340e-06	N = 241
LF = 1849.0	Hex 739h	DEG 92.45	Error = 1.687213e-06	N = 242
LF = 1846.0	Hex 736h	DEG 92.30	Error = 1.762652e-06	N = 243
LF = 1842.0	Hex 732h	DEG 92.10	Error = 1.407305e-06	N = 244
LF = 1839.0	Hex 72fh	DEG 91.95	Error = 2.033246e-06	N = 245
LF = 1835.0	Hex 72bh	DEG 91.75	Error = 1.148144e-06	N = 246
LF = 1832.0	Hex 728h	DEG 91.60	Error = 2.284572e-06	N = 247
LF = 1828.0	Hex 724h	DEG 91.40	Error = 9.062764e-07	N = 248
LF = 1825.0	Hex 721h	DEG 91.25	Error = 2.520086e-06	N = 249
LF = 1821.0	Hex 71dh	DEG 91.05	Error = 6.782467e-07	N = 250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF = 1818.0	Hex 71ah	DEG 90.90	Error = 2.743244e-06	N = 251
LF = 1814.0	Hex 716h	DEG 90.70	Error = 4.605972e-07	N = 252
LF = 1811.0	Hex 713h	DEG 90.55	Error = 2.957504e-06	N = 253
LF = 1807.0	Hex 70fh	DEG 90.35	Error = 2.498687e-07	N = 254
LF = 1804.0	Hex 70ch	DEG 90.20	Error = 3.166325e-06	N = 255
LF = 1801.0	Hex 709h	DEG 90.05	Error = 6.582156e-06	N = 256



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมควบคุม

```

AFL EQU 0C8H ;VALUE OF INDITIAL CONDITION OF AFAR (LSB)
AFM EQU 07H ;VALUE OF INDITIAL CONDITION OF AFAR (MSB)
AAL EQU 4CH ;VALUE OF CNT.(1) AND CNT.(2) (LSB) [119 DEG.]
BBM EQU 09H ;VALUE OF CNT.(1) AND CNT.(2) (MSB) [119 DEG.]

;-----
; MAIN PROGAME
;-----

ORG 0000H
MOV A,#0BAH ;SET COUNTER 8253 (CNT.2)
MOV R0,#03H ;ADDRESS OF CONTROL WORD CNT.
MOV R1,#02H ;ADDRESS OF CNT.(2)
MOVX @R0,A
MOV A,#AAL
MOVX @R1,A
MOV A,#BBM
MOVX @R1,A
MOV A,#7AH ;SET COUNTER 8253 (CNT.1)
MOV R1,#01H ;ADDRESS OF CNT.(1)
MOVX @R0,A
MOV A,#AAL
MOVX @R1,A
MOV A,#BBM
MOVX @R1,A
MOV A,#3AH ;SET COUNTER 8253 (CNT.0)
MOV R1,#00H ;ADDRESS OF CNT.(0)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOVX @R0,A
MOV  A,#AFL
MOVX @R1,A
MOV  A,#AFM
MOVX @R1,A
MOV  R2,#202D      ;SET INDITAIL OF TABLE
CLR  P1.1          ;Reset Analog to Digital
MAIN: JB  P1.3,$    ;CHECK LEADING AGE OF INVERT VOLTAG
      JNB  P1.3,$
      MOV  C,P1.0    ;CHECK CURRENT THAT LEAD OR LAG WIDTH VOLTAG
      JB  P1.2,$    ;CHECK OEC OF A/D
      JNB  P1.2,$
      MOVX A,@R1    ;GET 8 BIT FO (I)
      JZ  MAIN      ;COMPARE (I) WITHD LIMIT
      MOV  R3,A     ;R3 IS CURRENT VALUE 8 BIT CURRENT
      MOV  A,R2     ;R2 IS OLD VALUE 8 BIT CURRENT
      JC  ILEAD
      JNC ILAG
WCNT: MOV  DPTR,#TABLE_1 ;WRIGHT TO CNT.
      MOV  A,R2
      MOVC A,@A+DPTR
      MOVX @R1,A
      MOV  DPTR,#TABLE_2
      MOV  A,R2
      MOVC A,@A+DPTR
      MOVX @R1,A
      LJMP MAIN
LOWERL: MOV  R2,#00H   ;LOWER LIMIT
      LJMP WCNT
UPERL:  MOV  R2,#0FFH ;UPER LIMIT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LJMP WCNT
ILEAD: CLR C ;COMPENSAT (I) LEADING
ADD A,R3
JC UPERL
MOV R2,A
LJMP WCNT
ILAG: CLR C ;COMPENSAT (I) LAGING
SUBB A,R3
JC LOWERL
MOV R2,A
LJMP WCNT
;-----
;***** TABEL_1 *****
;-----
TABLE_1: DB 01FH,0E0H,0B4H,090H,072H,057H,040H,02AH,016H,003H
DB 0F2H,0E1H,0D2H,0C3H,0B5H,0A7H,09AH,08DH,081H,075H
DB 06AH,05FH,054H,049H,03FH,035H,02BH,022H,018H,00FH
DB 006H,0FDH,0F5H,0ECH,0E4H,0DBH,0D3H,0CBH,0C4H,0BCH
DB 0B4H,0ADH,0A5H,09EH,097H,090H,089H,082H,07BH,074H
DB 06DH,067H,060H,05AH,053H,04DH,046H,040H,03AH,034H
DB 02EH,028H,022H,01CH,016H,010H,00BH,005H,0FFH,0F9H
DB 0F4H,0EEH,0E9H,0E3H,0DEH,0D9H,0D3H,0CEH,0C9H,0C3H
DB 0BEH,0B9H,0B4H,0AFH,0AAH,0A4H,09FH,09AH,095H,091H
DB 08CH,087H,082H,07DH,078H,073H,06FH,06AH,065H,060H
DB 05CH,057H,052H,04EH,049H,045H,040H,03CH,037H,033H
DB 02EH,02AH,025H,021H,01CH,018H,014H,00FH,00BH,007H
DB 002H,0FEH,0FAH,0F5H,0F1H,0EDH,0E9H,0E5H,0E0H,0DCH
DB 0D8H,0D4H,0D0H,0CCH,0C7H,0C3H,0BFH,0BBH,0B7H,0B3H
DB 0AFH,0ABH,0A7H,0A3H,09FH,09BH,097H,093H,08FH,08BH
DB 087H,083H,07FH,07BH,077H,074H,070H,06CH,068H,064H

```

DB 060H,05CH,058H,055H,051H,04DH,049H,045H,042H,03EH
 DB 03AH,036H,032H,02FH,02BH,027H,023H,020H,01CH,018H
 DB 015H,011H,00DH,009H,006H,002H,0FEH,0FBH,0F7H,0F3H
 DB 0F0H,0ECH,0E8H,0E5H,0E1H,0DDH,0DAH,0D6H,0D2H,0CFH
 DB 0CBH,0C8H,0C4H,0C0H,0BDH,0B9H,0B6H,0B2H,0AEH,0ABH
 DB 0A7H,0A4H,0A0H,09CH,099H,095H,092H,08EH,08BH,087H
 DB 084H,080H,07CH,079H,075H,072H,06EH,06BH,067H,064H
 DB 060H,05DH,059H,055H,052H,04EH,04BH,047H,044H,040H
 DB 03DH,039H,036H,032H,02FH,02BH,028H,024H,021H,01DH
 DB 01AH,016H,013H,00FH,00CH,009H

;------

;-***** TABLE_2 *****;-

;------

TABLE_2: DB 0DH,0CH,0CH,0CH,0CH,0CH,0CH,0CH,0CH,0CH
 DB 0BH,0BH,0BH,0BH,0BH,0BH,0BH,0BH,0BH,0BH
 DB 0BH,0BH,0BH,0BH,0BH,0BH,0BH,0BH,0BH,0BH
 DB 0BH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH
 DB 0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH
 DB 0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH
 DB 0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,0AH,09H,09H
 DB 09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H
 DB 09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H
 DB 09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H
 DB 09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H
 DB 09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H,09H
 DB 09H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H
 DB 08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H
 DB 08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H
 DB 08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H
 DB 08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H

DB 08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H,08H
 DB 08H,08H,08H,08H,08H,08H,07H,07H,07H,07H
 DB 07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H
 DB 07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H
 DB 07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H
 DB 07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H
 DB 07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H
 DB 07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H
 DB 07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H
 DB 07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H,07H

END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายศิริโชค ปริตโตทกพร เกิดวันที่ 13 ตุลาคม 2511 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ จบการศึกษาระดับปริญญาตรีในหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุมทางอุตสาหกรรม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ.2534 หลังจากนั้นได้ศึกษาต่อ และได้รับทุนการศึกษาจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปีการศึกษา 2536



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้