



ปีการศึกษา 2538

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต
(Static VAR Compensator)



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

อ.สมภาพ ผลไม้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2538

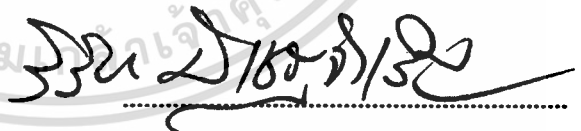
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

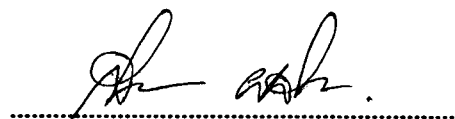
เรื่อง ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต

ผู้จัดทำ

- 
1. นายประชาชัย วิไลลักษณ์
 2. นายวิชาญ สุขจิตเกษม
 3. นายกอบชัย ลาตราภัย



(รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ)



(อ. สมภพ ผลไม้)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต (Static VAR Compensator)

นายประชาชัย	วิไลลักษณ์	
นายวิชาญ	ศุภจิตเกษม	
นายกอบชัย	สาตราภัย	
รศ.ดร. วิริยะ	พิเชษฐาเริญ	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. สมภพ	ผลไม้	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2538		

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาและพัฒนาตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและชดเชยโหลดไม่สมดุลให้ระบบไฟฟ้ากำลัง มีส่วนประกอบหลักคือ รีแอกเตอร์แบบปรับค่าได้โดยใช้ไครซิสเตอร์ทำหน้าที่ปรับค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุค่าคงที่ การควบคุมใช้คอมพิวเตอร์คำนวณมุมนำกระแสของไครซิสเตอร์จากค่าความนำจินตภาพที่ต้องชดเชย ซึ่งค่าความนำจินตภาพนี้คำนวณจากค่าแรงดันสายสามเฟสและกระแสสายสามเฟส ข้อมูลแรงดันสายและกระแสสายใช้หม้อแปลงแรงดันและหม้อแปลงกระแสวัดจากระบบไฟฟ้า แล้วแปลงข้อมูลอะนาลอกเป็นข้อมูลดิจิทัลโดยใช้วงจร pci-818 ประมวลผลข้อมูลที่ได้โดยการแปลงฟาสต์-ฟูริเยอร์ (FFT) ทำให้ได้ขนาดและมุมของแรงดันสายและกระแสสาย

จากการทดลองสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ตามที่โหลดต้องการ ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าสูงขึ้น กระแสสายทั้งสามเฟสสมดุลกัน และโหลดแรกถูกละทิ้งของโหลดคี่ขึ้น

Static VAR Compensator

Prachachai Wilailuk

Wichan Soopajitkasem

Kobchai Sartrapai

Assoc.Prof.Dr.Viriya Pichetchumroen Advisor

Mr. Sompob Polmai Advisor

1995

Abstract

This project concerns the reactive power compensator for power systems and three-phase load balancing. The compensator consists of the thyristor-controlled reactor (TCR) with fixed capacitor. The reactive power injected into the power system by compensator is continuously controlled by computer adjusting the thyristor firing angle in TCR, result in a changing of the current in coupled reactors. Computer numerical method used for calculating the thyristor conducted angle from compensated susceptance. The system susceptance is calculated from three phases line voltage and line current which measured by potential transformer (PT) and current transformer(CT), then converted to raw digital data by A/D card (pcl-818 card). The project uses fast fourier transform(FFT) to process raw digital data to magnitude and phase angle of three phases line current and voltage for compensated susceptance calculation.

Finally the experiment was setup and experimental shows that the compensator can compensate load reactive power according to compensator strategy. The power factor is pulled up, three phases line current are balance and the voltage regulation is developed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 จุดประสงค์ของการชดเชยค่าโหลด	1
1.2 การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	1
1.2.1 ประโยชน์ของการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	2
1.2.2 วิธีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	4
1.2.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	5
1.2.4 ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์	6
1.3 การแก้ไขค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดัน	8
1.4 การทำสมดุล โหลด	8
บทที่ 2 หลักการของการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	10
2.1 การทำสมดุลสามเฟสและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของโหลดไม่สมดุล	10
2.1.1 วงจรความน่าเชื่อถือของการชดเชย	10
2.1.2 การชดเชยโหลดในทอมของส่วนประกอบสมมาตร	19
บทที่ 3 หลักการของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต	29
3.1 การใช้งานตัวชดเชยโหลด (Compensator)	29
3.1.1 คุณสมบัติของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	30
3.1.2 ชนิดของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้า	31
3.2 ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์	33
3.2.1 หลักการทำงาน	33
3.2.2 ลักษณะแรงดัน/กระแส	37
3.2.3 ฮาร์โมนิกส์	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4	ตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยโรติสเตอร์	43
3.2.5	ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์ที่มี ตัวเก็บประจุต่อขนาน	43
3.2.6	การควบคุม	47
3.2.7	ลักษณะอื่นๆของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์	52
บทที่ 4	ระบบควบคุมการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต	56
4.1	การทำงานของระบบควบคุม	56
4.2	วงจรวัดกระแสและแรงดันจากสายส่ง	60
4.2.1	วงจรวัดกระแส	60
4.2.2	วงจรวัดแรงดัน	61
4.3	วงจรถริกโรติสเตอร์	62
4.4	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุม	70
4.5	การออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิกส์	73
บทที่ 5	ผลการทดลอง	81
บทที่ 6	บทวิจารณ์และสรุปผล	90
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก	ส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Component)	
ภาคผนวก ข	การแปลงฟูริเยอร์ (Fourier Transform)	
ภาคผนวก ค	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	
ภาคผนวก ง	โปรแกรมควบคุมการทำงาน	
กิตติกรรมประกาศ		
เอกสารอ้างอิง		

III

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 1.1	แผนภาพเฟสเซอร์ของกำลังไฟฟ้า	2
รูปที่ 1.2	ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต	7
รูปที่ 2.1	(ก) โหลดสามเฟสไม่สมดุล	11
	(ข) การต่อความนำจินตภาพเพื่อแก้ค่าตัวประกอบกำลังในแต่ละเฟส	11
	(ค) โหลดลัพธ์ที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็น 1	11
รูปที่ 2.2	เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงแรงดันและกระแส	12
รูปที่ 2.3	(ก) โหลด 1 เฟสตัวประกอบกำลังเป็น 1 ก่อนที่จะทำการสมดุลลำดับเฟสบวก	15
	(ข) การทำสมดุลลำดับเฟสบวกของโหลด 1 เฟสตัวประกอบกำลังเป็น 1	15
	(ค) วงจรสมมูลลำดับเฟสบวกของโหลด 1 เฟสที่ถูกปรับปรุงแล้ว	15
รูปที่ 2.4	เฟสเซอร์แสดงให้เห็นว่า การทำสมดุลโหลดขึ้นอยู่กัลำดับเฟส	16
	(ก) เฟสเซอร์ไดอะแกรม กรณีลำดับเฟสบวก	16
	(ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรม กรณีลำดับเฟสลบ	16
รูปที่ 2.5	(ก) การต่อวงจรเพื่อปรับปรุง โหลดสามเฟส กรณีแรงดันลำดับเฟสบวก	18
	(ข) วงจรสมมูลหลังจากปรับปรุงโหลดแล้ว	18
รูปที่ 2.6	แสดงการไหลของกระแสสายและกระแสเฟส	20
รูปที่ 3.1	ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิตในทางอุดมคติ	30
รูปที่ 3.2	วันไลน์ไดอะแกรมของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไธริสเตอร์ ซึ่งต่อขนานกับตัวเก็บประจุ	32
รูปที่ 3.3	วันไลน์ไดอะแกรมของตัวชดเชยแบบไธริสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ	32
รูปที่ 3.4	วันไลน์ไดอะแกรมของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์อิมิตัวซึ่ง มีตัวเก็บประจุขนานทำหน้าที่ปรับค่าความชัน	32
รูปที่ 3.5	ส่วนต่างๆของรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไธริสเตอร์	33
รูปที่ 3.6	รูปคลื่นกระแสสายและกระแสเฟส เมื่อต่อตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ ควบคุมด้วยไธริสเตอร์แบบเคลตา	34
รูปที่ 3.7	กฎการควบคุมของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไธริสเตอร์	37
รูปที่ 3.8	กราฟลักษณะแรงดัน/กระแสหลักมูลในตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์	

IV

รูปที่ 3.9	ฮาร์โมนิกส์ของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์	39
	(ก) ส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกส์หลัก	39
	(ข) ผลรวมของส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกส์	39
รูปที่ 3.10	ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์ 3 เฟสที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ และมีการแยกรีแอกเตอร์ของแต่ละเฟสออกเป็น 2 ส่วน	41
รูปที่ 3.11	ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์ที่มีมุมช่วงนำกระแสในแต่ละขามากกว่า 180° เพื่อลดกระแสฮาร์โมนิกส์	41
รูปที่ 3.12	การจัดเรียงตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์เป็นแบบ 12-พัลส์ โดยใช้หม้อแปลงที่มีขดลวดทุกขดมี 2 ชุด	42
รูปที่ 3.13	การเรียงสลับกันของตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยโรริสเตอร์	44
	(ก) รีแอกเตอร์ที่ต่อกันแบบวายและโรริสเตอร์ควบคุมที่ต่อแบบเคลตา	44
	(ข) รีแอกเตอร์และโรริสเตอร์ควบคุมที่ต่อกันแบบวาย	44
รูปที่ 3.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของตัวชดเชย	45
รูปที่ 3.15	ตัวชดเชยแบบไฮบริดที่มีการสวิตช์ตัวต่อตัวเก็บประจุและปรับรีแอกเตอร์ด้วยโรริสเตอร์	46
รูปที่ 3.16	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุม	47
	(ก) การควบคุมแบบวงปิด	47
	(ข) การควบคุมแบบวงเปิด	47
รูปที่ 3.17	การควบคุมตัวชดเชยแบบวงเปิด	49
รูปที่ 3.18	บล็อกไดอะแกรมของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์	50
รูปที่ 3.19	ตัวชดเชยที่มีโวลเตจเรกกูเลเตอร์	50
รูปที่ 3.20	ตัวชดเชยที่มีโวลเตจเรกกูเลเตอร์และเรกกูเลเตอร์ของกระแส	51
รูปที่ 3.21	การควบคุมแบบรวมการควบคุมแบบวงปิดและวงเปิดเข้าด้วยกัน	52
รูปที่ 3.22	ลักษณะกราฟของกำลังงานสูญเสียของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์แบบซึ่งมีตัวเก็บประจุต่อขนานและตัวกรองฮาร์โมนิกส์	54
รูปที่ 3.23	ลักษณะกราฟของกำลังงานสูญเสียของตัวชดเชยแบบโรริสเตอร์ตัวต่อตัวเก็บประจุ	55
รูปที่ 4.1	แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุม	57
รูปที่ 4.2	แสดงเฟสเซอร์ของแรงดันและกระแส	59
รูปที่ 4.3	วงจรวัดกระแส	61

รูปที่ 4.4	วงจรวัดแรงดัน	62
รูปที่ 4.5	วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอะนาลอก	63
รูปที่ 4.6	แสดงสัญญาณของ TCA 785	64
รูปที่ 4.7	วงจรทรานซิสเตอร์	66
รูปที่ 4.8	ภาพแสดงอุปกรณ์และการต่อวงจร	67
รูปที่ 4.9	แผ่นวงจรพิมพ์ด้านบน	68
รูปที่ 4.10	แผ่นวงจรพิมพ์ด้านล่าง	69
รูปที่ 4.11	แผนภาพการทำงานของโปรแกรมควบคุมตัวชดเชย	70
รูปที่ 4.12	หน้าจอแสดงผลหลัก	71
รูปที่ 4.13	หน้าจอแสดงรูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมขยายแต่ละเฟส	72
รูปที่ 4.14	หน้าจอแสดงแนวโน้มของค่าตัวประกอบกำลัง	72
รูปที่ 4.15	รูปสมมติของวงจรกรองความถี่	75
รูปที่ 4.16	วงจรกรองฮาร์โมนิกส์	76
รูปที่ 4.17	แสดงอัตราขยายที่ความถี่ต่างๆ	79
รูปที่ 5.1	กราฟแสดงขนาดของแรงดันระหว่างสาย กรณีโหลดสมดุล	85
รูปที่ 5.2	กราฟแสดงขนาดของกระแสสายเข้าระบบ กรณีโหลดสมดุล	85
รูปที่ 5.3	กราฟแสดงค่าตัวประกอบกำลัง กรณีโหลดสมดุล	86
รูปที่ 5.4	กราฟแสดงขนาดของแรงดันระหว่างสาย กรณีโหลดโหลดไฟ 1 เฟส	86
รูปที่ 5.5	กราฟแสดงขนาดของกระแสสายเข้าระบบ กรณีโหลดโหลดไฟ 1 เฟส	87
รูปที่ 5.6	กราฟแสดงค่าตัวประกอบกำลัง กรณีโหลดโหลดไฟ 1 เฟส	87
รูปที่ 5.7	กราฟแสดงขนาดของแรงดันระหว่างสาย กรณีโหลดโหลดไฟ 2 เฟส	88
รูปที่ 5.8	กราฟแสดงขนาดของกระแสสายเข้าระบบ กรณีโหลดโหลดไฟ 2 เฟส	88
รูปที่ 5.9	กราฟแสดงค่าตัวประกอบกำลัง กรณีโหลดโหลดไฟ 2 เฟส	89

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 3.1 ขนาดสูงสุดของกระแสในตัวขดเซยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์	40
ตาราง 5.1 ตารางแสดงผลการทดลองจ่ายโหลดผสมคูล	82
ตาราง 5.2 ตารางแสดงผลการทดลองจ่ายโหลดไม่ผสมคูล 1 เฟส	83
ตาราง 5.3 ตารางแสดงผลการทดลองจ่ายโหลดไม่ผสมคูล 2 เฟส	84



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการสูญเสียพลังงานไฟฟ้านับเป็นปัญหาที่สำคัญ สาเหตุประการหนึ่งเกิดจากค่าตัวประกอบกำลังต่ำ ซึ่งเกิดจากโหลดที่ต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยเฉพาะโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทำได้ยาก และต้องการระบบตัวชดเชยที่สามารถปรับการชดเชยได้ทุกสภาวะโหลด

1.1 จุดประสงค์ของการชดเชยค่าโหลด

การชดเชยค่าโหลด (Load Compensation) เป็นการจัดการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) เพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีจุดมุ่งหมายที่สำคัญ คือ

1. การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor)
2. การแก้ไขค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Voltage Regulation)
3. การทำสมดุลโหลด (Load Balancing)

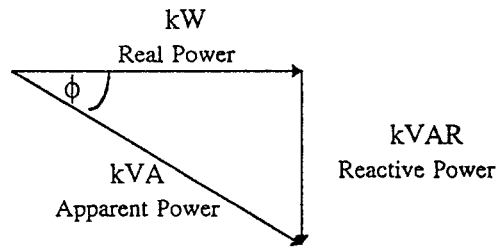
1.2 การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

กำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่างๆ สามารถแยกเป็น 2 ส่วน คือ

- กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริง เช่น เปลี่ยนเป็นความร้อน แสงสว่าง หรือขับเคลื่อนเครื่องจักรกลต่างๆ มีหน่วยเป็น วัตต์(Watt) หรือ กิโลวัตต์

- กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กในอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็ก เช่น หม้อแปลง มอเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำ (coil) ต่างๆ มีหน่วยเป็น วาร์(VAR) หรือ กิโลวาร์

กำลังไฟฟ้าทั้งสองส่วนสามารถรวมเข้าด้วยกันทางเฟสเซอร์ (Phasor) เป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) มีหน่วยเป็น โวลต์แอมป์ (VA) หรือ กิโลโวลต์-แอมป์ ดังรูป



รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ (phasor diagram) ของกำลังไฟฟ้า

$$kVA = \sqrt{(kW)^2 + (kVAR)^2} \quad \text{..... (1.1)}$$

ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) คำนวณได้จากสูตร

$$\cos \phi = \frac{kW}{\sqrt{(kW)^2 + (kVAR)^2}} \quad \text{..... (1.2)}$$

เนื่องจากโหลดในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีตัวประกอบกำลังตามหลัง (lagging) กล่าวคือจะรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนั้นกระแสโหลดจะมีค่ามากขึ้นกว่าที่ต้องการ กำลังไฟฟ้าจริงจากแหล่งจ่ายเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้กำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้นที่ใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ส่วนกระแสโหลดส่วนเกินจะเป็นส่วนที่สูญเปล่า ซึ่งไม่เพียงแต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการใช้สายที่มีขนาดใหญ่แต่ยังเกิดความสูญเสียในรูปพลังงานความร้อนที่สายอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพิ่มเติมจากการจ่ายไฟของการไฟฟ้า ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (1.2) จะพบว่าเมื่อมีการใช้กำลังรีแอกทีฟจากการไฟฟ้าลดลงจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลัง ($\cos \phi$) สูงขึ้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟก็คือ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ซึ่งตัวของมันเองต้องการกำลังไฟฟ้าจริง (kW) เป็นจำนวนน้อยมาก โดยจะทำการควบคุมให้ตัวเก็บประจุจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟใกล้เคียงกับที่ โหลดต้องการจนทำให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียง 1 (unity power factor)

1.2.1 ประโยชน์ของการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

1. ระบบไฟฟ้าสามารถรับโหลดได้เพิ่มขึ้น เมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบให้สูงขึ้นแล้ว จะทำให้กระแสของระบบลดลง นั่นคือกำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดรวมลดลง ทำให้ระบบสามารถจ่ายโหลดได้มากขึ้น

2. แรงดันไฟฟ้าของระบบดีขึ้น จากสูตรแรงดันตกระหว่างสาย (ΔV) ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส

$$\Delta V = \sqrt{3}I(R \cos\phi + X \sin\phi) \quad \text{..... (1.3)}$$

โดยที่ I = กระแสสาย (line current) [A]
 R = ความต้านทาน (resistance)[Ω]
 X = รีแอกแตนซ์ (reactance) [Ω]
 ϕ = มุมกำลัง(power angle)

เมื่อปรับปรุงให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้น ทำให้กระแสลดลง และมุมกำลัง (ϕ) ลดลง ส่งผลให้แรงดันตกระหว่างสายน้อยลง

3. แรงดันตกในหม้อแปลงลดลง จากสูตร

$$\%V = \frac{\text{rated } kVAR_{Cap} \times \%U_{kTr}}{\text{rated } kVA_{Tr}} \quad \text{..... (1.4)}$$

เมื่อค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (%V) เพิ่มขึ้น

4. กำลังสูญเสียของระบบลดลง เนื่องจากกำลังสูญเสียในสายตัวนำไฟฟ้าของระบบเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของกระแส เมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นจะทำให้กระแสลดลง ดังนั้นกำลังสูญเสียจึงเป็นสัดส่วนกลับกับค่าตัวประกอบกำลังกำลังสอง

$$\%Power Loss = \left| \frac{P.F.1}{P.F.2} \right|^2 \times 100\%$$

$$\%\Delta Power Loss = \left(1 - \left| \frac{P.F.1}{P.F.2} \right|^2 \right) \times 100\% \quad \text{..... (1.5)}$$

$$(Power Loss 2) = (Power Loss 1) \times \left(1 - \left| \frac{P.F.1}{P.F.2} \right|^2 \right)$$

เมื่อ P.F.1 = ค่าตัวประกอบกำลังก่อนทำการปรับปรุง

P.F.2 = ค่าตัวประกอบกำลังหลังทำการปรับปรุง

Power Loss 1 = กำลังไฟฟ้าสูญเสียก่อนทำการปรับปรุง

Power Loss 2 = กำลังไฟฟ้าสูญเสียหลังทำการปรับปรุง

ระบบ 3 เฟส กำลังสูญเสียในสายไฟฟ้า = $3I^2R$

ดังนั้นเมื่อกระแสลดลง ทำให้กำลังสูญเสียในสายลดลงด้วย

5. กำลังสูญเสียในหม้อแปลงลดลง กำลังสูญเสียในหม้อแปลงประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก และกำลังสูญเสียในลวดทองแดง (copper loss) ซึ่งกำลังสูญเสียในลวดทองแดงนี้จะแปรผันตามกระแสกำลังสอง เมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นแล้ว กระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงจะลดลง ทำให้กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดทองแดงลดลง

6. ลดค่าไฟฟ้า ถ้าสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงกว่า 0.85 ได้ จะลดค่าภาระกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kVAR Charge) จากการไฟฟ้า

1.2.2 วิธีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (ตำแหน่งที่ติดตั้งตัวเก็บประจุ)

ตำแหน่งที่ติดตั้งตัวเก็บประจุที่ใช้แก้ค่าตัวประกอบกำลังที่ได้ผลมากที่สุด และลดการสูญเสียมากที่สุดคือทำการติดตั้งที่ตัวโหลดและใกล้โหลดมากที่สุด แต่ในทางปฏิบัติมักทำเช่นนี้ไม่ได้ทุกกรณี จึงมีการติดตั้งตัวเก็บประจุไว้ที่ตำแหน่งต่างๆตามลักษณะของโหลดดังนี้

1. ปรับปรุงที่ตัวอุปกรณ์ (Individual Compensation) นิยมใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟค่อนข้างสูง มีขนาดค่อนข้างแน่นอน และมีชั่วโมงการทำงานสูงๆ เช่น หม้อแปลง มอเตอร์ที่เดินตลอดเวลา

2. การปรับปรุงเป็นกลุ่ม (Group Compensation) ใช้สำหรับกลุ่มโหลดที่ทำงานพร้อมกัน โดยจะต่อตัวเก็บประจุตัวเดียวเข้าไปพร้อมกับกลุ่มโหลด เช่น กลุ่มมอเตอร์เล็กๆที่ทำงานพร้อมกันหลายๆตัว

3. การปรับปรุงรวม (Central Compensation) ใช้สำหรับโรงงานใหญ่ๆที่มีโหลดขนาดต่างๆกันเป็นจำนวนมาก โดยใช้ตัวเก็บประจุหลายๆตัวต่อผ่านไกสั้มัสแม่เหล็ก (Magnetic Contactor) เข้ากับแผงสวิตช์จ่ายไฟใหญ่ แล้วควบคุมโดยใช้มือกดหรือใช้แบบอัตโนมัติ ที่ใช้รีเลย์ควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor Relay , PFR) เป็นตัวสั่งให้สับตัวเก็บประจุเข้าหรือปลดออก

4. การปรับปรุงแบบผสม ใช้การปรับปรุงแบบที่ 1 ถึง 3 รวมกัน เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดในการควบคุม PF ของระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

5. การปรับปรุงตามระดับแรงดัน ใช้กับโรงงานขนาดใหญ่ๆที่มีการใช้ไฟหลายระดับแรงดันไฟฟ้าทั้งแรงสูงและแรงต่ำ เช่น โรงงานปูนซีเมนต์

1.2.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการปรับปรุ่ค่าตัวประกอบกำลังของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

1. การปรับปรุ่ค่าตัวประกอบกำลังสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า

ถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับหม้อแปลง เมื่อปลดโหลดส่วนใหญ่ออก โดยที่ยังต่อตัวเก็บประจุเอาไว้ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของทั้งระบบมีค่าสูงขึ้นมาก ซึ่งมีผลเสีย คือ

1. เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์บางอย่าง โดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพราะแรงดันสูงเกินพิกัดที่ทนได้
2. อาจเกิดเรโซแนนซ์ (resonance) ระหว่างตัวเก็บประจุกับหม้อแปลง
3. แกนเหล็กของหม้อแปลงอาจเกิดการอิ่มตัว ทำให้มีฮาร์โมนิกส์ออกมาสู่ระบบ

วิธีแก้ปัญหา

1. ถ้าจะต่อตัวเก็บประจุทิ้งไว้กับหม้อแปลงตลอดเวลาต้องเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาด

$$kVAR_{Cap} \leq 0.1kVA_{Tr}$$

เมื่อ $kVAR_{Cap}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ

kVA_{Tr} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของหม้อแปลง

2. มีวงจรควบคุมการต่อเข้าและปลดออกพร้อมกับโหลดตัวใหญ่ที่ทำงานนานกว่าโหลดตัวอื่น
3. ใช้การควบคุมตัวเก็บประจุแบบอัตโนมัติ (Automatic Capacitor Bank)

2. การปรับปรุ่ค่าตัวประกอบกำลังสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor)

ถ้ามีการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบที่ติดตั้งชุดเริ่มเดินเครื่อง (starter) จะมีโอกาสที่จะเกิดปัญหาได้หลายอย่าง เช่น

1. เกิดแรงดันเกิน (Overvoltage) สูงมาก ทำให้มอเตอร์ ตัวเก็บประจุ รวมทั้งอุปกรณ์อื่นๆเสียหายได้
2. เกิดเรโซแนนซ์ระหว่างมอเตอร์กับตัวเก็บประจุ
3. มอเตอร์เกิดการเบรคอย่างรุนแรง ขณะที่ปลดชุดเริ่มเดินเครื่องออกจากวงจร
4. มอเตอร์ไหม้ถ้าไม่ได้ปรับรีเลย์โหลดเกิน (Overload Relay) ลง
5. ตัวเก็บประจุเสียหายถ้ามอเตอร์ถูกสตาร์ทซ้ำๆกันหลายครั้ง

การแก้ปัญหา

1. เลือกขนาดตัวเก็บประจุที่มีพิกัดกระแสไม่เกิน 90% ของกระแสมอเตอร์ ขณะเดินตัวเปล่า (No-load Current)
 2. ควรมีไกสั้มผัสแม่เหล็ก สำหรับแยกตัวเก็บประจุออกทันทีที่ชุดเริ่มเดินเครื่องถูกปลดออกจากวงจร
 3. มีการหน่วงเวลาให้ตัวเก็บประจุต่อเข้า หลังจากเริ่มเดินมอเตอร์เรียบร้อยแล้ว
3. การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังสำหรับโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นบางครั้ง

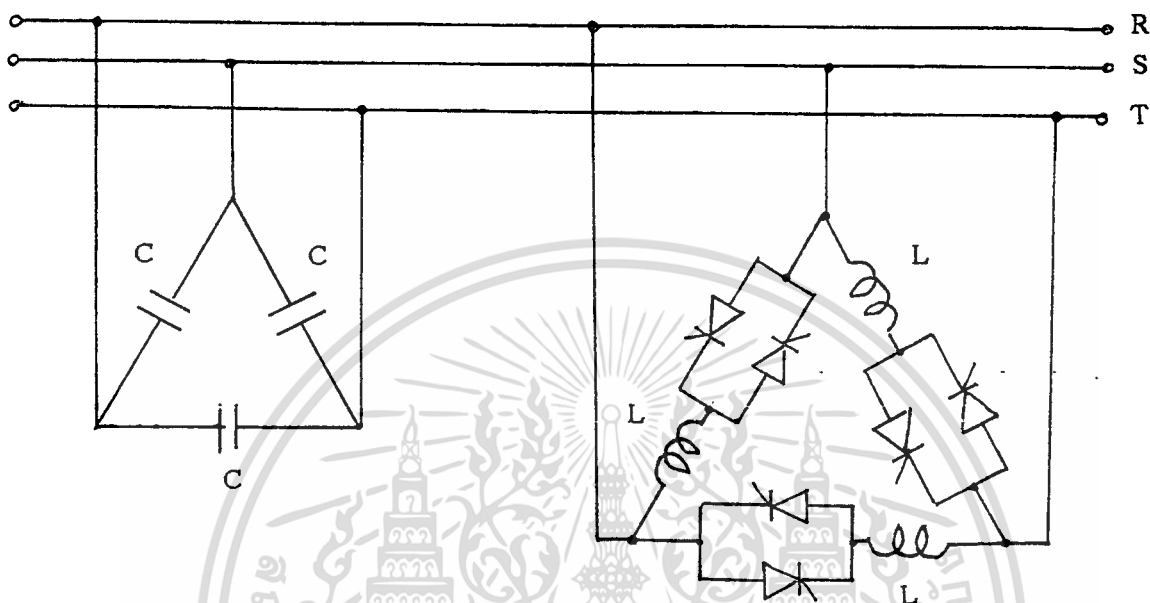
กราว

- ควรติดตั้งเป็นแบบควบคุมตัวเก็บประจุอัตโนมัติ (automatic capacitor bank) โดยจะต้องสามารถควบคุมให้จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟตามความต้องการของโหลดได้ดี นอกจากนี้การต่อตัวเก็บประจุเข้าไปจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบมีค่าสูงขึ้นกว่าเดิม ถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เกินไปจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเกิน 1% ก็จะทำให้มีปัญหาขึ้นได้ ดังนั้นจึงต้องแบ่งตัวเก็บประจุออกเป็นหลายสเต็ป (step) เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันทีละน้อย
- ส่วนประกอบของระบบควบคุมตัวเก็บประจุแบบอัตโนมัติ
 1. ตัวเก็บประจุหลายตัวต่อขนานกัน
 2. รีเลย์ควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor Control Relay)
 3. คอนแทคเตอร์ (Contactor)
 4. ฟิวส์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์

1.2.4 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์

จากปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการใช้ตัวเก็บประจุปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังทำให้เราจำเป็นต้องควบคุมให้ตัวเก็บประจุจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับโหลดจนมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียง 1 มากที่สุด นอกจากนี้ถ้าจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเกินจากความต้องการของโหลดจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเกินจากปกติ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายหลายประการดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจะต้องไม่ต่อตัวเก็บประจุเข้าไปเกินความต้องการ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องใช้การควบคุมตัวเก็บประจุแบบอัตโนมัติ (automatic capacitor bank) แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อเสียคือ ถ้าโหลดมีการเปลี่ยนแปลงบ่อยๆจะมีการสับตัวเก็บประจุเข้าออกบ่อยๆ ซึ่งส่งผลให้ไกสั้มผัสแม่เหล็กต้องทำงานหนัก

จากสาเหตุดังกล่าวข้างต้น เราอาจแก้ปัญหาไม่ให้มีการตัดต่อตัวเก็บประจุเข้าออกบ่อยๆ โดยใช้หลักการของรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Reactors , TCRs) ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต (Static Var Compensator)

ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (fixed capacitor) และส่วนรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ โดยตัวเก็บประจุจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้พอเพียงกับความต้องการของโหลด และชุดรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ จะต้องครอบคลุมค่าแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ (Q_C) กับค่า กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดรับเข้าไปจริง [$q_{load}(t)$] ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ [$Q_C - q_{load}(t)$] จะไหลเวียนระหว่างตัวเก็บประจุกับรีแอกเตอร์ (X_L) แต่กระแสที่เกิดจากการควบคุมของชุดรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์จะทำให้ส่วนประกอบฮาร์โมนิกต่างๆมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลเสียต่ออุปกรณ์และระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีตัวกรองฮาร์โมนิกส์ (harmonic filter) ที่เกิดขึ้นนี้

ในการควบคุมให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามที่โหลดต้องการจะใช้การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (inductor, L) ให้ได้ค่าที่ทำให้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวมของตัวชดเชยมีค่าเท่ากับความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลด ในการควบคุมกระแสดังกล่าวนี้อาจควบคุมจากมุมทริก (Trig) ไทรสเตอร์ซึ่งเมื่อมุมนำกระแสของไทรสเตอร์เปลี่ยนไปจะทำให้ค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเปลี่ยนไป เสมือนกับเป็นรีแอกเตอร์ที่ควบคุมค่ารีแอกแทนซ์ได้ ด้วยเหตุนี้เราจึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบโดยการควบคุมมุมทริกไทรสเตอร์

1.3 การแก้ไขค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Voltage Regulation)

โหลดทุกชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลทำให้เปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่จุดต่อกับแหล่งจ่าย (regulation) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของเครื่องจักรไฟฟ้าของผู้รับไฟจากการไฟฟ้าคนอื่น เพื่อที่จะป้องกันเหตุการณ์เช่นนี้ทางการไฟฟ้าจึงออกกฎข้อบังคับให้ผู้ใช้ไฟฟ้ารักษาระดับแรงดันภายในขีดจำกัดที่กำหนด (ขีดจำกัดนี้อาจมีค่าประมาณ $\pm 5\%$ ของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย) การเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างรวดเร็วจะทำให้แรงดันลดลง และเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ป้องกันระบบ (protective equipment) ด้วยเหตุดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์แก้ไขการเปลี่ยนแปลงแรงดัน เพื่อที่จะช่วยรักษาระดับแรงดันของแหล่งจ่ายให้อยู่ในขีดจำกัดที่ต้องการ

วิธีที่เห็นเด่นชัดที่สุดในการแก้ไขการเปลี่ยนแปลงแรงดันก็คือการทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมั่นคงขึ้นโดยการเพิ่มขนาดและจำนวนของหน่วยผลิตไฟฟ้า (generation units) หรือสร้างระบบเครือข่ายที่ต่อเชื่อมกันให้หนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่วิธีดังกล่าวนี้เป็นวิธีที่ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และอาจนำไปสู่ปัญหาเกี่ยวกับระดับฟอลต์ที่รุนแรง (high fault levels) และพิกัดของสวิตช์เกียร์ (switchgear rating) ที่จะต้องสูงขึ้น สำหรับวิธีที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติและคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ก็คือควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังตามค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด และจัดการกับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยใช้ตัวชดเชยและอุปกรณ์อื่นๆที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้รวดเร็วกว่าหน่วยผลิตไฟฟ้าและไม่ก่อให้เกิดฟอลต์

1.4 การทำสมดุลโหลด

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังกระแสสลับทั้งหมดเป็นระบบ 3 เฟส และถูกออกแบบมาสำหรับทำงานที่สมดุล 3 เฟส เนื่องจากการทำงานในขณะที่ระบบไม่สมดุลจะทำให้กระแสในลำดับเฟสอื่น (ลำดับเฟสศูนย์ และ ลำดับเฟสลบ) มีค่าสูงขึ้น และอาจก่อให้เกิดเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ได้ เช่น

- ความสูญเสียในมอเตอร์ และหน่วยผลิต
- การแกว่งของแรงบิด (oscillating torque) ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ
- การกระเพื่อม (ripple) ที่เพิ่มขึ้นในตัวเรียงกระแส (rectifiers)
- การปฏิบัติงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ต่างๆ
- การอิมตัวของหม้อแปลง
- เกิดกระแสไหลในนิวทรัล (neutral current) ที่สภาวะโหลดสมดุล

- เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

ส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ในรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันเป็นพหุนามที่ค่าสำคัญที่แสดงถึงคุณภาพของแหล่งจ่าย ส่วนที่สร้างปัญหาคือสเปกตรัมที่มีความถี่สูงกว่าความถี่หลักมูล (fundamental frequency) เท่านั้น นอกเหนือจากฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากโหลดไม่สมดุลแล้ว ตัวชดเชยบางแบบ เช่น ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์ยังก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์เข้ามาในระบบไฟฟ้าซึ่งจะต้องทำการกำจัดโดยใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Filter)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการของการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

2.1 การทำสมดุลสามเฟสและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของโหลดไม่สมดุล

ตัวชดเชย (compensator) ในอุดมคติที่ใช้เป็นตัวปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง หรือ โวลเตจเร็กกูเลชัน (voltage regulation) นั้น มีรูปแบบเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ควบคุมได้ หรือเป็นอุปกรณ์รีแอกทีฟ (reactive device) ที่คอยควบคุมแรงดันให้คงที่ แม้ว่ารูปแบบของตัวชดเชยจะคว่ำสมดุล แต่อาจจะมีเฟสไคเฟสหนึ่งที่จ่ายกระแสสูงกว่าเฟสอื่น เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์โหลดไม่สมดุล เราจะกำหนดทั้งโหลดและตัวชดเชยในเทอมของความนำเชิงซ้อน (admittances) และความต้านทานเชิงซ้อน (impedances) และการวิเคราะห์จะต้องรวมการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไปด้วย เพื่อที่จะให้ใกล้เคียงความจริงยิ่งขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์สมดุลระหว่างเฟสและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไปพร้อมๆกันในเทอมของความนำเชิงซ้อนของโหลดและตัวชดเชยจะทำให้มองเห็นถึงพื้นฐานในการปรับปรุงโหลดได้ดีขึ้น

2.1.1 วงจรความนำเชิงซ้อนของการชดเชย

สมมุติว่าแหล่งจ่ายแรงดัน (Supply Voltage) สมดุล และให้โหลดต่อกันแบบเดลตา (Δ) ดังรูปที่ 2.1ก โดยมีค่าความนำเชิงซ้อนเป็น $Y_{\ell}^{ab}, Y_{\ell}^{bc}$ และ Y_{ℓ}^{ca} ซึ่งเป็นค่าเชิงซ้อนและไม่เท่ากัน และถือว่าโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หรือเป็น “แบบกึ่งหยุดนิ่ง (quasi-stationary)” เพื่อให้การวิเคราะห์ทางเฟสเซอร์สามารถยอมรับได้ และสามารถสมมุติได้ว่าโหลดเป็นเชิงเส้น (linear)

ตัวชดเชยค่าโหลดในอุดมคติจะสามารถสร้างความนำเชิงซ้อนแบบพาสซีฟ (passive) 3 เฟสที่เมื่อขนานเข้ากับโหลดแล้วจะทำให้ได้โหลดค่าจริงและสมดุล ดังรูปที่ 2.1ค

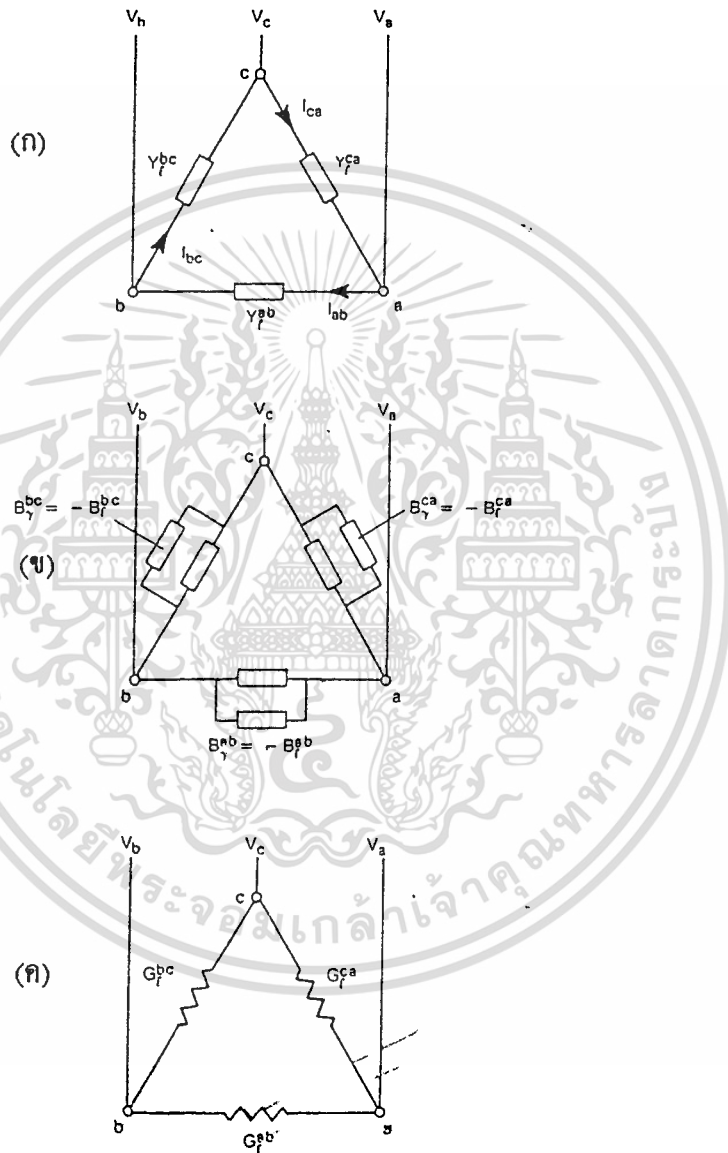
เราจะเริ่มต้นด้วยการแก้ค่าตัวประกอบกำลังของความนำเชิงซ้อนของโหลดแต่ละเฟสให้มีแต่ส่วนจริง โดยการต่อความนำจินตภาพชดเชย (compensating susceptance) ที่มีค่าเท่ากับค่าลบของค่าความนำจินตภาพของโหลด (load susceptance) แบบเดลตา (delta) ขนานเข้าไป กล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (2.1) คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความนำจินตภาพที่ชดเชยจะเป็น

$$B_{\gamma}^{ab} = -B_{\ell}^{ab} \quad \text{.....(2.2)}$$



รูปที่ 2.1 (ก) โหลดสามเฟสไม่สมดุล

(ข) การต่อความนำจินตภาพเพื่อแก้ค่าตัวประกอบกำลังในแต่ละเฟส

(ค) โหลดลัพท์ที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็น 1 แต่ยังไม่สมดุล

ในทำนองเดียวกันความนำจินตภาพที่ชดเชย $B_Y^{bc} = -B_\ell^{bc}$ และ $B_Y^{ca} = -B_\ell^{ca}$ จะถูกต้องขนาดเท่ากับ $Y_\ell^{bc} = G_\ell^{bc} + jB_\ell^{bc}$ และ $Y_\ell^{ca} = G_\ell^{ca} + jB_\ell^{ca}$ ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.1 ข และได้ความนำเชิงซ้อนของโหลด (load admittances) ในแต่ละเฟสเป็น $G_Y^{ab}, G_Y^{bc}, G_Y^{ca}$ ดังรูปที่ 2.1 ค ซึ่งจะเป็นค่าจริง ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังเป็น 1 (unity) แต่ยังคงไม่สมดุล (unbalanced) อยู่

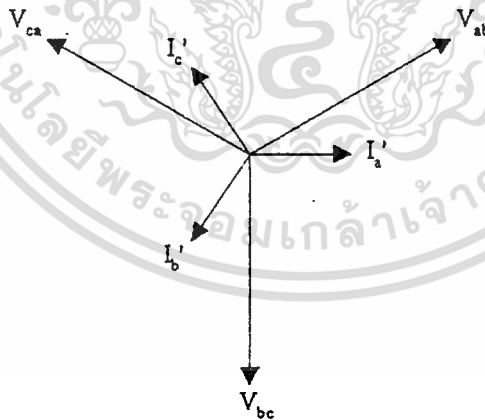
การทำโหลดค่าจริงที่ไม่สมดุลให้สมดุลนั้น เริ่มต้นจากการพิจารณาโหลดหนึ่งเฟส G_Y^{ab} (รูปที่ 2.2 ก) เราสามารถทำให้กระแสสาย (line) ลำดับบวกสามเฟสสมดุลได้โดยแยกพิจารณาการชดเชยค่าตัวประกอบกำลัง และกระแสสายไม่สมดุลในแต่ละเฟส โดยอาศัยทฤษฎีการทับซ้อน (Super Position)

พิจารณาเฟส ab

เนื่องจากการชดเชยจะทำการชดเชยเฉพาะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่านั้น ดังนั้นจึงสมมติให้ชดเชยความนำเชิงซ้อนในอีก 2 เฟสเป็น

$$\begin{aligned} Y_Y^{bc'} &= jB_Y^{bc} \\ Y_Y^{ca'} &= jB_Y^{ca} \end{aligned} \dots\dots(2.3)$$

แล้วพิจารณาว่าค่า B_Y^{bc} และ B_Y^{ca} มีค่าเป็นเท่าใด



รูปที่ 2.2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงแรงดันและกระแส

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรม

$$\begin{aligned} V_a &= V \angle 0^\circ \\ V_{ab} &= \sqrt{3} V \angle 30^\circ \\ V_{bc} &= \sqrt{3} V \angle -90^\circ = a^2 V_{ab} \\ V_{ca} &= \sqrt{3} V \angle 150^\circ = a V_{ab} \end{aligned} \dots\dots(2.4)$$

เมื่อ $a = 1\angle 120^\circ$, $a^2 = 1\angle -120^\circ$, $a^3 = 1\angle 0^\circ$

ค่ากระแสก่อนการชดเชย

$$I_c = 0 \text{ , } I_a = -I_b \quad \text{.....(2.5)}$$

กระแสหลังการชดเชยให้สมดุลสามเฟส จะเป็น

$$I_a' = I\angle 0^\circ$$

$$I_b' = I\angle -120^\circ = a^2 I_a' \quad \text{.....(2.6)}$$

$$I_c' = I\angle 120^\circ = a I_a'$$

กระแสสายในแต่ละเส้นจะมีค่าตามสมการ

$$I_a' = I_{ab} - I_{ca}$$

$$= V_{ab} Y_{ab}' - V_{ca} Y_{ca}'$$

$$= V_{ab} Y_{ab}' - a V_{ab} Y_{ca}' \quad \text{.....(2.7)}$$

$$= V_{ab} (Y_{ab}' - a Y_{ca}')$$

$$= V_{ab} (G_{ab} - ajB_Y^{ca})$$

$$I_b' = I_{bc} - I_{ab}$$

$$= V_{bc} Y_{bc}' - V_{ab} Y_{ab}'$$

$$= a^2 V_{ab} Y_{bc}' - V_{ab} Y_{ab}' \quad \text{.....(2.8)}$$

$$= V_{ab} (a^2 Y_{bc}' - Y_{ab}')$$

$$= V_{ab} (a^2 jB_Y^{bc} - G_{ab})$$

$$I_c' = I_{ca} - I_{bc}$$

$$= V_{ca} Y_{ca}' - V_{bc} Y_{bc}'$$

$$= a V_{ab} Y_{ca}' - a^2 V_{ab} Y_{bc}' \quad \text{.....(2.9)}$$

$$= V_{ab} (a Y_{ca}' - a^2 Y_{bc}')$$

$$= V_{ab} (ajB_Y^{ca} - a^2 jB_Y^{bc})$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.6) $I_b' = a^2 I_a'$ แทนค่า I_b' และ I_a' จากสมการที่ (2.8) และ (2.7) ตามลำดับ จะได้

$$V_{ab} (a^2 jB_Y^{bc} - G_\ell^{ab}) = a^2 \times V_{ab} (G_\ell^{ab} - ajB_Y^{ca}) \quad \text{.....(2.10)}$$

$$\text{แทนค่า } a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad a^3 = 1 \quad \text{ได้}$$

$$V_{ab} \left(\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) jB_Y^{bc} - G_\ell^{ab} \right) = V_{ab} \left(\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) G_\ell^{ab} - jB_Y^{ca} \right)$$

$$\left(-G_\ell^{ab} + \frac{\sqrt{3}}{2} B_Y^{bc} \right) + j \left(-\frac{B_Y^{bc}}{2} \right) = \left(-\frac{1}{2} G_\ell^{ab} \right) + j \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} G_\ell^{ab} - jB_Y^{ca} \right) \quad \text{.....(2.11)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.11) จะได้ว่า

ส่วนจริงด้านซ้าย = ส่วนจริงด้านขวา

$$-G_\ell^{ab} + \frac{\sqrt{3}}{2} B_\gamma^{bc} = -\frac{1}{2} G_\ell^{ab}$$

$$B_\gamma^{bc} = \frac{G_\ell^{ab}}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots(2.12.1)$$

ส่วนจินตภาพด้านซ้าย = ส่วนจินตภาพด้านขวา

$$-\frac{B_\gamma^{bc}}{2} = -\frac{\sqrt{3}}{2} G_\ell^{ab} - jB_\gamma^{ca}$$

แทนค่า B_γ^{bc} จากสมการที่ (2.12.1)

$$-\frac{G_\ell^{ab}}{2\sqrt{3}} = -\frac{\sqrt{3}}{2} G_\ell^{ab} - B_\gamma^{ca}$$

$$B_\gamma^{ca} = -\frac{3}{2\sqrt{3}} G_\ell^{ab} + \frac{G_\ell^{ab}}{2\sqrt{3}} = -\frac{G_\ell^{ab}}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots(2.12.2)$$

นั่นคือ จะต้องชดเชยค่าความนำเชิงซ้อนแบบตัวเก็บประจุ (capacitive susceptance) ระหว่างเฟส b และ c เป็น

$$B_\gamma^{bc} = \frac{G_\ell^{ab}}{\sqrt{3}}$$

และชดเชยค่าความนำเชิงซ้อนที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ (inductive susceptance)

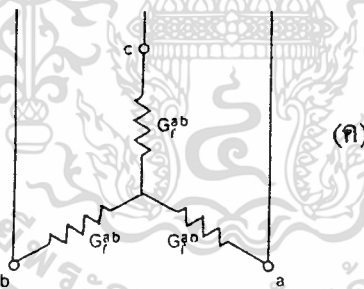
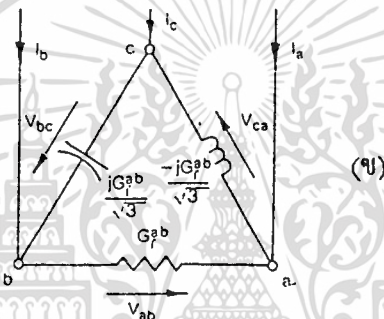
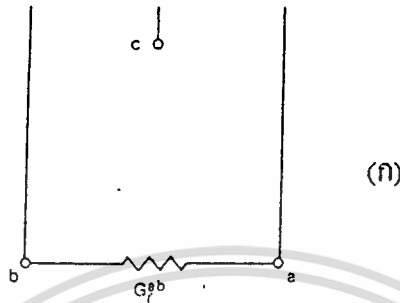
$$B_\gamma^{ca} = -\frac{G_\ell^{ab}}{\sqrt{3}}$$

ระหว่างเฟส c กับเฟส a ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ข และจะได้กระแสสาย I_a , I_b , และ I_c กรณีแรงดันลำดับบวก (positive-sequence voltage) V_{ab} , V_{bc} , และ V_{ca} ดังแสดงในรูปที่ 2.4 กระแสสายนั้นไม่เพียงแต่จะสมดุลกันเท่านั้น แต่ยังจะต้องมีเฟสตรง (inphase) กับแต่ละแรงดันเฟส (phase voltage) ที่สอดคล้องกันด้วย ดังนั้นแหล่งจ่ายที่ต่อแบบวาย(Y) แต่ละเฟสจะจ่ายกำลังงานเป็น I โน 3 ของกำลังงานทั้งหมด และไม่มีกำลังไฟฟ้าริเอกทีฟ สำหรับกรณีแรงดันลำดับเฟสบวก (positive-sequence voltage) จะได้ว่าจรรยาสมมูลเป็นตัวต้านทานซึ่งมีค่าความนำ G_ℓ^{ab} 3 ตัวต่อกันแบบวาย ดังรูปที่ 2.3 ค และกำลังงานทั้งหมดมีค่า $3V^2 G_\ell^{ab}$ เมื่อ V เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันสายเทียบนิวทรอลจากแหล่งจ่ายที่สมมุติว่าสมดุล โดยทั้งค่าตัวประกอบกำลังทั้งหมดและตัวประกอบกำลังในแต่ละเฟสของแหล่งจ่ายจะมีค่าเป็น 1 แม้ว่ากระแสในแต่ละสาขา (branches) ของเดลตาจะไม่สมดุล แต่จะมีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนสมดุลภายในเดลตา กล่าวคือ

กำลังไฟฟ้าริเอกทีฟที่สร้างขึ้นจากการใช้วงจรใช้พลังงานที่สูญเสียไปไม่ก่อให้เกิดประโยชน์อย่างแท้จริง ค่ากำลังไฟฟ้าริเอกทีฟที่สร้างขึ้นจากตัวเก็บประจุระหว่างสาย b และ c มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

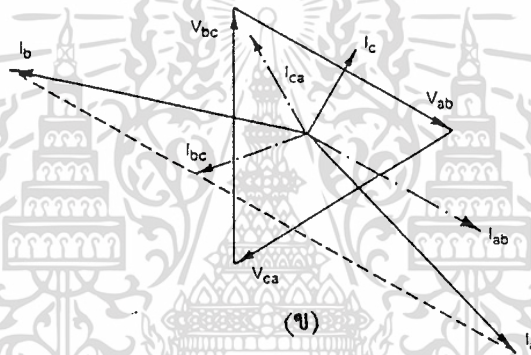
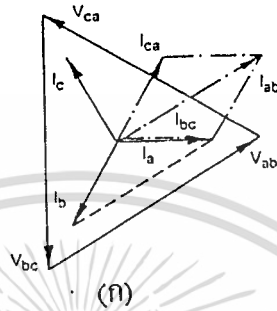
รีแอกทีฟที่ตัวเหนี่ยวนำ ระหว่างสาย c กับ a รับเข้าไป ดังนั้นจึงไม่มีการสร้างหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากแหล่งจ่าย



รูปที่ 2.3 (ก) โหลด 1 เฟสตัวประกอบกำลังเป็น 1 ก่อนที่จะทำการสมดุลลำดับเฟสบวก
 (ข) การทำสมดุลลำดับเฟสบวกของโหลด 1 เฟสตัวประกอบกำลังเป็น 1
 (ค) วงจรสมมูลลำดับเฟสบวกของโหลด 1 เฟส ที่ถูกปรับปรุงแล้ว

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นจริงว่า การทำสมดุลโหลดขึ้นอยู่กับลำดับเฟส ในรูปที่ 2.4ข ได้แสดงกระแสสายที่ได้จากแหล่งจ่ายแรงดันลำดับเฟสลบ (negative-sequence supply voltage) โดยที่ทั้งกระแสสายและกระแสในแต่ละสาขาของเดลตางะจะไม่สมดุล แม้ว่ากำลังงานรวมยังคงมีค่าเหมือนเดิม ($=3V^2G_p^{ab}$) และไม่มีกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟถูกจ่ายจากหรือรับเข้าไปในระบบแหล่งจ่ายเลยก็ตาม อย่างไรก็ตาม ค่าตัวประกอบกำลังในทั้ง 3 เฟสของแหล่งจ่ายจะไม่เป็น 1 (unity)

ในการทำงานเกี่ยวกับกรณีเฟส ab การชดเชย G_ℓ^{bc} และ G_ℓ^{ca} ในเฟส bc และเฟส ca จะได้ค่าความนำเชิงซ้อนดังนี้



- รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า การทำสมดุลดโหดขึ้นอยู่กัลลำดับเฟส
- (ก) ผลการตอบสนองของรูปที่ 2.3ค ในรูปเฟสเซอร์ไอะแกรม กรณีลำดับเฟสบวก
 - ค่าตัวประกอบกำลังรวมเป็น 1
 - กระแสในแต่ละสาขาสมดุลด
 - (ข) ผลการตอบสนองของรูปที่ 2.3ค ในรูปเฟสเซอร์ไอะแกรม กรณีลำดับเฟสลบ
 - ค่าตัวประกอบกำลังรวมไม่เท่ากับ 1
 - กระแสไม่สมดุลด

กรณีเฟส bc

$$B_Y^{ab} = -\frac{G_\ell^{bc}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.13.1)$$

$$B_Y^{ca} = \frac{G_\ell^{bc}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.13.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีเฟส ca

$$B_Y^{bc} = -\frac{G_\ell^{ca}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.14.1)$$

$$B_Y^{ab} = \frac{G_\ell^{ca}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.14.2)$$

จากทฤษฎีการทับซ้อน รวมค่าความนำเชิงซ้อนที่จะต้องชดเชยเพื่อต้องการแก้
กระแสไม่สมดุลในสายทั้งสามเฟส

$$Y_Y^{ab'} = j(-G_\ell^{bc} + G_\ell^{ca})/\sqrt{3}$$

$$Y_Y^{bc'} = j(G_\ell^{ab} - G_\ell^{ca})/\sqrt{3} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$Y_Y^{ca'} = j(-G_\ell^{ab} + G_\ell^{bc})/\sqrt{3}$$

เมื่อเรารวมความนำจินตภาพที่ใช้แก้ค่าตัวประกอบกำลังเข้ากับสมการที่ (2.2) ทำให้ตอนนี้แต่ละสาขาของเดลตามีความนำจินตภาพที่ชดเชย (compensating susceptances) 3 ตัวขนานกัน ซึ่งสามารถรวมกันได้เป็น “โครงข่ายชดเชยสามเฟสที่ต่อแบบเดลตาในทางอุดมคติ (three-phase, delta-connected ideal compensating network)” ซึ่งส่วนชดเชยที่ต้องใส่เข้าไปในแต่ละเฟสจะเป็น

$$B_Y^{ab} = -B_\ell^{ab} + (G_\ell^{ca} - G_\ell^{bc})/\sqrt{3}$$

$$B_Y^{bc} = -B_\ell^{bc} + (G_\ell^{ab} - G_\ell^{ca})/\sqrt{3}$$

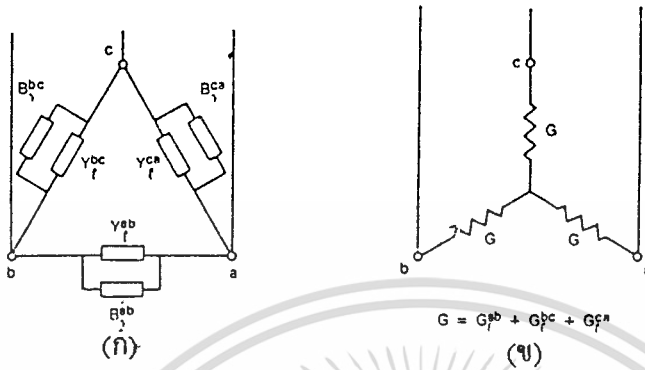
$$B_Y^{ca} = -B_\ell^{ca} + (G_\ell^{bc} - G_\ell^{ab})/\sqrt{3}$$

.....(2.16) ##

ซึ่งทำให้ความนำเชิงซ้อนของโหลดที่ชดเชยเรียบร้อยแล้ว (compensated load admittances) เป็นค่าจริงและสมดุล ดังแสดงเป็นวงจรสมมูลในรูปที่ 2.5x (วงจรสมมูลนี้ใช้ได้กับเฉพาะแรงดันลำดับเฟสบวกเท่านั้น)

ในกรณีที่ค่าความนำของโหลดสมดุล (ซึ่งเกิดจากโหลดต้องการกำลังงานเท่ากันทั้ง 3 เฟส) จะได้ $G_\ell^{ca} - G_\ell^{bc} = 0$ ดังนั้นวงจรชดเชยก็ไม่จำเป็นต้องทำหน้าที่สมดุลโหลด เพียงแต่ต้องไม่ไปทำลายความสมดุลของโหลดที่มีอยู่แล้ว โดยการไม่ใช้หรือจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในแต่ละสาขาของโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 (ก) แสดงการต่อวงจรเพื่อปรับปรุงโหลด 3 เฟส
 (ข) วงจรสมมูล
 กรณีแรงดันลำดับเฟสบวก (positive-sequence)

เราสามารถสรุปหลักสำคัญของการชดเชยค่าโหลดได้ดังนี้

1. โหลดสามเฟส, ไม่มีกราวด์, เชิงเส้น และไม่สมดุลใดๆ สามารถทำให้เป็นโหลดสามเฟสที่เป็นค่าจริงและสมดุลได้ และไม่ทำให้กำลังไฟฟ้าจริง (real power) ที่ส่งถ่ายระหว่างแหล่งจ่าย(source)กับโหลดเปลี่ยนแปลง โดยต่อวงจรชดเชยโหลดทางอุดมคติ (ideal compensating network) ขนานเข้าไปกับโหลด
2. วงจรชดเชยโหลดทางอุดมคติจะมีเพียงส่วนเสมือนเพียงอย่างเดียว (purely reactive)

ถ้าความนำเชิงซ้อนของโหลดเปลี่ยนแปลง ค่าความนำจินตภาพของวงจรชดเชย โหลดจะต้องเปลี่ยนไปเพื่อที่จะสามารถทำให้โหลดสมดุลได้

ปัญหา

เราไม่สามารถวิเคราะห์โหลดให้ออกมาอยู่ในรูปของสมการที่ (2.1) ได้อย่างง่าย ๆ

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่สามารถทำให้หาค่าความนำจินตภาพที่ชดเชยในอุดมคติ (Ideal Compensating Susceptance) $(B_Y^{ab}, B_Y^{bc}, B_Y^{ca})$ ในรูปของกระแสสายและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดเข้ามาจากระบบได้



2.1.2 การชดเชยโหลดในเทอมของส่วนประกอบสมมาตร

(Symmetrical Components)¹

หลักของการชดเชยโหลดตามสมการที่ (2.16) และตามที่สรุปไว้ 2 ข้อท้ายหัวข้อที่แล้ว จะเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่าเราจะควบคุมตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้ทำงานอย่างไร ซึ่งจะเป็นในทางทฤษฎี สำหรับในการออกแบบตัวชดเชยใช้งานจริงนั้น ถ้าใช้สมการที่ (2.16) เป็นสมการพื้นฐานในการคำนวณแล้วจะไม่สะดวกในการควบคุมระบบ เพราะวาค่าความนำจินตภาพของตัวชดเชยที่ต้องการถูกกำหนดในเทอมของความนำเชิงซ้อนของโหลดซึ่งไม่สามารถวัดค่าได้เลยเหมือนอย่างกระแสสายและแรงดัน ด้วยเหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องทำให้สูตรหาค่าความนำเชิงซ้อนที่ต้องชดเชย (compensating susceptance) อยู่ในรูปของกระแสสายกับแรงดัน ซึ่งสูตรนี้จะแสดงให้เห็นถึงวิธีการสร้างสัญญาณทางไฟฟ้าส่งไปยังตัวชดเชยตามความต้องการค่าความนำจินตภาพแบบความจุหรือแบบความเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส โดยระบบควบคุมตัวชดเชยจะต้องสามารถปรับค่าความนำจินตภาพของตัวชดเชยให้ได้เพียงพอกับความต้องการ

การวิเคราะห์โหลดไม่สมดุลโดยการแปลงสูตรหาความนำจินตภาพที่ต้องการในเทอมกระแสสายและแรงดัน จะมีความยากในการวิเคราะห์ตรงที่ไม่มีวิธีการทางคณิตศาสตร์โดยเฉพาะที่รวบรัดที่ทำให้กระแสในระบบชดเชยสมดุลได้ แต่ปัญหาตรงจุดนี้สามารถขจัดออกไปได้โดยขั้นแรกแปลงกระแสและแรงดันให้อยู่ในรูปส่วนประกอบสมมาตร ต่อจากนั้นก็ใช้การแปลงกลับ (inverse transformation) เพื่อที่จะแสดงความนำจินตภาพที่ต้องการในเทอมของกระแสสายและแรงดันที่เกิดขึ้นจริง

การใช้ส่วนประกอบสมมาตรจะมีประโยชน์ในการกำหนดลักษณะของตัวชดเชยแบบต่างๆ กับโหลดที่ไม่สมดุล และถ้าแหล่งจ่ายเป็นลำดับเฟสลบ ตัวชดเชยก็จะมีลักษณะแตกต่างออกไปอีก

จากหลักการของส่วนประกอบสมมาตรสามารถวิเคราะห์โหลดไม่สมดุลในรูปที่ 2.1ก ซึ่งถูกจ่ายด้วยแรงดัน 3 เฟสสมดุล แบบลำดับเฟสบวก (positive phase sequence) จะได้ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันสายเทียบนิวทรัลเป็น

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V \\ V_{b1} &= a^2 V_{a1} = a^2 V \\ V_{c1} &= a V_{a1} = aV \end{aligned} \quad \dots(2.17)$$

เมื่อ $a = 1\angle 120^\circ = \cos\frac{2\pi}{3} + j\sin\frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

เนื่องจากที่สภาวะปกติ (ไม่มี fault เกิดขึ้น) แรงดันจะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันลำดับเฟสบวก นั่นคือ

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} = V \\ V_b &= V_{b1} = a^2V \\ V_c &= V_{c1} = aV \end{aligned} \quad \text{.....(2.18)}$$

ค่าแรงดันระหว่างสาย (line-line) เป็น

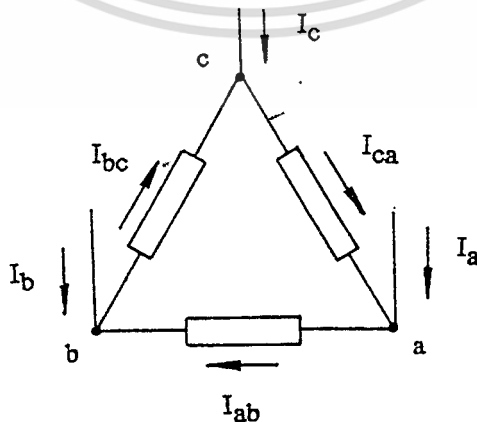
$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b = (1 - a^2)V \\ V_{bc} &= V_b - V_c = (a^2 - a)V \\ V_{ca} &= V_c - V_a = (a - 1)V \end{aligned} \quad \text{.....(2.19)}$$

ค่ากระแสไหลในแต่ละสาขาของเคเลตาเป็น

$$\begin{aligned} I_{ab} &= Y_\ell^{ab} V_{ab} = Y_\ell^{ab} (1 - a^2)V \\ I_{bc} &= Y_\ell^{bc} V_{bc} = Y_\ell^{bc} (a^2 - a)V \\ I_{ca} &= Y_\ell^{ca} V_{ca} = Y_\ell^{ca} (a - 1)V \end{aligned} \quad \text{.....(2.20)}$$

และกระแสสายเป็น

$$\begin{aligned} I_a &= I_{ab} - I_{ca} = [Y_\ell^{ab}(1 - a^2) - Y_\ell^{ca}(a - 1)]V \\ I_b &= I_{bc} - I_{ab} = [Y_\ell^{bc}(a^2 - a) - Y_\ell^{ab}(1 - a^2)]V \\ I_c &= I_{ca} - I_{bc} = [Y_\ell^{ca}(a - 1) - Y_\ell^{bc}(a^2 - a)]V \end{aligned} \quad \text{.....(2.21)}$$



รูปที่ 2.6 แสดงการไหลของกระแสสายและกระแสเฟส (กระแสในสาขา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นการแปลงกระแสสายให้อยู่ในรูปส่วนประกอบสมมาตร

จากหลักการของส่วนประกอบสมมาตร

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{.....(2.22)}$$

และจะได้ส่วนประกอบสมมาตรผกผัน (inverse symmetrical components) เป็น

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{.....(2.23)}$$

เมื่อ $a = 1\angle 120^\circ$ และ I_{a0} , I_{a1} และ I_{a2} เป็นเฟสเซอร์อ้างอิงของชุดลำดับเฟสศูนย์ บวก และลบ ตามลำดับ

แทนค่า I_a, I_b, I_c จากสมการที่ (2.21) ลงในสมการที่ (2.23) จะได้

$$\begin{aligned} I_{a0} &= (I_a + I_b + I_c)/3 \\ &= (I_{ab} - I_{ca} + I_{bc} - I_{ab} + I_{ca} - I_{bc})/3 \\ &= 0 \end{aligned} \quad \text{.....(2.24) \#}$$

$$\begin{aligned} I_{a1} &= (I_a + aI_b + a^2I_c)/3 \\ &= \frac{V}{3} \left[[Y_\ell^{ab}(1-a^2) - Y_\ell^{ca}(a-1)] + a[Y_\ell^{bc}(a^2-a) - Y_\ell^{ab}(1-a^2)] \right. \\ &\quad \left. + a^2[Y_\ell^{ca}(a-1) - Y_\ell^{bc}(a^2-a)] \right] \quad \text{.....(2.25.1)} \\ &= \frac{V}{3} \left[\underbrace{Y_\ell^{ab}(1-a^2-a+a^3)}_I + \underbrace{Y_\ell^{bc}(a^3-a^2-a^4+a^3)}_{II} \right. \\ &\quad \left. + \underbrace{Y_\ell^{ca}(-a+1+a^3-a^2)}_{III} \right] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก $a = 1 \angle 120^\circ = e^{j2\pi/3} = \cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$

$$a^2 = e^{j4\pi/3} = \cos \frac{4\pi}{3} + j \sin \frac{4\pi}{3} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^3 = e^{j6\pi/3} = e^{j2\pi} = \cos 2\pi + j \sin 2\pi = 1$$

$$a^4 = e^{j8\pi/3} = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = a$$

พิจารณาส่วน I ในสมการ (2.25.1) แทนค่า a, a^2, a^3 จะได้

$$\begin{aligned} 1 - a - a^2 + a^3 &= 1 - \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) - \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) + 1 \\ &= 3 \end{aligned}$$

พิจารณาส่วน II ในสมการ (2.25.1) แทนค่า a^2, a^3, a^4 จะได้

$$\begin{aligned} -a^2 + 2a^3 - a^4 &= -\left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) + 2(1) - \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \\ &= 3 \end{aligned}$$

พิจารณาส่วน III ในสมการ (2.25.1) ซึ่งเหมือนกับส่วน I

แทนค่าแต่ละส่วนที่พิจารณาลงในสมการที่ (2.25.1) จะได้ I_{a1} มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{V}{3} [Y_\ell^{ab}(3) + Y_\ell^{bc}(3) + Y_\ell^{ca}(3)] \\ &= (Y_\ell^{ab} + Y_\ell^{bc} + Y_\ell^{ca})V \end{aligned} \quad \text{.....(2.25.2) \#}$$

$$\begin{aligned} I_{a2} &= (I_a + a^2 I_b + a I_c) / 3 \\ &= \frac{V}{3} \left[[Y_\ell^{ab}(1 - a^2) - Y_\ell^{ca}(a - 1)] + a^2 [Y_\ell^{bc}(a^2 - a) - Y_\ell^{ab}(1 - a^2)] \right. \\ &\quad \left. + a [Y_\ell^{ca}(a - 1) - Y_\ell^{bc}(a^2 - a)] \right] \end{aligned} \quad \text{.....(2.26.1)}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{V}{3} \left[\underbrace{Y_\ell^{ab}(1 - a^2 - a^2 + a^4)}_I + \underbrace{Y_\ell^{bc}(a^4 - a^3 - a^3 + a^2)}_{II} \right. \\ &\quad \left. + \underbrace{Y_\ell^{ca}(-a + 1 + a^2 - a)}_{III} \right] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาส่วน I ในสมการ (2.26.1) แทนค่า a^2, a^4 จะได้

$$\begin{aligned} 1 - 2a^2 + a^4 &= 1 - 2\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 \\ &= \frac{3}{2} + j\frac{3\sqrt{3}}{2} \\ &= -3\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = -3a^2 \end{aligned}$$

พิจารณาส่วน II ในสมการ (2.26.1) แทนค่า a^2, a^3, a^4 จะได้

$$\begin{aligned} a^2 - 2a^3 + a^4 &= \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - 2(1) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 \\ &= -3 \end{aligned}$$

พิจารณาส่วน III ในสมการ (2.26.1) แทนค่า a, a^2 จะได้

$$\begin{aligned} 1 - 2a + a^2 &= 1 - 2\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 \\ &= \frac{3}{2} - j\frac{3\sqrt{3}}{2} \\ &= -3\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = -3a \end{aligned}$$

แทนค่าแต่ละส่วนที่พิจารณาลงในสมการที่ (2.26.1) จะได้ I_{a2} มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} I_{a2} &= \frac{V}{3} [Y_{\ell}^{ab}(-3a^2) + Y_{\ell}^{bc}(-3) + Y_{\ell}^{ca}(-3a)] \\ &= -(a^2 Y_{\ell}^{ab} + Y_{\ell}^{bc} + a Y_{\ell}^{ca})V \end{aligned} \quad \text{.....(2.26.2) \#}$$

จากสมการที่ (2.24) , (2.25.2) , (2.26.2) สรุปได้ว่า I_{a0} , I_{a1} และ I_{a2} ซึ่งเป็นเฟสเซอร์อ้างอิงของชุดลำดับเฟสศูนย์ บวก และลบ ตามลำดับ จะมีสมการเป็น

$$\begin{aligned} I_{a0} &= 0 \\ I_{a1} &= (Y_{\ell}^{ab} + Y_{\ell}^{bc} + Y_{\ell}^{ca})V \\ I_{a2} &= -(a^2 Y_{\ell}^{ab} + Y_{\ell}^{bc} + a Y_{\ell}^{ca})V \end{aligned} \quad \text{.....(2.27) ***}$$

พิจารณากระแสลำดับเฟสลบ (negative sequence current) พบว่าหากแก้ไขจนโผล่รวมสมมูล

แล้ว $Y_{\ell}^{ab} = Y_{\ell}^{bc} = Y_{\ell}^{ca}$ จะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยหรือการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 I_{a2} &= -(a^2 + 1 + a)Y_\ell^{ab}V\sqrt{3} \\
 &= -\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} + 1 - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)Y_\ell^{ab}V\sqrt{3} \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

นั่นคือไม่มีกระแสลำดับเฟสลบ ($I_{a2} = 0$)

ในการแก้ไขโหลดให้สมดุลจะต้องรักษาสภาพตัวประกอบกำลังเป็น 1 คือ จะต้องให้ความนำจินตภาพ (susceptance, B) เท่ากับ 0 การชดเชยจะทำเฉพาะส่วนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่านั้น และกระแสในตัวชดเชยจะมีค่า

$$\begin{aligned}
 I_{a0(\gamma)} &= 0 \\
 I_{a1(\gamma)} &= j(B_Y^{ab} + B_Y^{bc} + B_Y^{ca})V\sqrt{3} \\
 I_{a2(\gamma)} &= -j(a^2 B_Y^{ab} + B_Y^{bc} + aB_Y^{ca})V\sqrt{3}
 \end{aligned}
 \tag{2.28} ***$$

หากพิจารณาในมุมกลับจะได้ว่าโหลดที่ชดเชยแล้วจะสมดุลได้ก็ต่อเมื่อกระแสลำดับลบ มีค่าเป็น 0 กล่าวคือ

$$I_{a2(\ell)} + I_{a2(\gamma)} = 0 \tag{2.29} \#$$

เมื่อดัชนีล่าง (subscript) ℓ ที่เพิ่มเข้าไปนั้น เพื่อแสดงว่า $I_{a2(\ell)}$ เป็นกระแสโหลด สมการนี้จะใช้ทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ $I_{a2(\ell)}$ และ $I_{a2(\gamma)}$ ในการชดเชยโหลดนี้ ค่าตัวประกอบกำลังรวมของโหลดจะมีค่าเป็น 1 (unity) ก็ต่อเมื่อ ส่วนจินตภาพของกระแสสายลำดับบวก (positive-sequence line current) มีค่าเป็น 0 นั่นคือ

$$\text{Im}[I_{a1(\ell)} + I_{a1(\gamma)}] = 0 \tag{2.30} \#$$

จากที่กล่าวไว้แล้วที่ต้นหัวข้อนี้ว่า เราต้องการหาค่าความนำจินตภาพที่ต้องการในเทอมของกระแสสายและแรงดัน ดังนั้นถ้าเราแทนค่า $I_{a0(\gamma)}$, $I_{a1(\gamma)}$ และ $I_{a2(\gamma)}$ จากสมการที่ (2.28) ลงในสมการที่ (2.29) และ (2.30) จะทำให้เราได้สูตรของ B_Y^{ab} , B_Y^{bc} และ B_Y^{ca} ซึ่งเป็นค่าความนำจินตภาพของตัวชดเชยในอุดมคติ

- แทนค่า $I_{a2(\ell)}$ จากสมการที่ (2.28) ลงในสมการที่ (2.29) จะได้

$$I_{a2(\ell)} - j(a^2 B_Y^{ab} + B_Y^{bc} + aB_Y^{ca})V = 0 \quad \text{.....(2.31)}$$

$$\text{Re } I_{a2(\ell)} + j \text{Im } I_{a2(\ell)} - j(a^2 B_Y^{ab} + B_Y^{bc} + aB_Y^{ca})V = 0 \quad \text{.....(2.31.1)}$$

แทนค่า $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ และ $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ลงในสมการที่ (2.31.1) จะได้

$$\text{Re } I_{a2(\ell)} + j \text{Im } I_{a2(\ell)} - j \left[\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) B_Y^{ab} + B_Y^{bc} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) B_Y^{ca} \right] V = 0$$

$$\left[\underbrace{\text{Re } I_{a2(\ell)} + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} B_Y^{ab} + \frac{\sqrt{3}}{2} B_Y^{ca} \right) V}_{\text{Real Part}} \right] + j \left[\underbrace{\text{Im } I_{a2(\ell)} + \left(\frac{1}{2} B_Y^{ab} - B_Y^{bc} + \frac{1}{2} B_Y^{ca} \right) V}_{\text{Imaginary Part}} \right] = 0 \quad \text{.....(2.31.2)}$$

จำนวนเชิงซ้อนจะเป็น 0 ได้ ก็ต่อเมื่อทั้งส่วนจริง = 0 และส่วนจินตภาพ = 0

- พิจารณาส่วนจริง = 0

$$\text{Re } I_{a2(\ell)} + \frac{\sqrt{3}}{2} V (-B_Y^{ab} + B_Y^{ca}) = 0$$

$$B_Y^{ab} - B_Y^{ca} = \frac{2}{\sqrt{3}V} \text{Re } I_{a2(\ell)} \quad \text{.....(2.32)}$$

- พิจารณาส่วนจินตภาพ = 0

$$\text{Im } I_{a2(\ell)} + \left(\frac{1}{2} B_Y^{ab} - B_Y^{bc} + \frac{1}{2} B_Y^{ca} \right) V = 0$$

$$B_Y^{ab} - 2B_Y^{bc} + B_Y^{ca} = -\frac{2}{V} \text{Im } I_{a2(\ell)} \quad \text{.....(2.33)}$$

- แทนค่า $I_{a1(\ell)}$ จากสมการที่ (2.28) ลงในสมการที่ (2.30) จะได้

$$\text{Im } I_{a1(\ell)} + (B_Y^{ab} + B_Y^{bc} + B_Y^{ca})V = 0$$

$$B_Y^{ab} + B_Y^{bc} + B_Y^{ca} = -\frac{\text{Im } I_{a1(\ell)}}{V} \quad \text{.....(2.34)}$$

จากสมการที่ (2.32) , (2.33) และ (2.34) จะสามารถแก้สมการหาค่า B_Y^{ab} , B_Y^{bc} และ B_Y^{ca} ได้ดังต่อไปนี้ (3 ตัวแปร 3 สมการ หาได้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการ (2.34) - สมการ (2.33) จะได้

$$3B_Y^{bc} = -\frac{\text{Im} I_{a1}(\ell)}{V} + \frac{2 \text{Im} I_{a2}(\ell)}{V}$$

$$\therefore B_Y^{bc} = -\frac{1}{3V} [\text{Im} I_{a1}(\ell) - 2 \text{Im} I_{a2}(\ell)] \quad \text{.....(2.35) \#}$$

นำสมการ (2.32) - สมการ (2.33) จะได้

$$2B_Y^{bc} - 2B_Y^{ca} = \frac{2}{3V} \text{Re} I_{a2}(\ell) + \frac{2}{\sqrt{3}V} \text{Im} I_{a2}(\ell)$$

แทนค่า B_Y^{bc} จากสมการที่ (2.35) จะได้

$$\begin{aligned} B_Y^{ca} &= -\frac{1}{3V} [\text{Im} I_{a1}(\ell) - 2 \text{Im} I_{a2}(\ell)] - \frac{1}{3V} \text{Re} I_{a2}(\ell) - \frac{1}{\sqrt{3}V} \text{Im} I_{a2}(\ell) \\ &= -\frac{1}{3V} [\text{Im} I_{a1}(\ell) - 2 \text{Im} I_{a2}(\ell) + \sqrt{3} \text{Re} I_{a2}(\ell) + 3 \text{Im} I_{a2}(\ell)] \end{aligned}$$

$$\therefore B_Y^{ca} = -\frac{1}{3V} [\text{Im} I_{a1}(\ell) + \text{Im} I_{a2}(\ell) + \sqrt{3} \text{Re} I_{a2}(\ell)] \quad \text{.....(2.36)}$$

แทนค่า B_Y^{ca} ลงในสมการที่ (2.32) จะได้ค่า B_Y^{ab} เป็น

$$\begin{aligned} B_Y^{ab} &= -\frac{1}{3V} [\text{Im} I_{a1}(\ell) + \text{Im} I_{a2}(\ell) + \sqrt{3} \text{Re} I_{a2}(\ell)] + \frac{2}{3V} \text{Re} I_{a2}(\ell) \\ &= -\frac{1}{3V} [\text{Im} I_{a1}(\ell) + \text{Im} I_{a2}(\ell) + \sqrt{3} \text{Re} I_{a2}(\ell) - 2\sqrt{3} \text{Re} I_{a2}(\ell)] \end{aligned}$$

$$\therefore B_Y^{ab} = -\frac{1}{3V} [\text{Im} I_{a1}(\ell) + \text{Im} I_{a2}(\ell) - \sqrt{3} \text{Re} I_{a2}(\ell)] \quad \text{.....(2.37)}$$

จากสมการที่ (2.35) , (2.36) และ (2.37) จะเป็นค่าความนำจินตภาพที่ชดเชย B_Y^{ab} , B_Y^{bc} และ B_Y^{ca} ตามลำดับ ซึ่งกระแสทางค่านขามือของสมการยังอยู่ในรูปของส่วนประกอบสมมาตรอยู่ ดังนั้นเราจำเป็นต้องเปลี่ยนกลับให้อยู่ในรูปของกระแสสายของโหลด ($I_a(\ell)$, $I_b(\ell)$, $I_c(\ell)$) ดังเดิม โดยใช้การแปลงส่วนประกอบสมมาตรผกผัน (สมการที่ (2.23))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต

3.1 การใช้งานตัวชดเชยโหลด (COMPENSATOR)

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิตจะใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ (static shunt compensators) มักใช้ปรับปรุงโหลดที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆ โดยมีวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนี้

1. อนุรักษ์ระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่

- ใช้ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆอันเนื่องจากการเปลี่ยน โหลด
- ใช้ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดว่าจะเกิดขึ้น เช่น การตัดโหลดออกไป แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของแหล่งกำเนิด (generator) และในสายส่ง (line)
- ใช้ลดการกระตุกของแรงดัน (voltage flicker) อันเนื่องมาจากโหลดที่เปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆ อย่างรวดเร็ว เช่น ในเตาหลอมโลหะ

2. ใช้เพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า

- ใช้ช่วยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเสริมเข้าไปที่จุดกลางของสายส่ง
- ช่วยปรับปรุงการแกว่งแบบมีการหน่วง (swing damping)

3. ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

4. การทำเฟสให้สมดุล

5. อื่นๆ เช่น

- การควบคุมแรงดันกระแสสลับที่ขั้วของตัวแปลงกระแสตรงแรงดันสูง (HVDC converter)
- การลดการสูญเสียในสายส่งที่ออกมาจากหน่วยกำเนิดไฟฟ้าระยะใกล้
- การกำจัดเรโซแนนซ์ของสับซิงโครนัส (subsynchronous)
- การจำกัดแรงดันเกินแบบพลวัต (dynamic overvoltage)

$$\begin{aligned}
B_Y^{ca} &= -\frac{1}{3V} \left[\frac{1}{3} \text{Im} (I_{a(\ell)} + aI_{b(\ell)} + a^2 I_{c(\ell)}) + \frac{1}{3} \text{Im} (I_{a(\ell)} + a^2 I_{b(\ell)} + aI_{c(\ell)}) \right. \\
&\quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{3} \text{Re} (I_{a(\ell)} + a^2 I_{b(\ell)} + aI_{c(\ell)}) \right] \\
&= -\frac{1}{3 \times 3V} \left[\text{Im} (2I_{a(\ell)} + (a+a^2)I_{b(\ell)} + (a^2+a)I_{c(\ell)}) \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{3} \text{Re} (-I_{b(\ell)} - I_{c(\ell)} + a^2 I_{b(\ell)} + aI_{c(\ell)}) \right] \\
&= -\frac{1}{3 \times 3V} \left[\text{Im} (-I_{a(\ell)} - I_{b(\ell)} - I_{c(\ell)}) + 3 \text{Im} I_{a(\ell)} \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{3} \text{Re} ((a^2-1)I_{b(\ell)} + (a-1)I_{c(\ell)}) \right] \\
&= -\frac{1}{3 \times 3V} \left[3 \text{Im} I_{a(\ell)} + \sqrt{3} \text{Re} \left(\left(-\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_{b(\ell)} + \left(-\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_{c(\ell)} \right) \right] \\
&= -\frac{1}{3 \times 3V} \left[3 \text{Im} I_{a(\ell)} + \sqrt{3} \left(-\frac{3}{2} \text{Re} I_{b(\ell)} + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Im} I_{b(\ell)} - \frac{3}{2} \text{Re} I_{c(\ell)} - \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Im} I_{c(\ell)} \right) \right] \\
&= -\frac{1}{3 \times 3V} \left[3 \text{Im} I_{a(\ell)} - 3 \left(-\frac{1}{2} \text{Im} I_{b(\ell)} + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Re} I_{b(\ell)} \right) + 3 \left(-\frac{1}{2} \text{Im} I_{c(\ell)} - \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Re} I_{c(\ell)} \right) \right] \\
\therefore B_Y^{ca} &= -\frac{1}{3V} \left[\text{Im} I_{a(\ell)} - \text{Im} a I_{b(\ell)} + \text{Im} a^2 I_{c(\ell)} \right] \dots\dots\dots(2.39.2) \#
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_Y^{ab} &= -\frac{1}{3V} \left[\frac{1}{3} \text{Im} (I_{a(\ell)} + aI_{b(\ell)} + a^2 I_{c(\ell)}) + \frac{1}{3} \text{Im} (I_{a(\ell)} + a^2 I_{b(\ell)} + aI_{c(\ell)}) \right. \\
&\quad \left. - \frac{\sqrt{3}}{3} \text{Re} (I_{a(\ell)} + a^2 I_{b(\ell)} + aI_{c(\ell)}) \right] \\
\therefore B_Y^{ab} &= -\frac{1}{3V} \left[\text{Im} I_{a(\ell)} + \text{Im} a I_{b(\ell)} - \text{Im} a^2 I_{c(\ell)} \right] \dots\dots\dots(2.39.3) \#
\end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้สมการที่แสดงค่าความนำจินตภาพ (compensating susceptances) ที่ต้องชดเชยในเทอมของเฟสเซอร์กระแสสาย $I_{a(\ell)}$, $I_{b(\ell)}$ และ $I_{c(\ell)}$ ของโหลด ดังนี้

$$\begin{aligned}
B_Y^{ab} &= -\frac{1}{3V} \left[\text{Im} I_{a(\ell)} + \text{Im} a I_{b(\ell)} - \text{Im} a^2 I_{c(\ell)} \right] \\
B_Y^{b\alpha} &= -\frac{1}{3V} \left[-\text{Im} I_{a(\ell)} + \text{Im} a I_{b(\ell)} + \text{Im} a^2 I_{c(\ell)} \right] \dots\dots\dots(2.39) \\
B_Y^{ca} &= -\frac{1}{3V} \left[\text{Im} I_{a(\ell)} - \text{Im} a I_{b(\ell)} + \text{Im} a^2 I_{c(\ell)} \right]
\end{aligned}$$

บทที่ 3

หลักการของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต

3.1 การใช้งานตัวชดเชยโพล (COMPENSATOR)

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิตจะใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ (static shunt compensators) มักใช้ปรับปรุงโพลที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆ โดยมีวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนี้

1. ใช้อักรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่

- ใช้ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆอันเนื่องจากการเปลี่ยนโพล
- ใช้ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องจากการที่ไมคาดว่าจะเป็นเกิดขึ้น เช่น การตัดโพลออกไป แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของแหล่งกำเนิด (generator) และในสายส่ง (line)
- ใช้ลดการกระตุกของแรงดัน (voltage flicker) อันเนื่องมาจากโพลที่เปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆ อย่างรวดเร็ว เช่น ในเตาหลอมโลหะ

2. ใช้เพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า

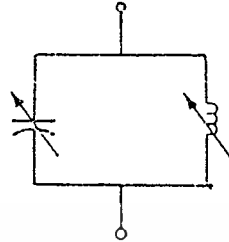
- ใช้ช่วยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเสริมเข้าไปที่จุดกลางของสายส่ง
- ช่วยปรับปรุงการแกว่งแบบมีการหน่วง (swing damping)

3. ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

4. การทำเฟสให้สมดุล

5. อื่นๆ เช่น

- การควบคุมแรงดันกระแสสลับที่ขั้วของตัวแปลงกระแสตรงแรงดันสูง (HVDC converter)
- การลดการสูญเสียในสายส่งที่ออกมาจากหน่วยกำเนิดไฟฟ้าระยะใกล้
- การกำจัดเรโซแนนซ์ของสับซิงโครนัส (subsynchronous)
- การจำกัดแรงดันเกินแบบพลวัต (dynamic overvoltage)



รูปที่ 3.1 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบสถิตในทางอุดมคติ

3.1.1 คุณสมบัติของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบสถิต

รูปที่ 3.1 แสดงถึงตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบสถิต (static reactive power compensator) ในทางอุดมคติ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการหน่วงเวลาการตอบสนองและยังสามารถขยายช่วงการชดเชยได้อีกด้วย (ขยายช่วงตามหลัง (lagging) และนำหน้า (leading))

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวชดเชยแบบสถิต คือ ความสามารถในการรักษาให้แรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) คงที่ตลอดช่วงการปรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของระบบไฟฟ้ากำลัง คุณสมบัติในการรักษาแรงดันให้คงที่นี้เป็นความจำเป็นอันแรกของตัวชดเชยขนานแบบพลวัต (dynamic shunt compensator) และมีความสำคัญในการลดการกระตุก (flicker) และการแกว่งของแรงดันที่เกิดจากโหลดที่เปลี่ยนแปลง

คุณสมบัติที่สำคัญข้อที่สองคือความเร็วในการตอบสนอง ซึ่งตัวชดเชยจะต้องสามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้รวดเร็วเพียงพอเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) แม้จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่อาจไม่จำเป็นที่จะต้องตอบสนองได้เร็วต่อทุกระบบ เช่น ในระบบสายส่งซึ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบด้วย ซึ่งไม่มีจุดที่ชี้ชัดลงไปว่าตัวชดเชยแต่ละแบบจะมีการตอบสนองที่เร็วที่สุดที่เป็นไปได้ในทางทฤษฎีเท่าใด ในการปรับปรุงค่าโหลด การกระตุก (flicker) จะลดลงได้เมื่อตัวชดเชยตอบสนองรวดเร็วที่สุดเท่านั้น

ลักษณะการควบคุมส่วนใหญ่จะมีความชันเป็นบวกเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเสถียรภาพของจุดปฏิบัติงาน กระแสรีแอกทีฟจะถูกจำกัดในทั้งแบบมูมนำ (lagging) และมูมตาม (leading) ด้วยองค์ประกอบที่ใช้ในการออกแบบตัวชดเชย และหลักในการปฏิบัติงานของมัน แม้ว่ากราฟเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะของมันจะเบนออกจากเส้นตรง ซึ่งทำให้ไม่ต่อเนื่อง โดยค่าความชันของกราฟจะขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของกระแสกับแรงดัน

ทฤษฎีหลายอย่างถูกนำมาใช้ในการออกแบบตัวชดเชยแบบสถิต ซึ่งสามารถจำแนกประเภทของตัวชดเชยได้เป็น 3 แบบใหญ่ๆ คือ

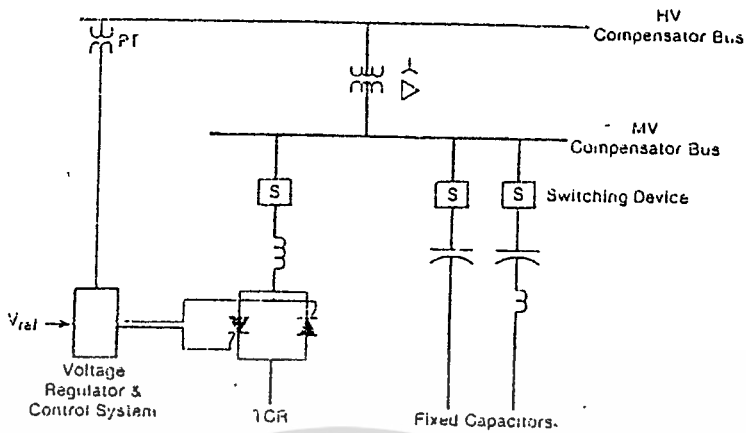
1. แบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (the thyristor-controlled reactor , TCR)
2. แบบไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ (the thyristor-switched capacitor ,TSC)
3. แบบรีแอคเตอร์อิ่มตัว (the saturated reactor , SR)

3.1.2 ชนิดของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้า

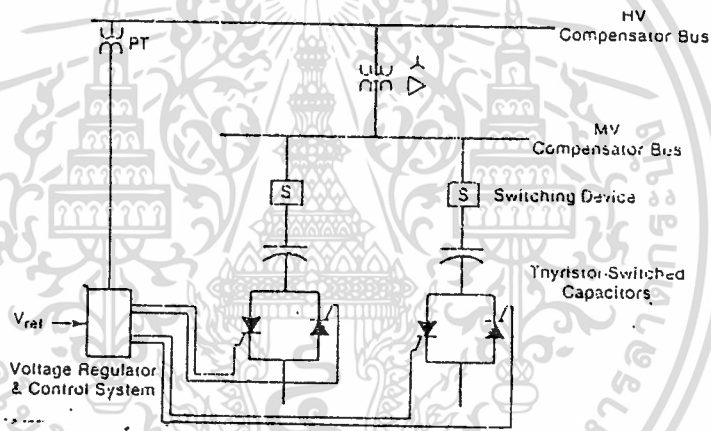
รูปที่ 3.2 ถึง 3.4 จะแสดงถึงวันไลน์โคออร์เดตของตัวชดเชยแบบหลักๆ ซึ่งมีลักษณะทั่วไปที่สำคัญ 2-3 ประการ คือ

1. จะมีการต่อตัวเก็บประจุนานกับความนำจินตภาพ (susceptance) ที่ควบคุมได้ โดยตัวเก็บประจุที่ต่อขนานจะถูกปรับด้วยรีแอคเตอร์เล็ก ๆ สู้อำนาจความถี่ฮาร์โมนิกส์ ซึ่งอาจเป็นลำดับจำนวนเต็มหรือไม่เป็นก็ได้ เหตุผลที่ปรับก็เพื่อที่จะกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากความนำจินตภาพที่ควบคุมได้ (controlled susceptance , TCR หรือ SR) และเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเรโซแนนซ์ ตัวเก็บประจุนี้จะทำให้กำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของตัวชดเชยเป็นแบบมูน่า (leading) หรือจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟ

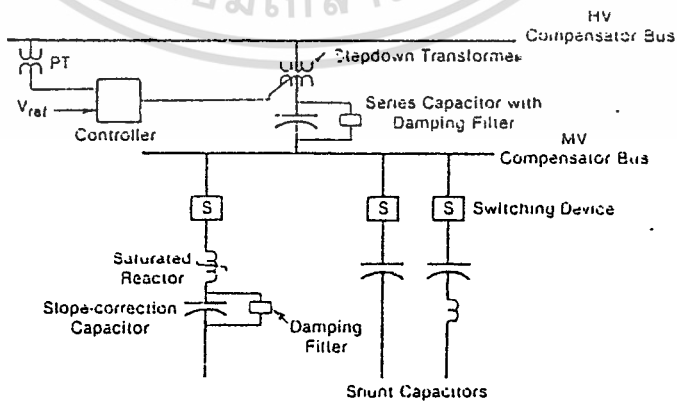
2. จากรูปที่ 3.2 ถึง 3.4 เราจะสังเกตเห็นว่ามีหม้อแปลงลดแรงดัน (step-down transformer) ซึ่งจะมีหรือไม่มีก็ได้ แต่ถ้าใส่เข้าไปแล้วจะมีผลกระทบต่อคุณลักษณะของตัวชดเชยอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับฮาร์โมนิกส์ การสูญเสีย (losses) และเรื่องแรงดันเกิน (overvoltage) บางครั้งตัวเก็บประจุนี้จะต่ออยู่กับด้านแรงดันสูงของหม้อแปลง แต่ส่วนใหญ่แล้วจะต่อกับบัสแรงดันปานกลางของตัวชดเชย และมีอุปกรณ์ควบคุมต่ออยู่ด้วย บางครั้งตัวชดเชยก็จะต่อกับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง ถ้าตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ต่อตัวเก็บประจุนานกับด้านแรงดันสูง จะต้องใช้หม้อแปลงที่ลดแรงดันลงมากๆ ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียสูง เช่น หม้อแปลงควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (thyristor-controlled transformer , TCP) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ก็จะมีลักษณะเช่นนี้เหมือนกัน



รูปที่ 3.2 วันไลน์โคอะแกรมของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ซึ่งต่อขนานกับตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.3 วันไลน์โคอะแกรมของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.4 วันไลน์โคอะแกรมของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์อิ่มตัวซึ่งมีตัวเก็บประจุ ขนานทำหน้าที่ปรับค่าความชัน

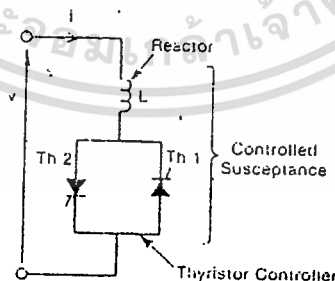
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ลักษณะที่คล้ายคลึงกันของรูปที่ 3.2 ถึง 3.4 ถือว่าเป็นหลักการอย่างกว้างๆ ส่วนรายละเอียดรูปร่างและการนำไปติดตั้งในสถานีไฟฟ้าย่อยของตัวชดเชยแต่ละแบบก็จะแตกต่างกันออกไป เช่น ตัวชดเชยแบบหม้อแปลงจะใช้รีแอคเตอร์อิ่มตัว (saturated reactor) ในขณะที่ตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ และแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์จะใช้ไทรสเตอร์ควบคุม โดยจะแยกส่วนระหว่างตัวเก็บประจุกับรีแอคเตอร์ และมักจะบรรจุในโครงสร้างปิดเพื่อป้องกันฝนฟ้าที่อาจทำให้เกิดความเสียหายได้

3.2 ตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor-Controlled Reactor , TCR)

3.2.1 หลักการทำงาน

รูปแบบพื้นฐานของตัวชดเชยรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (TCR) แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยควบคุมที่ไทรสเตอร์ (Thyristor Controller) จากรูปจะเห็นเป็นไทรสเตอร์คู่ต่อขนานกลับกัน ซึ่งมันจะนำกระแสกลับไป-กลับมาในแต่ละครึ่งรอบ (cycle) ของความถี่แหล่งจ่ายไฟ ถ้าไทรสเตอร์ถูกจุดชนวน (turn on) ที่จุดสูงสุด (peaks) ของคลื่นแรงดันของแหล่งจ่ายพอดี จะเกิดการนำกระแสเต็มที่ (full conduction) ทำให้ไทรสเตอร์ลัดวงจร และกระแสเป็นรีแอคทีฟและตามหลัง (lagging) แรงดันเกือบๆ 90° เนื่องจากมีส่วนประกอบที่เฟสตรงกับแรงดัน (in-phase) อยู่เล็กน้อยอันเกิดจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในรีแอคเตอร์ประมาณ 0.5-2% ของกำลังไฟฟารีแอคทีฟ รูปที่ 3.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อเกิดการนำกระแสเต็มที่ (full conduction)

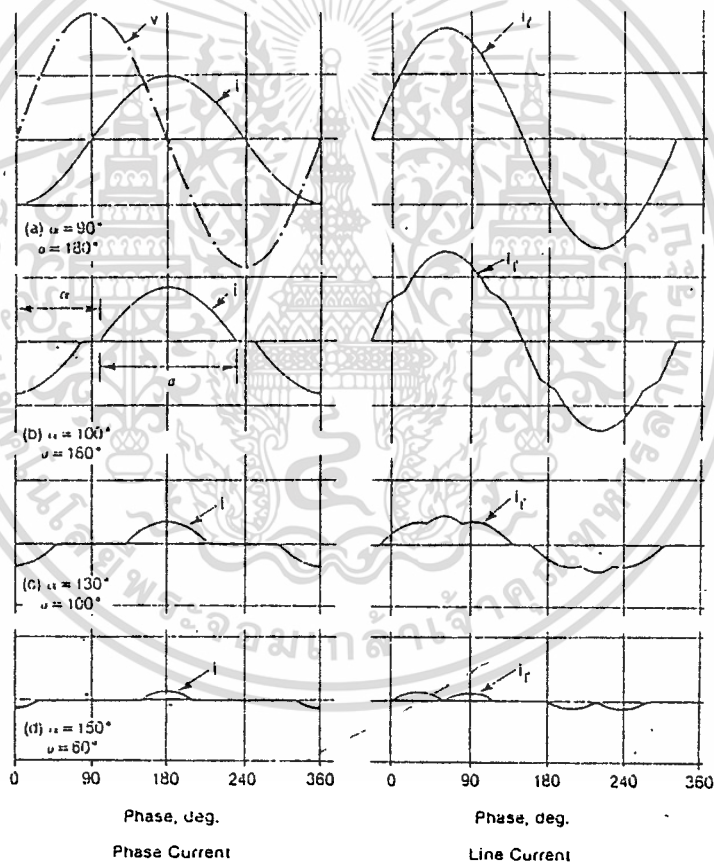


รูปที่ 3.5 ส่วนต่างๆของรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (thyristor-controlled reactor)

ถ้าเราทริกขาเกตที่มุมเพิ่มมากขึ้น (delay) เท่ากันบนไทรสเตอร์ทั้งคู่ รูปคลื่นของกระแสจะเป็นดังรูปที่ 3.6 ถึง 3.6ง ผลการตอบสนองเหล่านี้จะขึ้นอยู่กัมุมทริค α ซึ่งวัดจากจุดที่แรงดันเป็นศูนย์ การนำกระแสจะเกิดขึ้นเต็มที่เมื่อมุมทริคเป็น 90° แต่ถ้าทริคด้วยมุม 90° ถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

180° จะเกิดการนำกระแสบางส่วน เมื่อเพิ่มมุมทริกจะไปทำให้ส่วนประกอบหลักมูลของกระแสลดลง การทำเช่นนี้เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำของรีแอคเตอร์ซึ่งเป็นการลดการใช้กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟลง นอกจากนี้จะเกี่ยวข้องกับกระแสหลักมูลแล้ว ตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์ยังเป็นความนำจินตภาพ (susceptance) ที่ควบคุมได้ และสามารถนำไปใช้ในตัวชดเชยแบบสถิต



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นกระแสสาย (line) และกระแสเฟส

เมื่อต่อตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์แบบเคลตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสขณะใดๆ (i) จะเป็น

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

เมื่อ V คือ แรงดันอาร์เอ็มเอส (rms)

$X_L = \omega L$ เป็นค่ารีแอกแตนซ์ของรีแอกเตอร์ที่ความถี่หลักมูล (fundamental) [Ω]

$\omega = 2\pi f$

และ α คือ มุมทริกที่ป้อนขากท

จุดเริ่มต้น (origin) ของเวลา คือ จุดที่แรงดันไฟฟ้าเป็น 0 และกำลังจะเพิ่มขึ้นในทางบวก เราสามารถหากระแสหลักมูล (fundamental) โดยใช้การแปลงฟูริเยอร์ (Fourier) ดังต่อไปนี้

จากการแปลงฟูริเยอร์

$$f(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(\omega t) d\omega t$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos n\omega t d\omega t$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin n\omega t d\omega t$$

เนื่องจาก $i(\omega t)$ เป็นฟังก์ชันคี่ ดังนั้น $a_0 = 0$

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{2}{2\pi} \left[\int_0^{\pi-\alpha} \frac{\sqrt{2}V}{X_L}(-\cos\alpha - \cos\omega t) \cos\omega t d\omega t + \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \frac{\sqrt{2}V}{X_L}(\cos\alpha - \cos\omega t) \cos\omega t d\omega t \right. \\ &\quad \left. + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} \frac{\sqrt{2}V}{X_L}(-\cos\alpha - \cos\omega t) \cos\omega t d\omega t \right] \\ &= \frac{\sqrt{2}V}{\pi X_L} \left[\int_0^{\pi-\alpha} \left(-\cos\alpha \cos\omega t - \frac{\cos 2\omega t}{2} - \frac{1}{2} \right) d\omega t + \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \left(\cos\alpha \cos\omega t - \frac{\cos 2\omega t}{2} - \frac{1}{2} \right) d\omega t \right. \\ &\quad \left. + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} \left(-\cos\alpha \cos\omega t - \frac{\cos 2\omega t}{2} - \frac{1}{2} \right) d\omega t \right] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= \frac{\sqrt{2}V}{\pi X_L} \left[\left(-\cos\alpha \sin\omega t - \frac{\sin 2\omega t}{4} - \frac{1}{2}\omega t \right) \Big|_0^{\pi-\alpha} + \left(\cos\alpha \sin\omega t - \frac{\sin 2\omega t}{4} - \frac{1}{2}\omega t \right) \Big|_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \right. \\
&\quad \left. + \left(-\cos\alpha \sin\omega t - \frac{\sin 2\omega t}{4} - \frac{1}{2}\omega t \right) \Big|_{\pi+\alpha}^{2\pi} \right] \\
&= \frac{\sqrt{2}V}{\pi X_L} \left\{ -\cos\alpha [\sin(\pi-\alpha) - \sin 0] - \frac{1}{4} [\sin(2\pi-2\alpha) - \sin 0] - \frac{1}{2} [\pi-\alpha] \right\} \\
&\quad + \left\{ \cos\alpha [\sin(2\pi-\alpha) - \sin\alpha] - \frac{1}{4} [\sin(4\pi-2\alpha) - \sin 2\alpha] - \frac{1}{2} [2\pi-\alpha-\alpha] \right\} \\
&\quad + \left\{ -\cos\alpha [\sin 2\pi - \sin(\pi+\alpha)] - \frac{1}{4} [\sin 4\pi - \sin(2\pi+2\alpha)] - \frac{1}{2} [2\pi-\pi-\alpha] \right\} \\
&= \frac{\sqrt{2}V}{\pi X_L} \left\{ -\cos\alpha \sin\alpha + \frac{1}{4} \sin 2\alpha - \frac{1}{2} \pi + \frac{1}{2} \alpha \right\} \\
&\quad + \left\{ -2 \cos\alpha \sin\alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha - \pi + \alpha \right\} \\
&\quad + \left\{ -\cos\alpha \sin\alpha + \frac{1}{4} \sin 2\alpha - \frac{1}{2} \pi + \frac{1}{2} \alpha \right\} \\
&= \frac{\sqrt{2}V}{\pi X_L} [-4 \cos\alpha \sin\alpha + \sin 2\alpha - 2\pi + 2\alpha] \\
a_1 &= \frac{\sqrt{2}V}{\pi X_L} [-\sin 2\alpha + 2(\alpha - \pi)] \quad \dots\dots (3.2)
\end{aligned}$$

เนื่องจาก $\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi$ $2\alpha = 2\pi - \sigma$
 $\sin 2\alpha = \sin(2\pi - \sigma) = -\sin\sigma$

$$a_1 = \frac{\sqrt{2}V}{\pi X_L} [\sin\sigma - \sigma] \quad \dots\dots (3.3)$$

เนื่องจาก $i(\omega t)$ เป็นฟังก์ชันคี่ ดังนั้น $b_n = 0$

$$\begin{aligned}
I_{1,rms} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\sqrt{2}V}{\pi X_L} [\sin\sigma - \sigma] \right)^2 \cos^2 \omega t \, d\omega t} \\
&= \frac{\sqrt{2}V}{\pi X_L} |\sin\sigma - \sigma| \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\sin 2\omega t}{2} + \omega t \right) \Big|_0^{2\pi}} \\
&= \frac{\sqrt{2}V}{\pi X_L} |\sin\sigma - \sigma| \sqrt{\frac{1}{4\pi} (2\pi)} \\
&= \frac{V}{\pi X_L} (\sigma - \sin\sigma) \quad A_{(rms)} \quad \dots\dots (3.4)
\end{aligned}$$

เมื่อ σ คือ ช่วงมุมที่นำกระแส ซึ่งสัมพันธ์กับ α ดังสมการ

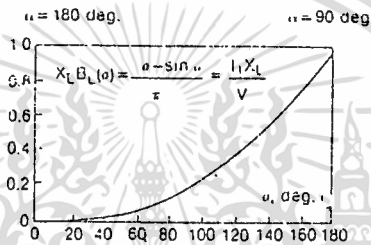
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (3.5)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถเขียนสมการที่ (3.4) ใหม่ได้เป็น

$$I_1 = B_L(\sigma)V \quad \text{..... (3.6)}$$

เมื่อ $B_L(\sigma)$ เป็นค่าความนำจินตภาพที่ความถี่หลักมูล ซึ่งสามารถปรับค่าได้โดยควบคุมช่วงมุมที่นำกระแส (σ)

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi X_L} \quad \text{..... (3.7)}$$



รูปที่ 3.7 กฎการควบคุมของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์แบบพื้นฐาน

กฎการควบคุมนี้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.7 เมื่อ $\sigma = \pi$ หรือ 180° จะทำให้ได้ค่า $B_L(\text{max}) = \frac{1}{X_L}$ ซึ่งจะทำให้ไทรสเตอร์นำกระแสเต็มที่ และค่าความนำจินตภาพที่ความถี่หลักมูลจะต่ำสุดเป็น 0 เมื่อ $\sigma = 0$ ($\alpha = 180^\circ$) หลักในการควบคุมดังกล่าวเรียกว่า "การควบคุมเฟส (phase control)"

3.2.2 ลักษณะแรงดัน/กระแส

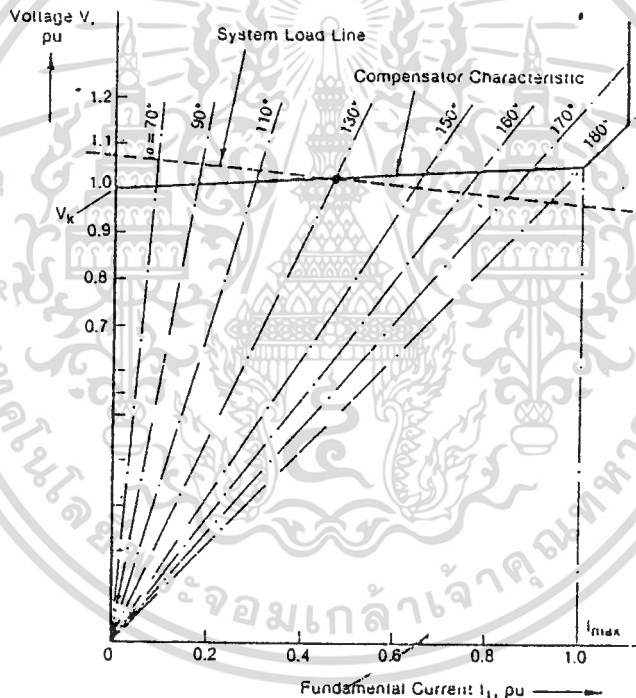
ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์จำเป็นต้องมีระบบควบคุมที่ใช้กำหนดในรูปของคลื่นพัลส์ไปยังขาเกตของไทรสเตอร์ ในการออกแบบระบบควบคุมนี้เราจะต้องสร้างสัญญาณป้อนขาเกตที่จะทำได้ ความนำจินตภาพ (susceptance) B_L ตามต้องการ กระบวนการในการควบคุมจะแตกต่างกันไปตามพารามิเตอร์ที่วัดได้จากระบบที่จะไปชดเชย (compensated) เช่น แรงดัน และจะสร้างสัญญาณป้อนขาเกต (gating pulses) โดยไม่ได้ใช้สัญญาณสำหรับค่าความนำจินตภาพที่แน่นอน ลักษณะของแรงดัน/กระแสในแต่ละกรณีจะเป็นดังรูปที่ 3.8 จุดตัดระหว่างเส้นโหลดของระบบ (system load) กับเส้นคุณลักษณะของตัวชดเชย (compensator characteristic) คือสภาวะคงตัว (steady state) เช่น ที่มุมช่วงนำกระแส (conduction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

angle) 130° จะให้ค่าแรงดันประมาณ 1.0 p.u. แต่กราฟนี้เป็นแค่เพียงส่วนหนึ่งที่ใช้ในการควบคุม ซึ่งจะต้องพิจารณาส່วนอื่นๆอีก เช่น การตั้งการควบคุมและพิกัดของตัวชดเชย ลักษณะการควบคุมดังรูปที่ 3.8 กำหนดโดยสมการ

$$V = V_K + jX_S I_1 \quad , \quad 0 < I_1 < I_{\max} \quad \text{..... (3.8)}$$

ในรูปที่ 3.8 I_{\max} มักจะเป็นค่ากระแสพิกัด (rated current) ของรีแอคเตอร์ สำหรับที่แสดงไว้เป็น 1.0 p.u.



รูปที่ 3.8 กราฟลักษณะแรงดัน/กระแสหลักมูลในตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์

3.2.3 ฮาร์โมนิกส์

ถ้าเพิ่มมุมทริกขาเกท (α) จะทำให้มุมช่วงนำกระแส (σ) ลดลงและก่อให้เกิดผลที่สำคัญ 2 ประการ คือ

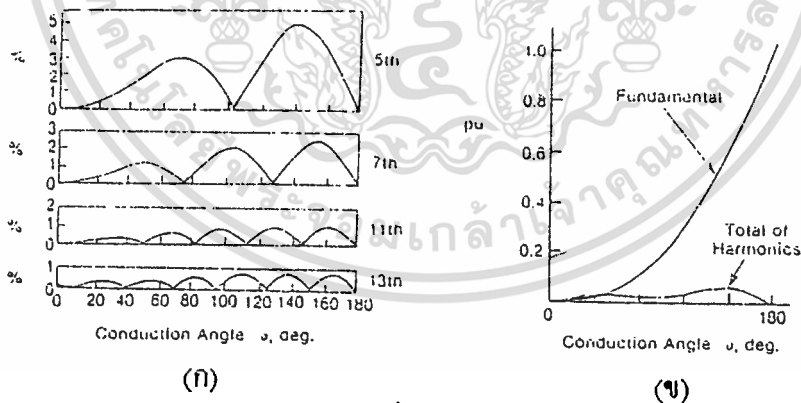
- 1) กำลังงานสูญเสียทั้งในตัวควบคุมไทรสเตอร์และรีแอคเตอร์เพิ่มขึ้น
- 2) คลื่นกระแสมีความเป็นไซน์ (sine) น้อยลง กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์สร้างกระแสที่มีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้น

ถ้ามุมทริกขาเกท (α) ของไทรสเตอร์ทั้งสองตัวเท่ากัน จะเกิดฮาร์โมนิกส์คี่ขึ้น และค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ที่ n ของกระแสจะมีค่าเป็น

$$I_n = \frac{4 V}{\pi X_L} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha \frac{\sin n\alpha}{n} \right] \quad \dots (3.9)$$

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

รูปที่ 3.9ก แสดงขนาด (amplitudes) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามมุมช่วงนำกระแสของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำๆ และรูปที่ 3.9ข แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าส่วนประกอบที่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆรวมกัน ตารางที่ 3.2 จะแสดงค่าขนาดสูงสุดของฮาร์โมนิกส์ต่างๆจนถึงฮาร์โมนิกส์ที่ 37 (โดยค่าสูงสุดมิได้เกิดที่มุมช่วงนำกระแส (σ) เดียวกัน)



รูปที่ 3.9 ฮาร์โมนิกส์ของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์

- (ก) ส่วนประกอบของกระแสฮาร์โมนิกส์หลักของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ แต่ละรูปแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของส่วนประกอบหลักมูลที่การนำกระแสเต็มที่ โดยค่าเปอร์เซ็นต์นี้จะเท่ากันทั้งในกระแสสาย (line) และกระแสเฟส
- (ข) ส่วนประกอบรวมของกระแสตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของส่วนประกอบหลักมูลที่การนำกระแสเต็มที่ โดยค่าเปอร์เซ็นต์นี้จะเท่ากันทั้งในกระแสสายและกระแสเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1

ขนาดสูงสุดของกระแสฮาร์โมนิกใน TCR

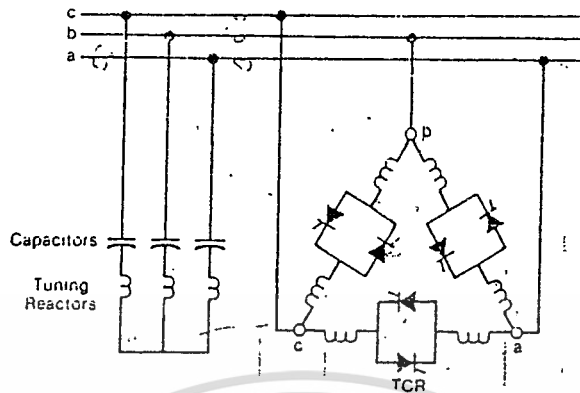
ลำดับของฮาร์โมนิก	เปอร์เซ็นต์
1	100
3	(13.78)
5	5.05
7	2.59
9	(1.57)
11	1.05
13	0.75
15	(0.57)
17	0.44
19	0.35
21	(0.29)
23	0.24
25	0.20
27	(0.17)
29	0.15
31	0.13
33	(0.12)
35	0.10
37	0.09

ค่าที่แสดงนี้เป็นเปอร์เซ็นต์ของขนาดองค์ประกอบหลักมูลที่การนำกระแสเต็มที ค่าเหล่านี้จะปรากฏทั้งในกระแสเฟสและกระแสสาย ในที่นี้สมมติว่าอยู่ในสภาวะสมดุล 3 เฟส

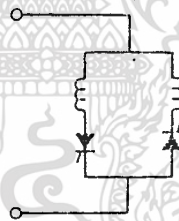
ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์สำหรับระบบ 3 เฟส จะจัดเรียงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งเสมือนเป็นตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์ 1 เฟส 3 ตัว ต่อกับแบบเดลตา ซึ่งถ้าระบบสมดุลฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 จะไหลวนอยู่ในวงปิดเดลตาและจะขาดหายไปจากกระแสสาย ส่วนฮาร์โมนิกที่เหลือทั้งหมดจะปรากฏที่กระแสสายและ ขนาดของฮาร์โมนิกดังกล่าวจะมีอัตราส่วนเดียวกับที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 และตารางที่ 3.1 อย่างไรก็ตามรูปคลื่นจะแตกต่างไปจากกระแสเฟสบ้าง ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.6

สิ่งที่สำคัญมากสำหรับตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์คือต้องมั่นใจว่ามุมช่วงนำกระแสของไคริสเตอร์คู่ต่อขานานกลับกันนั้นเท่ากัน ถ้ามุมช่วงนำกระแสไม่เท่ากันจะก่อให้เกิดส่วนฮาร์โมนิกขึ้นในกระแส และทำให้เกิดความร้อนที่ขั้วตรงข้ามของไคริสเตอร์ไม่เท่ากัน ด้วยเหตุนี้มุมช่วงนำกระแส (α) จึงจำกัดแค่ 180° อย่างไรก็ตาม ถ้าแยกรีแอกเตอร์ในรูปที่ 3.5 ออกเป็น 2 ตัวดังรูปที่ 3.11 เราจะสามารถทำให้มุมนำกระแสในแต่ละข้างสูงถึง 360° ได้ นอกจากนี้การจัดเรียงแบบนี้ยังทำให้เกิดฮาร์โมนิกน้อยกว่าในรูปที่ 3.5 แต่การสูญเสีย (power losses) จะสูงขึ้น เนื่องจากกระแสไหลวนระหว่างสองข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ 3 เฟสที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ และมีการแยกรีแอคเตอร์ของแต่ละเฟสออกเป็น 2 ส่วน เพื่อให้ตัวควบคุมแบบใช้ไทรสเตอร์ (thyristor controller) สามารถทำงานได้แม้ว่าจะเกิดฟอลต์ที่รีแอคเตอร์

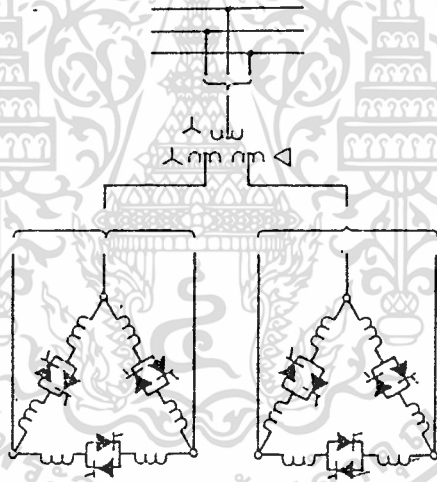


รูปที่ 3.11 ตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ที่มีมุมช่วงนำกระแสในแต่ละขามากกว่า 180° เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกส์

บางครั้งกระแสฮาร์มอนิกส์ของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์จะถูกจำกัดโดยตัวกรองฮาร์มอนิกส์ (รูปที่ 3.10) กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือในการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ 5 และที่ 7 ทำโดยการแยกตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ออกเป็น 2 ส่วน โดยป้อนจากด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงลดแรงดัน 2 ชุด ชุดหนึ่งต่อแบบสตาร์และอีกชุดหนึ่งต่อแบบเดลตา (ดังแสดงในรูปที่ 3.12) ซึ่งจะทำให้เกิดมุมเลื่อนเฟส (phase shift) ระหว่างแรงดันและกระแสของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ทั้งสองเป็น 30° และเสมือนว่าสามารถกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ 5 และที่ 7 ออกจากกระแสสายด้านปฐมภูมิได้ การต่อแบบนี้เรียกว่า "การจัดเรียงแบบ 12-พัลส์" (12-pulse arrangement) เพราะว่ามีกรทริกขาเทของไทรสเตอร์ 12 ตัวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 คาบ เทคนิคการคูณเฟส (phase-multiplication) แบบนี้จะใช้ในหม้อแปลงเรียงกระแสตรงแรงดันสูง (HVDC rectifier transformers) เพื่อกำจัดฮาร์โมนิกส์และเกี่ยวข้องกับตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์อิ่มตัวหลายเฟส (polyphase saturated reactor compensator) ของตัวชดเชยแบบตัวคูณความถี่ (frequency-multiplier) เนื่องจากมี 12-พัลส์เกิดขึ้น ดังนั้นฮาร์โมนิกส์ที่ต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นคือฮาร์โมนิกส์ที่ 11 และที่ 13 นอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้โดยไม่ต้องมีตัวกรองฮาร์โมนิกส์ที่ 5 และที่ 7 ซึ่งมีผลดีถ้าเรโซแนนซ์ของระบบเกิดขึ้นที่ความถี่ใกล้ความถี่ค่านี้นี้ สำหรับฮาร์โมนิกส์ลำดับสูงกว่าค่านี้อาจใช้ได้แค่ตัวเก็บประจุธรรมดาที่เพียงพอแล้ว โดยต่อเข้ากับด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงลดแรงดัน หรืออาจจะใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่าน (high-pass filter) ก็ได้ ส่วนเรื่องการก่อกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ภายใต้เงื่อนไขไม่สมดุล (unbalanced conditions) จะคล้ายคลึงกับการจัดเรียงแบบ 6-พัลส์ (ดังในรูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.12 การจัดเรียงตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์เป็นแบบ 12-พัลส์ โดยใช้หม้อแปลงที่มีขดลวดทุกขด 2 ชุด

ในการใช้ตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์แบบ 6-พัลส์ และ 12-พัลส์ จะต้องพิจารณาว่าต้องการ ตัวกรองฮาร์โมนิกส์หรือไม่ และมีการตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response) เป็นอย่างไร โดยคำนึงถึงความเป็นไปได้ของการเกิดสภาวะไม่สมดุล นอกจากนี้ตัวชดเชยจะต้องสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากอิทธิพลของชุดตัวเก็บประจุ (capacitor bank) และแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าข้างเคียง โดยจะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณ และบางครั้งจะต้องครอบคลุมไปถึงส่วนต่อเชื่อมระบบไฟฟ้า

เอกสารใหญ่ๆด้วย ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากที่กล่าวมาแล้วการต่อเชื่อมแบบ 12-พัลส์ยังมีข้อดีอีกคือถ้าเครื่องอันใดเสียไป อีกอันที่เหลือสามารถทำงานต่อไปได้ตามปกติ แต่มีข้อจำกัดคือระบบควบคุมจะต้องทำให้มุม เลื่อนเฟส (phase shift) ระหว่างซุกรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ 2 ชุดเป็น 30° และจะต้อง ออกแบบให้มั่นใจได้ว่าสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นได้ บางครั้งเราอาจออกแบบให้ตัวชด เชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์แบบ 12-พัลส์ ใช้หม้อแปลงแยกกัน 2 ชุดแทนหม้อ- แปลง 1 ตัวที่มีขดลวดทุกขดขด 2 ขดได้

3.2.4 ตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยไทรสเตอร์

(Thyristor-Controlled Transformer)

ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์สามารถปรับปรุงเป็นตัวชดเชยแบบ หม้อแปลงควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (TCT) ดังรูปที่ 3.13 โดยแทนหม้อแปลงลดแรงดันแยกกันและ รีแอกเตอร์เชิงเส้นด้วย หม้อแปลงที่ออกแบบให้มี รีแอกแตนซ์สูญเสีย (leakage reactance) สูงๆ โดยการใส่แกนที่มีช่องอากาศ (gapped core) และขดลวดทุกขดขดจะถูกลัดวงจรผ่านไทรสเตอร์ ควบคุม และหม้อแปลงนี้จะเป็นแบบที่ใช้หม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัว มาต่อเป็นหม้อแปลง 3 เฟส ด้วยการต่อตามรูปที่ 3.13 จะไม่มีบัสทุติยภูมิ (secondary bus) และ ตัวเก็บประจุขนานจะต้องต่อ กับแรงดันปฐมภูมิ เว้นแต่จะหาหม้อแปลงลดแรงดันแยกกันมาใช้ ค่ารีแอกแตนซ์สูญเสียสูงๆนี้ จะช่วยป้องกันหม้อแปลงจากการลัดวงจรขณะเกิดฟอลต์ทางด้านทุติยภูมิ เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจำนวนมากและความเป็นเชิงเส้นของตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ทำให้มันสามารถทนต่อระบบที่รับ (ตั้ง) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเกินพิกัดของมัน (โหลดที่มีมุมตาม เกินที่มันจะแก้ได้) ได้

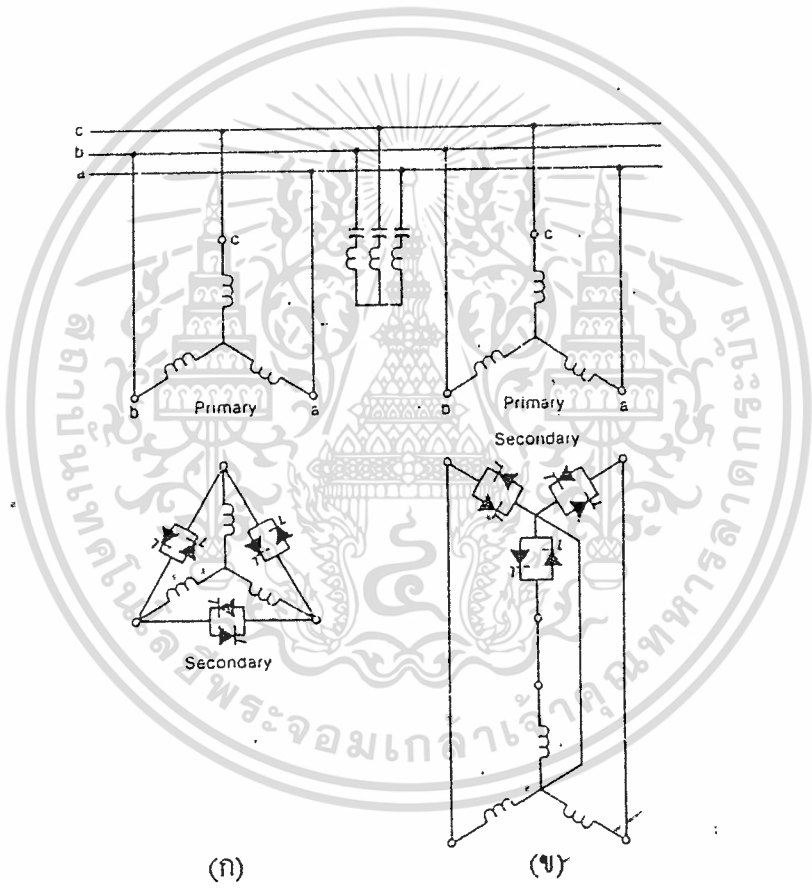
3.2.5 ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ที่มีตัวเก็บประจุต่อขนาน

(Shunt Capacitors)

สิ่งสำคัญที่ต้องทราบคือกระแสของตัวชดเชย (กระแส compensate) สามารถปรับ ค่าได้อย่างต่อเนื่อง (linear, ไม่เป็นขั้นๆ) จากศูนย์จนถึงค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อนำกระแสเต็ม คลื่น (full conduction) และกระแสนี้จะล่าหลัง (lagging) อยู่เสมอ เนื่องจากรับกำลังไฟฟ้ารีแอก- ทีฟ อย่างไรก็ตามตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์สามารถชดเชยโดยตัวเก็บประจุ ต่อขนาน ดังนั้นค่าตัวประกอบกำลังรวมจึงเป็นมุนนำและจะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับ ระบบภายนอก ถ้าเพิ่มกระแสตัวเก็บประจุเข้าไปในกระแสของตัวชดเชยดังรูปที่ 3.8 จะทำให้ กราฟลักษณะการควบคุม (control characteristic) เข้าไปสู่ควอร์รันต์ที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ใน

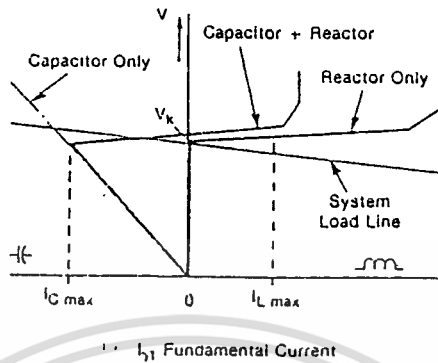
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ 3 เฟสส่วนใหญ่มักจะต่อตัวเก็บประจุแบบวาย (ดังรูปที่ 3.10) กระแสในรูปที่ 3.14 จะเป็นส่วนประกอบลำดับเฟสบวกหลักมูล (fundamental positive sequence component) และถ้ามันอยู่ในช่วงระหว่างกระแสตัวเก็บประจุสูงสุด (I_{Cmax}) กับกระแสตัวเหนี่ยวนำสูงสุด (I_{Lmax}) ลักษณะการควบคุมจะเป็นไปตามสมการที่ (3.8) อย่างไรก็ตามถ้าอัตราขยายของโวลเตจเรกูเรเตอร์ (voltage regulator gain) ไม่เปลี่ยนแปลง ความชันของรีแอกแตนซ์ X_S จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.13 การเรียงสลับกันของตัวชั้ดเซขแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยไทรสเตอร์

- (ก) รีแอกเตอร์ที่ต่อกันแบบวายและไทรสเตอร์ควบคุม (thyristor controller) ที่ต่อแบบเดลตา
- (ข) รีแอกเตอร์และไทรสเตอร์ควบคุมที่ต่อกับแบบวาย (ใช้ในระบบ 3 เฟส 4 สาย)



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของตัวชดเชย

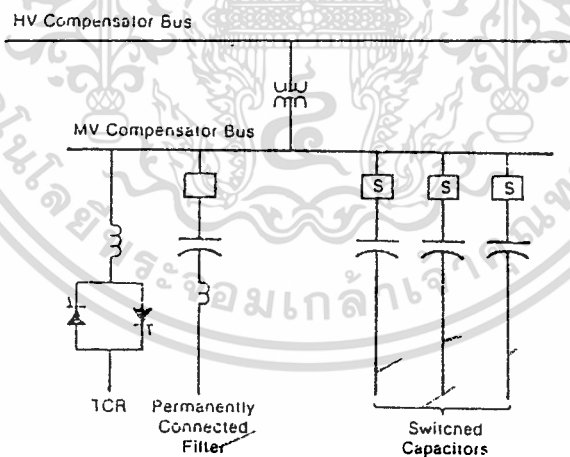
โดยทั่วไปกลุ่มตัวเก็บประจุขนาน (shunt capacitor banks) มักจะแบ่งตัวเก็บประจุออกเป็นกลุ่ม 3 เฟสมากกว่า 1 กลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มจะแบ่งแยกกันโดยใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดต่อวงจร กลุ่มตัวเก็บประจุสามารถปรับค่าความถี่โดยตัวรีแอคเตอร์เล็ก ๆ อนุกรมเข้าในแต่ละเฟส ซึ่งจะช่วยกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากตัวชดเชยและป้องกันฮาร์โมนิกส์จากระบบอื่น ทางเลือกที่เป็นไปได้ทางหนึ่งคือให้มีกลุ่มที่ปรับความถี่ให้เป็นความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 และที่ 7 และจัดให้กลุ่มอื่นเป็นตัวกรองความถี่สูงผ่าน (high-pass filter) แต่การต่อตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองฮาร์โมนิกส์นี้จะต้องพิจารณาถึงการเกิดเรโซแนนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่จุดต่อด้วย

การใช้งานตัวชดเชยจำเป็นต้องขยายการทำงานทั้งในช่วงมุมตาม (lagging) และมุมตาม (leading) ชุดรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์ที่ต่อเข้ากับตัวเก็บประจุไม่มีทางที่จะมีกระแสล่าหลัง (lagging current) นอกเสียจากกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์จะมีค่าเกินพิกัดของตัวเก็บประจุ พิกัดกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟที่ตัวชดเชยสามารถจ่ายได้จะเท่ากับผลต่างระหว่างพิกัดของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์กับตัวเก็บประจุ ในกรณีที่พิกัดความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์มากเกินไป (เช่น การนำไปใช้งานในระบบสายส่งที่ต้องการกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟหลายร้อย MVAR) ทำให้กำลังไฟฟ้รีแอคทีฟรวมเป็นมุมตาม (lagging) และกระแสรีแอคทีฟปริมาณมากไหลวนอยู่ระหว่างชุดรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์กับตัวเก็บประจุ โดยไม่ได้ใช้ประโยชน์ใดๆเลยในระบบไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ตัวเก็บประจุจะถูกแบ่งเป็นกลุ่มย่อย เพื่อที่จะสามารถ ปรับองศา (degree) ของการไบแอสความจุ (capacitive bias) ในกราฟคุณลักษณะแรงดัน/กระแสได้ ซึ่งถ้าทำแล้วเราสามารถใส่ตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์ที่มี

เอกสารขนาดเล็กลงได้ แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.15 ซึ่งมีการแบ่งตัวเก็บประจุต่อขนาน (shunt capacitor) ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกเป็น 3 กลุ่ม และจะต้องมีตัวควบคุมตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมตามจำนวนของตัวเก็บประจุที่มาต่อ โดยต้องออกแบบให้ครอบคลุมกราฟคุณลักษณะของแรงดัน/กระแสทั้งหมดอย่างต่อเนื่อง เมื่อกลุ่มตัวเก็บประจุถูกตัดต่อ มุมช่วงนำกระแสก็จะถูกปรับพร้อมด้วยสัญญาณอ้างอิงอื่น ดังนั้นเมื่อกำลังไฟฟารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นหรือลดลง ก็จะถูกทำให้สมดุลโดยการเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟแบบเหนี่ยวนำของตัวชดเชยในปริมาณเดียวกัน ภายหลังจากนั้นมุมช่วงนำกระแสก็จะถูกปรับอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของระบบ จนกว่าจะมีการสับสวิตช์ตัวเก็บประจุอีก

การปฏิบัติงานของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์และตัวเก็บประจุขนานที่ตัดต่อได้ (switched shunt capacitors) ที่ต่อกันแบบไฮบริด (hybrid) จะขึ้นอยู่กับเทคนิควิธีการสวิตช์ตัวเก็บประจุ วิธีการสวิตช์ที่ใช้ค่าใช้จ่ายถูกที่สุด คือ การใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบธรรมดา ซึ่งถ้าการปฏิบัติงานมีการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะแรงดัน/กระแสขึ้นๆลงๆ จะทำให้มีการสวิตช์อยู่บ่อยๆ ซึ่งทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานหนัก ต้องซ่อมแซมบ่อยและเสียเร็ว นอกจากนี้การนำไปใช้งานในระบบสายส่ง ถ้าระบบเกิดฟอลต์อย่างรุนแรง จะทำให้มีการสับสวิตช์เข้าออกซ้ำๆ ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุและเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานหนักมาก



รูปที่ 3.15 ตัวชดเชยแบบไฮบริดที่มีการสวิตช์ตัวต่อตัวเก็บประจุและปรับรีแอกเตอร์ด้วยไทรสเตอร์ สวิตช์ s อาจเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบกลไกหรือเป็นไทรสเตอร์

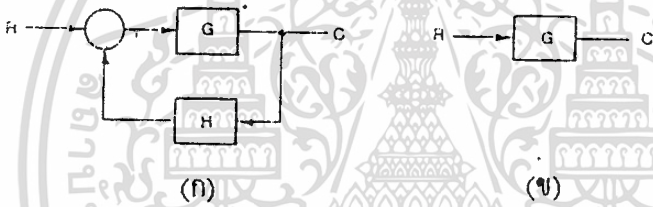
ปัญหานี้ ถ้าเกิดกับตัวชดเชยที่ใช้ไทรสเตอร์ควบคุม (thyristor controllers) การสวิตช์ตัวเก็บประจุแทนเซอร์กิตเบรกเกอร์จะไม่ส่งผลกระทบมากนัก เนื่องจากไทรสเตอร์สามารถสวิตช์ตัดต่อได้อย่างไม่จำกัดและสามารถสวิตช์ได้ด้วยเวลาที่แน่นอน จึงช่วยลดความรุนแรงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสวิตช์เมื่อเกิดปัญหานี้ขึ้น ส่วนมากจำนวนกลุ่มของตัวเก็บประจุที่ตัดต่อได้ (switched capacitor) ในระบบสายส่งมักจะไม่เกิน 4 กลุ่ม

3.2.6 การควบคุม

จุดประสงค์ขั้นต้นของตัวชดเชย คือ ลักษณะของแรงดัน/กระแสของมัน ลักษณะและชนิดของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์ถูกแสดงในรูปที่ 3.8 สักคาและกระแสของตัวชดเชยถูกหาได้โดยรีแอกเตอร์และมุมเหนี่ยวนำ (α) ซึ่งแต่ละจุดของการเน้นจะแสดงรายละเอียดของค่าความนำจินตภาพ (B_L) ตามสมการที่ (3.6) และ (3.7) มันจะถูกแสดง (ในบทที่ 2) ว่าตัวชดเชยจะปฏิบัติในส่วนของแรงดันต่อกระแสหลักมูล (V/I_L) และระบบสายภาระ(System Load Line) การควบคุมแบบอัตโนมัติจะปรับรายละเอียดซึ่งเป็นตามเงื่อนไขที่พอใจ



รูปที่ 3.16 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุม

(ก) การควบคุมแบบวงปิด , $C=RG/(1+GH)$

(ข) การควบคุมแบบวงเปิด , $C=RG$

โดย H = ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันป้อนกลับ

G = ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันเดินหน้า

R = ตัวอ้างอิง

C = ตัวแปรที่ถูกควบคุม

การควบคุมนั้นแบ่งเป็นพื้นฐานได้ 2 ชนิด ซึ่งจะใช้การควบคุมแบบวงปิด (closed-loop) หรือแบบวงเปิด (open-loop) ในการควบคุม โดยที่การควบคุมแบบวงปิดจะเป็นแบบป้อนกลับดังรูปที่ 3.16ก ส่วนการควบคุมแบบวงเปิดเป็นแบบที่ไม่มีป้อนกลับดังรูปที่ 3.16ข ซึ่งทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของการป้อนไปข้างหน้าคือ G ซึ่งจะถูกรวมไว้ล่วงหน้าให้ผลออกมาเป็นค่าของ C เมื่อป้อนค่า R เข้าไป และไม่มีการนำผลของค่า C มาเปรียบเทียบกับและตรวจสอบโดยเงื่อนไขการคำนวณจะรวมอยู่ในฟังก์ชัน G แต่ถ้าเกิดเหตุการณ์ในการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้ล่วงหน้าของระบบ C ที่ได้จะไม่เป็นตามแผนที่วางไว้ การพัฒนาระบบการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบวงปิดจะให้ผลที่ถูกต้องกว่า แต่ระบบการควบคุมแบบวงเปิดจะมีข้อดีตรงได้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว

การควบคุมแบบวงเปิด

การควบคุมแบบวงเปิดมีจุดสำคัญคือมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว ซึ่งเป็นพื้นฐานที่ถูกประยุกต์ในการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณป้อนขาของไครสเตอร์ โดยทั่วไปการควบคุมแบบวงเปิดจะเป็นดังรูปที่ 3.17 ความรู้สึกไวต่อการคำนวณ (susceptance calculators = SC) จากสัญญาณซึ่งแสดงการวัดศักดาและกระแสของภาระ การใส่ตัวชดเชยจะเป็นที่ต้องการ ความต้องการที่จะชดเชยได้ไวในจำนวนเส้นทางที่แตกต่างกัน สัญญาณที่แสดงถึงกระบวนการ การคำนวณมุมเหนี่ยวนำ (CAC) ในการผลิตสัญญาณแสดงถึงค่าความนำจินตภาพที่จะต้องชดเชยตามสมการ

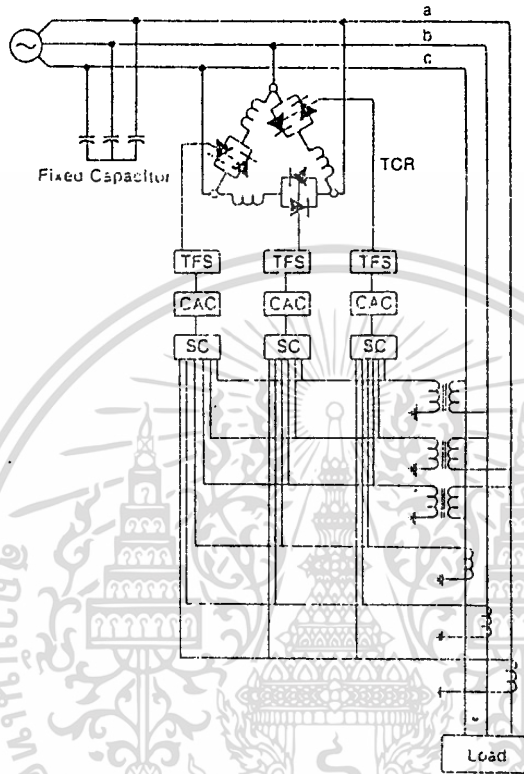
$$B_Y = B_L(\sigma) - B_C \quad \dots\dots (3.10)$$

เมื่อ $B_L(\sigma)$ คือค่าที่ได้จากสมการ (3.7) และรูปที่ 3.7 ในผลการแก้สมการหาค่าของ σ ในสมการที่ 3.7 จะไม่เป็นเชิงเส้น จะมี 1 วิธี คือ สร้างวงจรโดยมีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $K_2\pi/(\sigma - \sin\sigma)$ เมื่อใส่ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันนี้ลงไปในตัวชดเชย สมการที่ (3.7) ซึ่งผลออกมาความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการสัญญาณที่มีความรู้สึกไวกับการชดเชยกับการชดเชยที่ถูกต้องต่อความรู้สึกไวเป็นเชิงเส้นซึ่งแสดงใน รูปที่ 3.18 เป็นการแสดง 1 เฟส K_1 และ K_2 เป็นอัตราขยายที่ปรับค่าได้ มันจะชี้ว่าความแน่นอนในการสร้างสัญญาณแสดงความต้องการ ค่าของความนำจินตภาพจะไม่ถูกแสดงในระบบควบคุมตัวชดเชยทั้งหมด

การควบคุมแบบวงเปิดสำหรับการชดเชยภาระ ซึ่งต้องการผลตอบสนองตัวชดเชยที่รวดเร็ว โดยใส่ค่าของความนำเชิงซ้อน (admittance) ลงในคอมพิวเตอร์ โดยได้รายละเอียดจาก ศักดาและกระแสของภาระ ซึ่งโวลเตจเรกูเลตติ้ง (voltage-regulating) ในฟังก์ชันในการควบคุมนี้ จะไม่แน่นอน

การควบคุมแบบวงปิด

สำหรับการควบคุมแบบวงเปิดจะไม่สามารถประยุกต์ใช้ในจุดของการควบคุมระบบเครือข่ายสายส่งจากภาระและแหล่งจ่ายซึ่งจะต้องทำให้ศักดาเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ดังนั้นจึงต้องให้การควบคุมแบบวงปิด ศักดาที่คลาดเคลื่อน (ความแตกต่างระหว่างศักดาแบบจริงและการอ้างอิงที่ประยุกต์เข้าไปในตัวชดเชย) ถูกวัดและใช้ตัวชดเชยในการเพิ่มและลดจนกระทั่งศักดาที่คลาดเคลื่อนลดลงถึงระดับที่ยอมรับได้ รูปที่ 3.19 แสดงการควบคุม



รูปที่ 3.17 การควบคุมตัวชดเชยแบบวงปิด

TFS = ระบบป้อนมุมทริกโรริสเตอร์ (Thyristor Firing (gating) System)

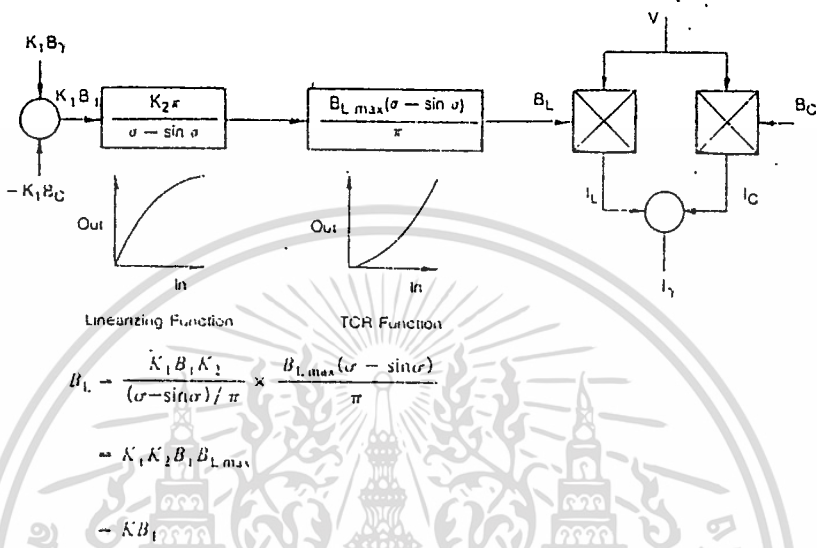
CAC = การคำนวณมุมช่วงนำกระแส (Conduction Angle Calculator)

SC = การคำนวณค่าความนำจินตภาพ (Susceptance Calculator)

อัตราส่วนของกระแสชดเชยและศักดาที่คลาดเคลื่อนหาจากความชันของศักดา/กระแส ความเร็วในการตอบสนองและเสถียรภาพถูกหาโดยผลรวมของอัตราขยายและค่าคงที่เวลาของระบบ อัตราขยายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายหรือระบบ ซึ่งหมายความว่าอิมพีแดนซ์ระบบเพิ่มขึ้น ตัวชดเชยก็จะมีผลตอบสนองเร็วขึ้น แต่จะมีเสถียรภาพน้อย จากความสัมพันธ์ระหว่างศักดาคลาดเคลื่อนและกระแสชดเชยจะไม่ใช่เชิงเส้นและจำเป็นต้องมีโครงข่ายเชิงเส้น (เหมือนการคำนวณความนำจินตภาพ) ความถูกต้องที่กำหนดจะขึ้นอยู่กับความเป็นเชิงเส้น เสถียรภาพ และความถูกต้องของส่วนประกอบทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.19 นอกจากนี้

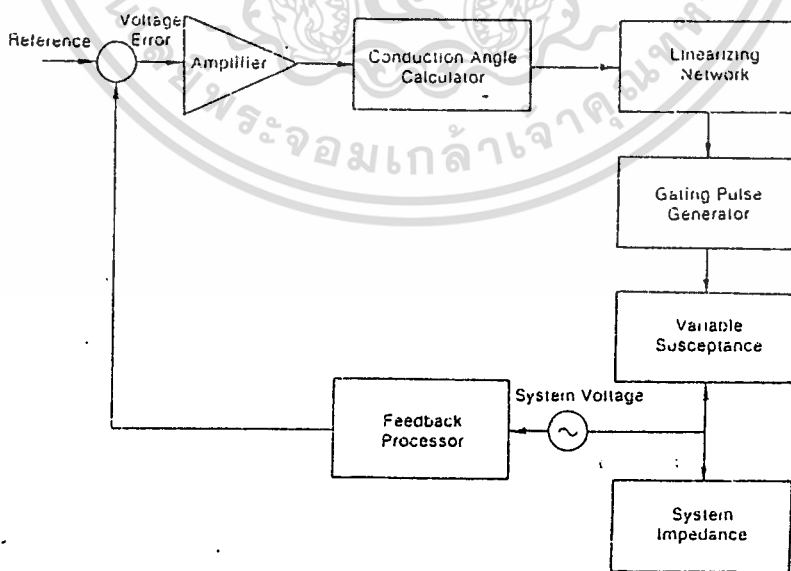
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ของระบบซึ่งหมายถึงอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ , รีแอกแตนซ์ และหม้อแปลงจะต้องเป็นค่าคงที่



รูปที่ 3.18 บล็อกไดอะแกรมของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์

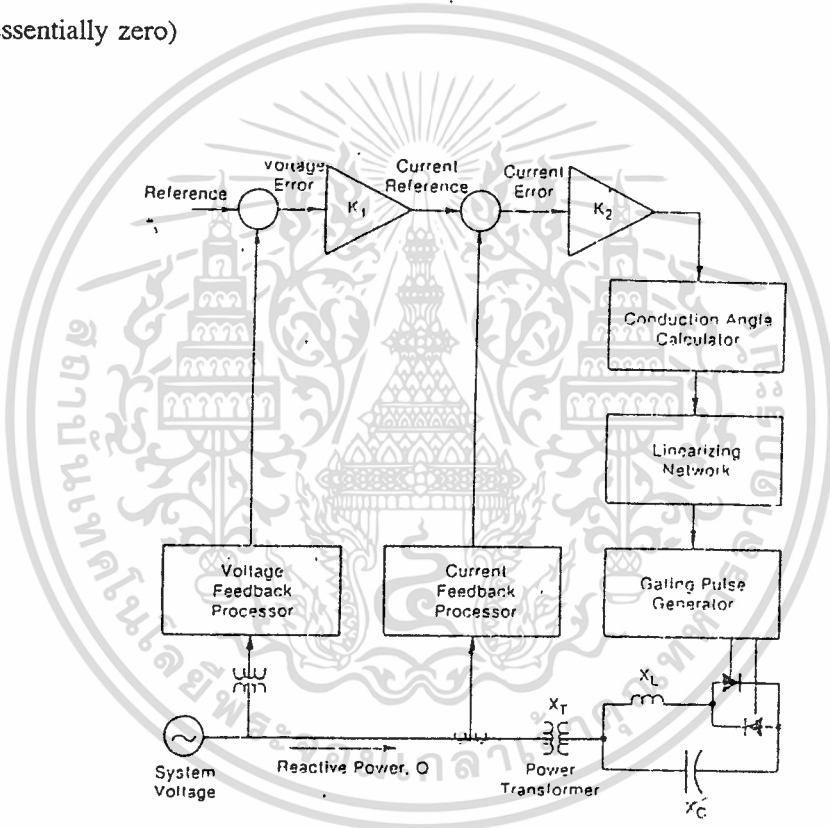
$K_1 B_1 \gamma$ = สัญญาณที่บอกค่าความนำจินตภาพ (susceptance) ที่ต้องการชดเชย (คำนวณจากแรงดันและกระแสของโหลด)



รูปที่ 3.19 ตัวชดเชยที่มีโวลเตจเร็กกูเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถูกต้องจะถูกทำให้ดีขึ้นโดยใช้ 2 วงรอบการควบคุม (control loop) (รูปที่ 3.20) และภายในวงรอบการควบคุม ผลของรีกกูเลเตอร์ของกระแส (current regulator) ถูกใส่เข้าไปในโวลเตจเร็กกูเลเตอร์ ถ้าอัตราขยายสูงมากกว่าค่าคลาดเคลื่อนของกระแสสามารถจะละทิ้งได้ ซึ่งหมายความว่า การควบคุมกระแสรีแอคทีฟที่แปรผันโดยตรงกับศักดาคลาดเคลื่อน ค่าที่อิสระของ X_L, X_C, X_T ค่าอิสระอัตราขยายอิมพีแดนซ์ของการคำนวณช่วงมุมนำกระแส โครงข่ายเชิงเส้น และการสร้างสัญญาณป้องกันเกทลักษณะความชันของการควบคุมถูกหาโดยอัตราขยาย K_1 การขยายคลาดเคลื่อนของกระแส (K_2) อาจจะรวมไปในกระแสคลาดเคลื่อนคือ ค่าศูนย์ที่จำเป็น (essentially zero)



รูปที่ 3.20 ตัวชดเชยที่มีโวลเตจเร็กกูเลเตอร์และเร็กกูเลเตอร์ของกระแส

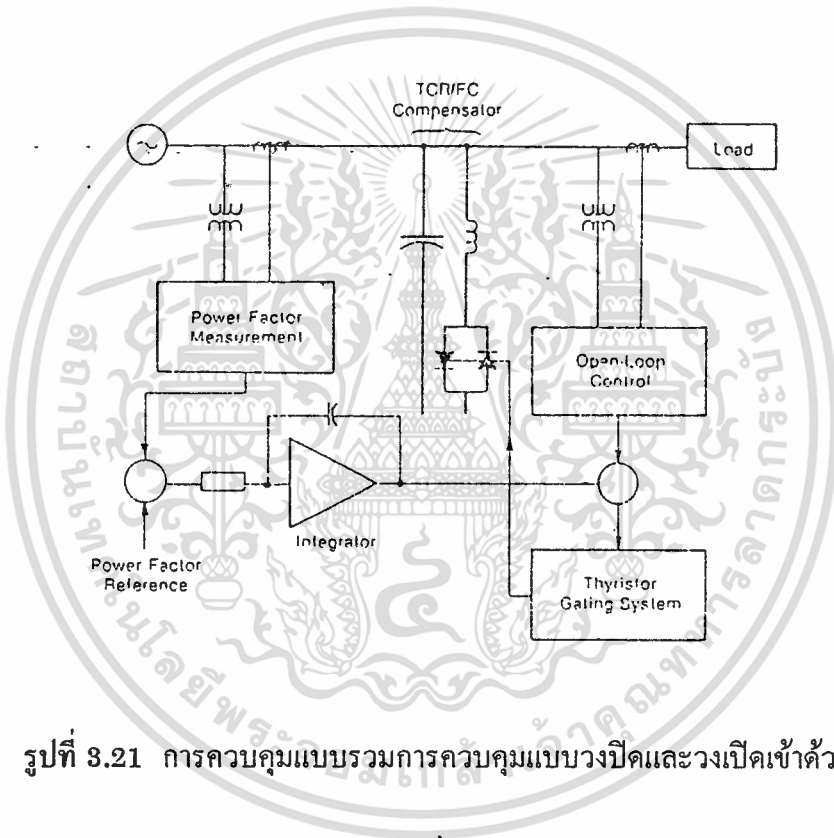
การรวมกันของ ระบบควบคุมแบบวงเปิดและแบบวงปิด

การควบคุมพื้นฐานทั้ง 2 ชนิด ถูกใช้ร่วมกันดังรูปที่ 3.21 ดังตัวอย่างในการชดเชยภาระ (ซึ่งอาจมีระบบการควบคุมวงเปิดดังรูปที่ 3.17) มันจะต้องใส่วงปิดเพื่อควบคุมการรักษาปริมาณค่าเฉลี่ยตามเงื่อนไขที่กำหนด การเป็นไปได้คือ ค่าเฉลี่ยรวมของค่าตัวประกอบกำลังจะเป็นตามเงื่อนไขที่กำหนด(ของภาระรวมกับการชดเชย) ความเป็นไปได้อีกอย่างหนึ่ง คือ การกำหนดผลรวมสุทธิของการชดเชยไปสู่การเฉลี่ยค่าศูนย์ MVAR ซึ่งหมายถึง ในช่วงภาระคงที่ที่จะไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้ กรุณาแจ้งให้เจ้าของเอกสารทราบทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชดเชย แต่จะมีการชดเชยที่รวดเร็วกว่าใส่เข้าไปในวงเปิดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระความเร็วในการตอบสนองของค่าตัวประกอบกำลังของระบบควบคุมวงปิด หรือกำลังไฟฟ้าย้อนที่พ่วงที่ได้อาจจะเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบวงเปิด

การควบคุมแบบการควบคุมวงปิด (open loop) จะมีผลตอบสนองใน 1 รอบ ส่วนการควบคุมวงปิด (closed loop) จะมีผลตอบสนองใน 1 วินาที



รูปที่ 3.21 การควบคุมแบบรวมการควบคุมแบบวงปิดและวงเปิดเข้าด้วยกัน

3.2.7 ลักษณะอื่นๆของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์

ความเร็วในการตอบสนอง

ในหัวข้อ 3.2.1 แสดงถึงมุมมองของการเหนี่ยวนำในเฟสใดๆของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์สามารถที่จะเปลี่ยนได้โดยระหว่างครึ่งรอบของความถี่ที่ป้อนเข้าไป ซึ่งกำหนดว่ามุมช่วงนำกระแส (σ) จะเหลือน้อยกว่า 180° สุดท้ายผลตอบสนองที่รวดเร็วจึงจะถูกต้องการประยุกต์ระบบแรงดันสูง เมื่อเสถียรภาพและความถูกต้องของระบบควบคุมมีความสำคัญมากกว่า ดังนั้นเวลาในการตอบสนองของตัวชดเชยซึ่งใส่ตัวเก็บประจุสามารถจะเป็น 2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบเล็กๆของความถี่กำลัง สำหรับการจ่ายศักดาสูงสุดในการอาร์คเตาเผา จะใช้ผลตอบสนองที่รวดเร็วเป็นสิ่งสำคัญ และผลตอบสนองทางธรรมชาติของตัวชดเชยทั้งแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ และ แบบไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ

การควบคุมเฟสที่เป็นอิสระ

มันเป็นลักษณะประจำตัวของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ที่สำคัญซึ่งสามารถถูกควบคุม 3 เฟส ที่อิสระต่อกันและตัวชดเชยสามารถทำให้เฟสสมดุลได้ดังในบทที่ 2 ความถูกต้องของเฟสสมดุลจะไม่ดีทีเดียว ตัวเก็บประจุนาน ซึ่งใช้ชดเชยรีแอคเตอร์จะไม่จำกัดความสามารถในการสมดุลเฟส ในโครงข่ายชดเชยอาจมีความต้องการทั่วไปทั้งการเหนี่ยวนำและการเก็บประจุ นอกจากนี้ความนำเชิงซ้อนในแต่ละเฟสและความไม่สมดุลของชดเชยรีแอคเตอร์อาจจะก่อเกิดฮาร์โมนิกส์ที่มากกว่าภายในเงื่อนไขที่สมดุล การเพิ่มตัวกรองฮาร์โมนิกส์ (Filter) เป็นสิ่งที่จำเป็น โดยฮาร์โมนิกส์จะปรากฏในกระแสสาย (line)

ผลตอบสนองของศักดาเกินและศักดาค่า

สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งของตัวชดเชยแบบสถิต (Static Compensator) คือ การแสดงพฤติกรรมภายใต้เงื่อนไขของศักดาที่สูงเกินไปและต่ำเกินไป การอ้างอิงสถานะคงตัวแรงดันต่อกระแสหลักมูล (V/I_1) ในรูปที่ 3.8 ถ้าศักดาของระบบเพิ่มขึ้น มุมเหนี่ยวนำจะขึ้นสู่ค่าสูงสุดตามกันการควบคุมจะถูกจำกัด และกระแสหลักมูลจะสัมพันธ์กับชดเชยรีแอคเตอร์ ซึ่งปกติพฤติกรรมของรีแอคเตอร์เป็นเชิงเส้น รีแอคแตนซ์ของชดเชยรีแอคเตอร์จะมากเกินไปที่จะจำกัดการเพิ่มศักดาของระบบภายใต้เงื่อนไขสำคัญสุดท้ายนี้และมีความจำเป็นในการที่จะเริ่มลดมุมเหนี่ยวนำเพื่อป้องกันไทรสเตอร์จากความร้อนที่รอยต่อ (junction) ซึ่งสาเหตุมาจากกระแสที่สูงเข้ามาเกี่ยวข้องกับ

การควบคุมไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีผลจากอุณหภูมิ วงจรไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะทำให้เกิดอุณหภูมิที่รอยต่อที่สูงซึ่งเกิดจากศักดาที่สูง การกำจัดกระแสของการควบคุมถูกแสดงในรูปที่ 3.8 หม้อแปลงแปลงลงจะเริ่มอิ่มตัวและกระแสสร้างแม่เหล็ก (magnetizing) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ศักดาสูงๆ , แต่มันจะมีตำแหน่งซึ่งเป็นผลในการช่วยยึดศักดาให้ลดลงเหมือนกับการประยุกต์ในตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ศักดาในการอิ่มตัวของหม้อแปลงจะไม่ถูกตั้งให้ต่ำเกินไปมันจะมีปัญหากับแกนเหล็กเกิดขึ้น ในระดับแรงดันที่สูงการวัดและการป้องกันในการที่จะใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์และอุปกรณ์ป้องกันเสร็จในการเกิดโหลดเกินในช่วงการควบคุมปกติของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์จะเป็นไปได้

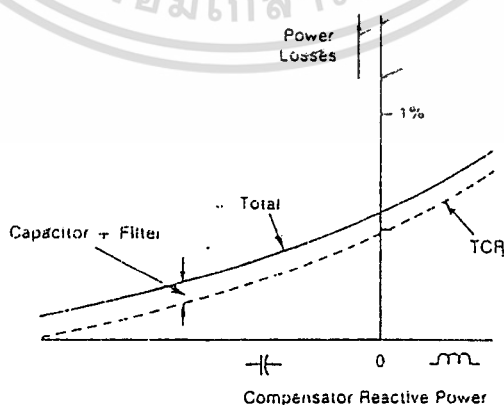
เมื่อศักดาของระบบตกลงในช่วงของการควบคุมของตัวชดเชย มันมีพฤติกรรม

เหมือนกับการใส่ตัวเก็บประจุ ไทรสเตอร์จะปิดมุมเฟส (phased off) ถ้าตัวเก็บประจุแบบขนาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขาดไปหรือปิดสวิตช์ ตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยโรติเตอร์จะไม่มีผล มันเป็นพฤติกรรมซึ่งศักดาสามารถกลับคืนหลังจากเคลียร์ฟอลต์ (clear fault) ไปสู่ค่าเริ่มต้น และในกรณีของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติเตอร์จะเป็นตำแหน่งในการจำกัดศักดาเกิน มันจะถูกติดตั้งเพื่อใช้ชดเชยทั้งมุมนำและมุมตาม และแก้ปัญหาการแกว่งของกำลัง (damping power swings) และตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติเตอร์จะถูกควบคุมโดยการป้อนกลับสัญญาณ

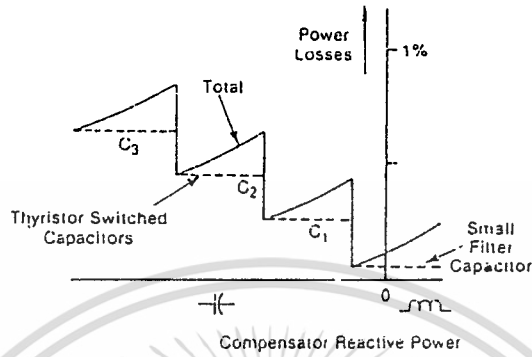
กำลังสูญเสีย

การสูญเสียกำลังโดยตัวชดเชยเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา เพราะว่าพลังงานมีราคาสูงค่าหลักของการสูญเสียสามารถถูกเปรียบเทียบกับราคาเมื่อมีตัวชดเชย ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติเตอร์ซึ่งค่อนข้างนานกับตัวเก็บประจุจะมีความสูญเสียเพิ่มขึ้นกับการเหนี่ยวนำในตัวชดเชย ซึ่งแสดงใน รูปที่ 3.22 เหมือนเป็นเปอร์เซ็นต์ของอัตรากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แบบตัวเก็บประจุนั้นรวมไปถึงความสูญเสียกับความต้านทานในรีแอกเตอร์ การเหนี่ยวนำสวิตช์ และความสูญเสียอื่นในระบบควบคุมโรติเตอร์ (หม้อแปลงและความสูญเสียในอุปกรณ์เสริมไม่ถูกนำมารวมใน รูปที่ 3.22) ความสูญเสียจะลดลงเมื่อเป็นกำลังรีแอกทีฟนำหน้า และความสูญเสียจะเพิ่มขึ้นเมื่อเป็นกำลังรีแอกทีฟตามหลังแนวทางซึ่งตรงกันข้ามถูกทำได้โดยตัวชดเชยไฮบริด เมื่อตัวเก็บประจุเป็นกลุ่มของสวิตช์ และขนาดเล็กกว่าชุดรีแอกเตอร์ ความสูญเสียสำหรับชนิดของตัวชดเชยเป็นไปตาม รูปที่ 3.23 ตัวอย่างคือ ตัวเก็บประจุที่ใช้ตัวเก็บประจุตัดต่อซึ่งตัวเก็บประจุใช้สวิตช์ทางกล ลักษณะจะเหมือนแบบตัวอย่างต่างๆไป แต่ความสูญเสียในตัวเก็บประจุ (leading) จะลดลงมาก



รูปที่ 3.22 ลักษณะกราฟของกำลังงานสูญเสียของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้ระบบเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้วางไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ควบคุมด้วยโรติเตอร์ซึ่งมีตัวเก็บประจุของขานานและมีตัวกรองฮาร์โมนิกส์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 ลักษณะกราฟของกำลังงานสูญเสียของตัวชดเชยแบบ ไทริสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ระบบควบคุมการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต

จากหลักการการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโครงการนี้ใช้การปรับค่ามุมนำกระแสของ ทรินสเตอร์ ทำหน้าที่ปรับค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำซึ่งต่อขนานอยู่กับตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 1.2 โดยใช้คอมพิวเตอร์คำนวณค่ามุมนำกระแสของ ทรินสเตอร์ จากค่าความนำจินตภาพ (susceptance) ที่จะต้องชดเชย สำหรับค่าความนำจินตภาพนี้คำนวณได้จากแรงดันสายและกระแสสาย ที่อยู่ในรูปเฟสเซอร์ ในการหาค่าแรงดันสายและกระแสสายนี้ใช้หม้อแปลงแรงดันและหม้อแปลงกระแสวัดค่าจากระบบ แล้วใช้การ์ด pci-818 แปลงข้อมูลอะนาลอกเป็นข้อมูลดิจิทัลเก็บไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้โดยการแปลงฟาสต์ฟูรีเยอร์ที่จะได้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันสายและกระแสสาย

4.1 การทำงานของระบบควบคุม

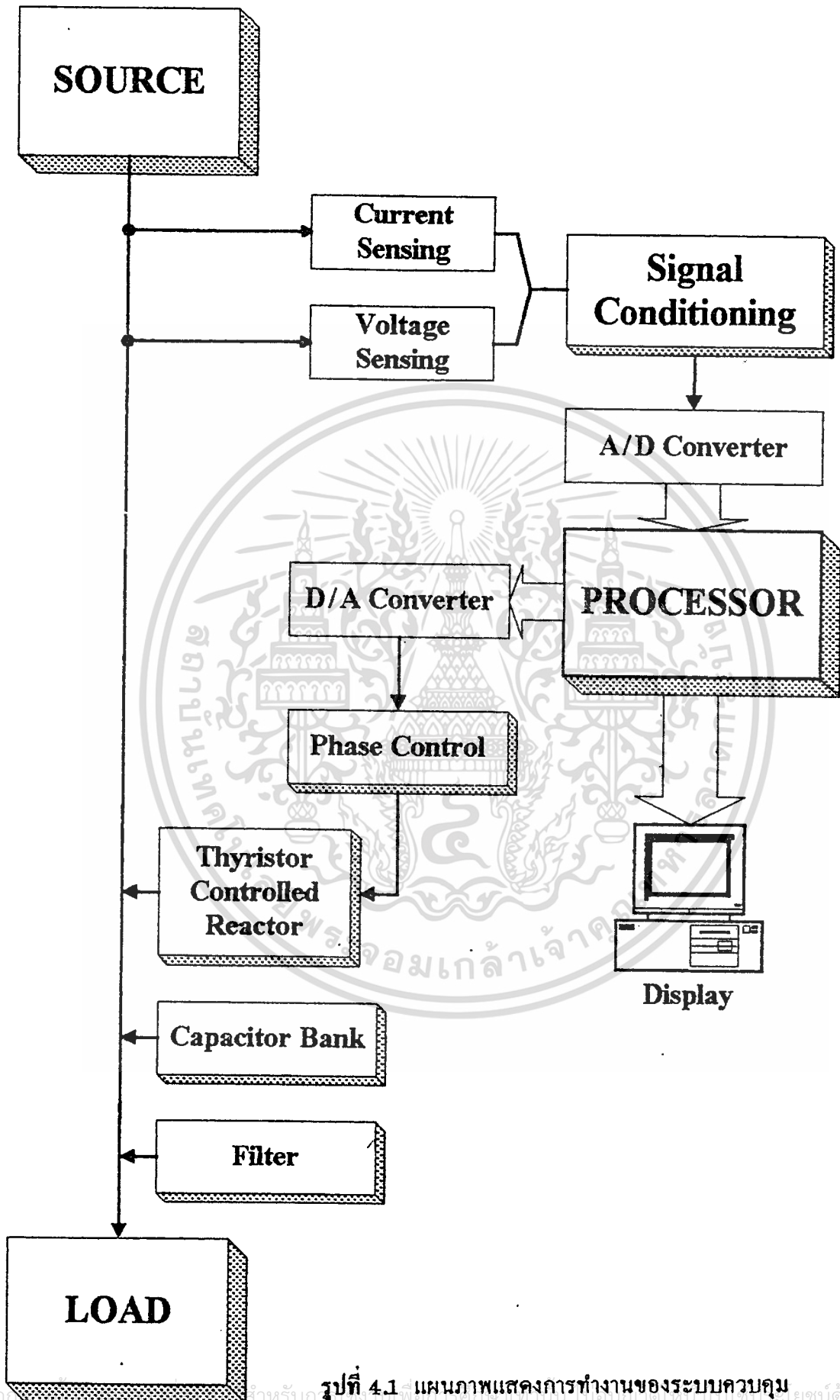
การทำงานของระบบควบคุมตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสามารถสรุปเป็นแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

1. วัดค่าแรงดันสายและกระแสสายจากระบบไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงแรงดันและหม้อแปลงกระแส และแปลงค่าที่วัดได้ให้อยู่ในรูปแรงดัน สำหรับรายละเอียดของวงจรรับค่ากระแสและแรงดันอยู่ในหัวข้อ 4.2

2. สุ่มตัวอย่าง (Sampling) คลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสโดยผ่านพอร์ตรับสัญญาณอะนาลอก (Analog Input) ของการ์ด "PCL-818" ซึ่งจะแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นข้อมูลดิจิทัลเก็บไว้ในหน่วยความจำตามตำแหน่งที่จองไว้ โดย

- ช่องสัญญาณ 0 รับค่าแรงดันระหว่างสาย ab (V_{ab})
- ช่องสัญญาณ 1 รับค่ากระแสสาย a (I_a)
- ช่องสัญญาณ 2 รับค่ากระแสสาย b (I_b)
- ช่องสัญญาณ 3 รับค่ากระแสสาย c (I_c)

3. วิเคราะห์คลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ที่ได้จากการสุ่มค่าผ่านการ์ด PCL-818 โดยใช้การแปลงฟาสต์ฟูรีเยอร์ (FFT) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้ใช้เวลานในการคำนวณลดลง ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงฟาสต์ฟูรีเยอร์คือค่าขนาดและมุมเฟสของฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆที่ป้อนอยู่ในคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส ทำให้เราสามารถหาค่าอาร์เอ็มเอสที่แท้จริง (True RMS) จากสูตร

$$\begin{aligned} \text{True RMS Value} &= \sqrt{I_{1\text{ rms}}^2 + I_{2\text{ rms}}^2 + I_{3\text{ rms}}^2 + \dots + I_{n\text{ rms}}^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{I_{1\text{ max}}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{2\text{ max}}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3\text{ max}}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{n\text{ max}}}{\sqrt{2}}\right)^2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_{1\text{ max}}^2 + I_{2\text{ max}}^2 + I_{3\text{ max}}^2 + \dots + I_{n\text{ max}}^2} \quad \dots(4.1) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{h=1}^n (I_{h\text{ max}})^2 \end{aligned}$$

สำหรับค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) สามารถหาได้จาก

$$\text{P.F.} = (\text{DPF}) \times (\text{DTF}) \quad \dots\dots(4.2)$$

เมื่อ P.F. คือ ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor)
DPF คือ ตัวประกอบการกระจัด (Displacement Factor)
DTF คือ ตัวประกอบการเพี้ยน (Distortion Factor)

ก) ตัวประกอบการกระจัด หาจาก

$$\text{DPF} = \cos \phi \quad \dots\dots(4.3)$$

เมื่อ ϕ เป็นมุมระหว่างแรงดันกับกระแสหลักมูล (Fundamental Current) ซึ่งคำนวณมาจากผลต่างของมุมของคลื่นหลักมูลของกระแสเทียบกับคลื่นหลักมูลของแรงดัน โดยที่มุมของคลื่นหลักมูลนี้จะได้จากการวิเคราะห์คลื่นสัญญาณด้วยการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์

ข) ตัวประกอบการเพี้ยน หาจาก

$$\text{DTF} = \frac{I_{s1}}{I_s} \quad \dots\dots(4.4)$$

เมื่อ I_{s1} เป็นค่ากระแสหลักมูล (Fundamental Current)

I_s เป็นค่ากระแสรวมทุกค่าฮาร์โมนิกส์ (True RMS) กล่าวคือ

$$I_s = \sqrt{I_{s1}^2 + \sum_{h=2}^n I_{sh}^2} \quad \dots\dots(4.5)$$

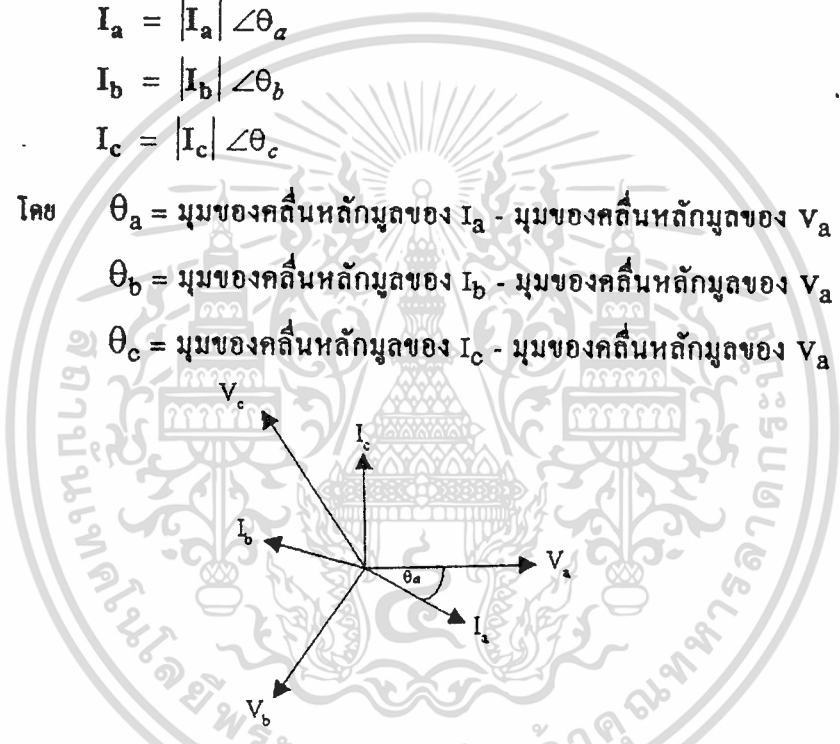
และ I_{sh} เป็นค่าฮาร์โมนิกส์ที่ h

4. หลังจากได้ค่าอาร์เอ็มเอสและมุมของแรงดันเฟส a (V_a) และค่ากระแสอาร์เอ็มเอส ทั้งสามเฟสแล้ว จะแปลงค่าเหล่านี้ให้อยู่ในรูปเฟสเซอร์ (phasor) ซึ่งมีขนาดและมุมเฟส โดยให้ V_a เป็นเฟสเซอร์อ้างอิง ดังนั้น

$$\begin{aligned} V_a &= |V_a| \angle 0^\circ \\ V_b &= |V_b| \angle -120^\circ \\ V_c &= |V_c| \angle -240^\circ \end{aligned} \quad \dots\dots(4.6)$$

$$\begin{aligned} I_a &= |I_a| \angle \theta_a \\ I_b &= |I_b| \angle \theta_b \\ I_c &= |I_c| \angle \theta_c \end{aligned} \quad \dots\dots(4.7)$$

โดย θ_a = มุมของคลื่นหลักมูลของ I_a - มุมของคลื่นหลักมูลของ V_a
 θ_b = มุมของคลื่นหลักมูลของ I_b - มุมของคลื่นหลักมูลของ V_a
 θ_c = มุมของคลื่นหลักมูลของ I_c - มุมของคลื่นหลักมูลของ V_a



รูปที่ 4.2 แสดงเฟสเซอร์ของแรงดันและกระแส

5. จากขั้นตอนที่ 4 สามารถเขียนค่าแรงดันและกระแสสายทั้งสามเฟสในรูปเฟสเซอร์ ซึ่งประกอบด้วยขนาดและมุมที่อ้างอิงกับแรงดันสายเฟส a (V_a) แรงดันและกระแสในรูปเฟสเซอร์นี้จะถูกนำไปใช้คำนวณค่าความนำจินตภาพ (susceptance) ที่ต้องชดเชยในเฟสต่างๆ เพื่อให้ค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง และทำให้กระแสสายสามเฟสสมดุล ตามสมการที่ (2.39)

$$\begin{aligned} B_Y^{ab} &= -\frac{1}{3V} [\text{Im} I_{a(t)} + \text{Im} a I_{b(t)} - \text{Im} a^2 I_{c(t)}] \\ B_Y^{bc} &= -\frac{1}{3V} [-\text{Im} I_{a(t)} + \text{Im} a I_{b(t)} + \text{Im} a^2 I_{c(t)}] \\ B_Y^{ca} &= -\frac{1}{3V} [\text{Im} I_{a(t)} - \text{Im} a I_{b(t)} + \text{Im} a^2 I_{c(t)}] \end{aligned} \quad \dots\dots(2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สร้างตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงมุมนำกระแส (σ) กับค่าความนำจินตภาพ ($B_L(\sigma)$) ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} \quad \dots\dots\dots(4.8)$$

เมื่อคำนวณค่าความนำจินตภาพจากขั้นตอนที่ 5 ได้แล้วให้นำมาเทียบกับค่าที่คำนวณได้ในตารางว่าควรจะใช้ทรานซิสเตอร์ด้วยมุมนำกระแส (α) เท่าใด (โดย $\alpha = \pi - \sigma/2$) จึงจะชดเชยค่าความนำจินตภาพให้กับโหลดได้ตามที่ต้องการ

7. ส่งค่ามุมทรานซิสเตอร์ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 6 ไปยังวงจรทรานซิสเตอร์ โดยส่งเป็นข้อมูลขนาด 8 บิต รวมกันค่ากำหนดเฟสอีก 2 บิต เป็นชุดข้อมูล 10 บิต ผ่านพอร์ตส่งข้อมูลดิจิทัลของการ์ด pci-818 ไปยังส่วนวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก เข้าวงจรทรานซิสเตอร์เพื่อควบคุมมุมทรานซิสเตอร์ซึ่งอยู่ในช่วงมุม $90^\circ \sim 180^\circ$

4.2 วงจรวัดกระแสและแรงดันจากสายส่ง

ในการทำงานของระบบจะต้องทราบรูปคลื่นของแรงดัน และกระแสในสายส่งที่ป้อนให้กับภาระ เพื่อเป็นข้อมูลให้คอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลหาขนาดมุมทรานซิสเตอร์ ที่ใช้ควบคุมปริมาณการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การออกแบบวงจรส่วนนี้แบ่งการทำงานออกเป็นสองส่วน คือ

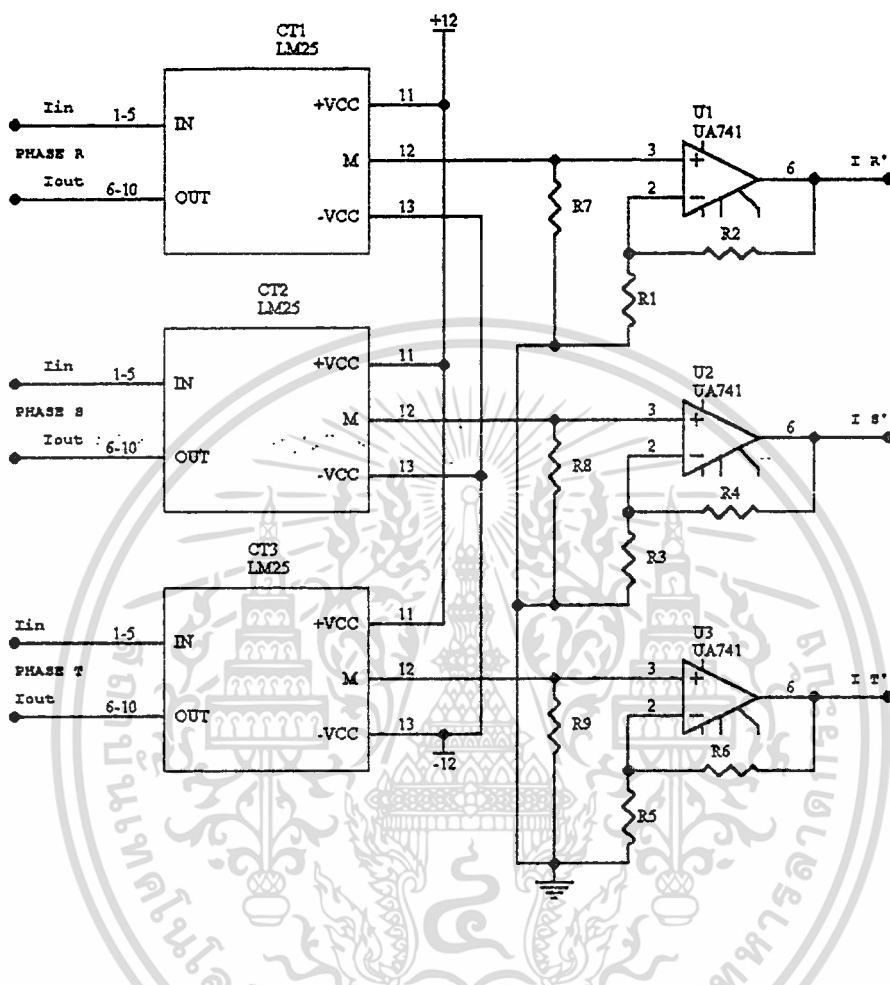
1. วงจรวัดกระแส
2. วงจรวัดแรงดัน

4.2.1 วงจรวัดกระแส

การวัดกระแสใช้หม้อแปลงกระแส LEM Module LA 25-NP โดยเลือกอัตราการแปลงที่ 1000/ 1 สัญญาณกระแสที่ได้เป็นกระแสในช่วง 0-25mA จึงแปลงกระแสเป็นแรงดันโดยวงจรขยายไม่กลับเฟส (Non Inverter Amplifier)

$$Output = (I_m R_m) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

$$Output = \left(\frac{I_{in}}{1000} R_m \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad \dots\dots\dots (4.10)$$



รูปที่ 4.3 วงจรวัดกระแส

4.2.2 วงจรวัดแรงดัน

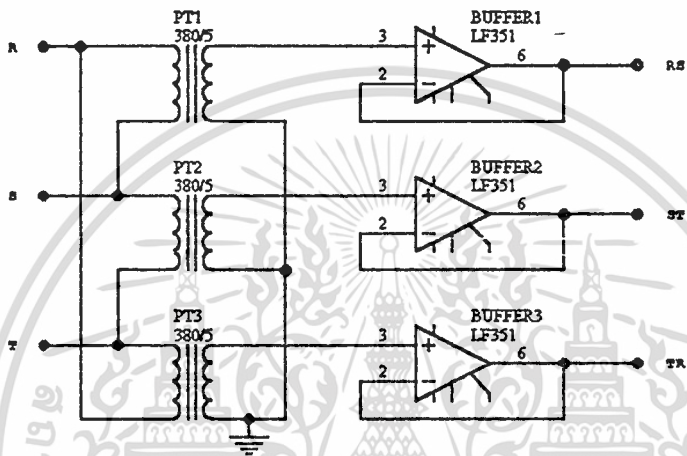
การวัดแรงดันใช้หม้อแปลงด้วยแบบเคลตา-สตาร์ เพื่อวัดแรงดันจากสายส่งทั้งแบบ 3 เฟส-3 สาย และ 3 เฟส-4 สาย และให้แรงดันที่ได้มีระดับอ้างอิงที่นิวทรอลเทียบกับกราวด์ของระบบไฟกระแสตรงของวงจรควบคุมระบบ สัญญาณแรงดันที่ได้จากหม้อแปลงจะส่งผ่าน บัพเฟอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันให้สม่ำเสมอในสายสัญญาณ

แรงดันที่วัดเป็นแรงดันต่อเฟส สัญญาณที่วัดได้จึงมีเฟสตรงกัน

$$V_{R'} = \frac{|V_R|}{Ratio} \angle 0^\circ \quad \dots\dots (4.11)$$

$$V_S = \frac{|V_S|}{Ratio} \angle -120^\circ \quad \dots\dots (4.12)$$

$$V_T = \frac{|V_T|}{Ratio} \angle 120^\circ \quad \dots\dots (4.13)$$



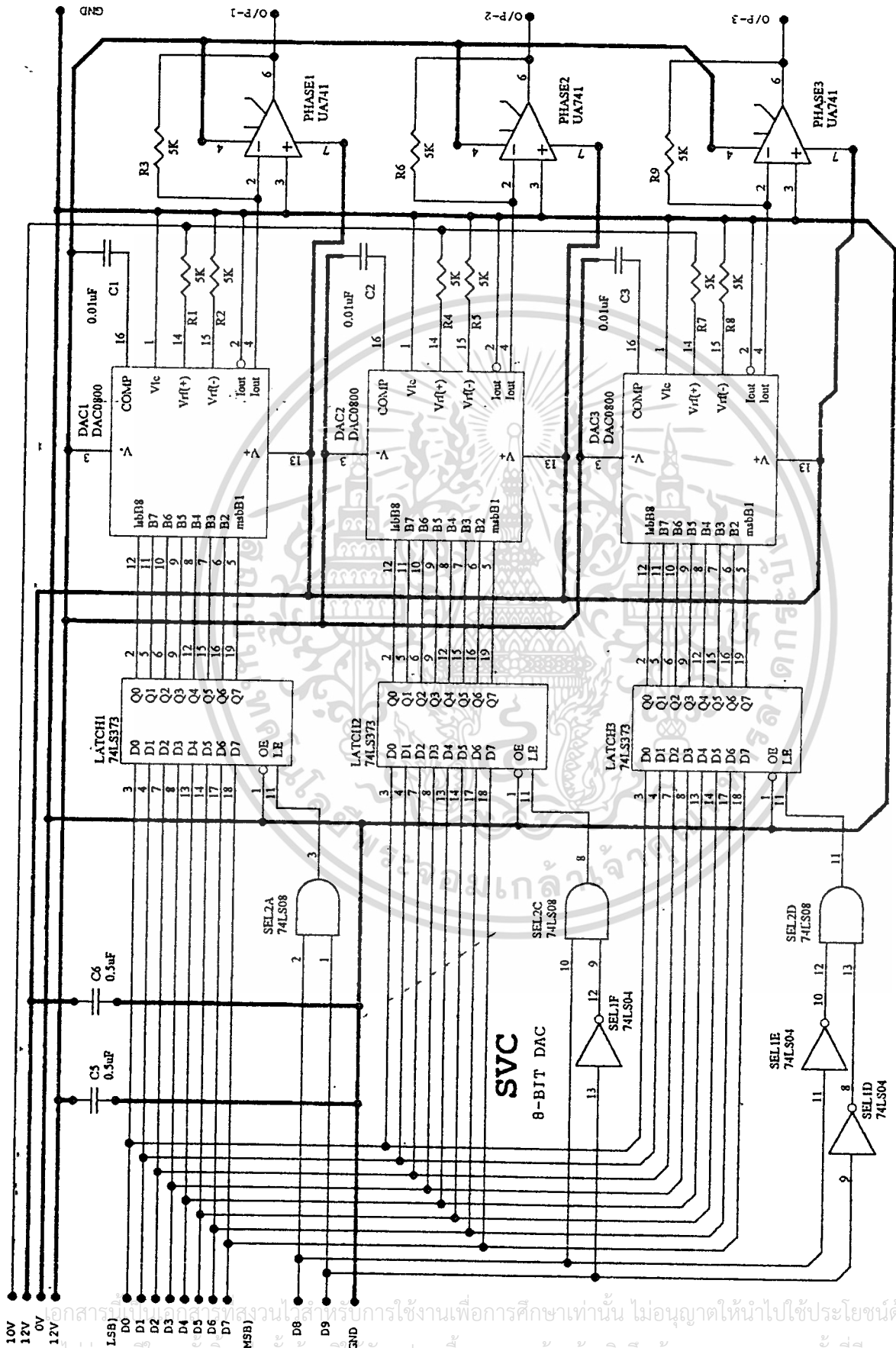
รูปที่ 4.4 วงจรวัดแรงดัน

4.3 วงจรทริกโคริสเตอร์

หลังจากการประมวลผลข้อมูลของคอมพิวเตอร์เรียบร้อยแล้ว ขนาดของมุมทริกจะถูกส่งออกทางเอาต์พุตของการ์ด PCL 818 เป็นเลขฐานสองขนาด 10 บิต โดยบิต D₀...D₇ เป็นข้อมูลขนาดของมุมทริกซึ่งมีช่วง 0 องศาถึง 180 องศา ดังนั้นจะมีความละเอียด 0.705 องศาต่อบิตใช้เลือกเฟสของชุดโคริสเตอร์ที่ต้องการควบคุม

โครงสร้างวงจรแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

1. วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นอะนาลอก เพื่อการแปลงข้อมูลขนาดมุมทริกเป็นแรงดันอ้างอิง การทำงานของวงจรส่วนนี้จะต้องสามารถเลือกเฟสการควบคุมได้ตามต้องการ สามารถแปลงข้อมูลดิจิทัล 8 บิตเป็นแรงดันอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว รักษาข้อมูลระดับแรงดันอ้างอิงของแต่ละเฟสได้ขณะที่มีการส่งงานควบคุมการทำงานที่เฟสอื่น และข้อสำคัญการทำงานจะต้องมีความถูกต้องเนื่องจากข้อมูลเป็นขนาดมุมทริกที่ใช้ควบคุมปริมาณพลังงาน

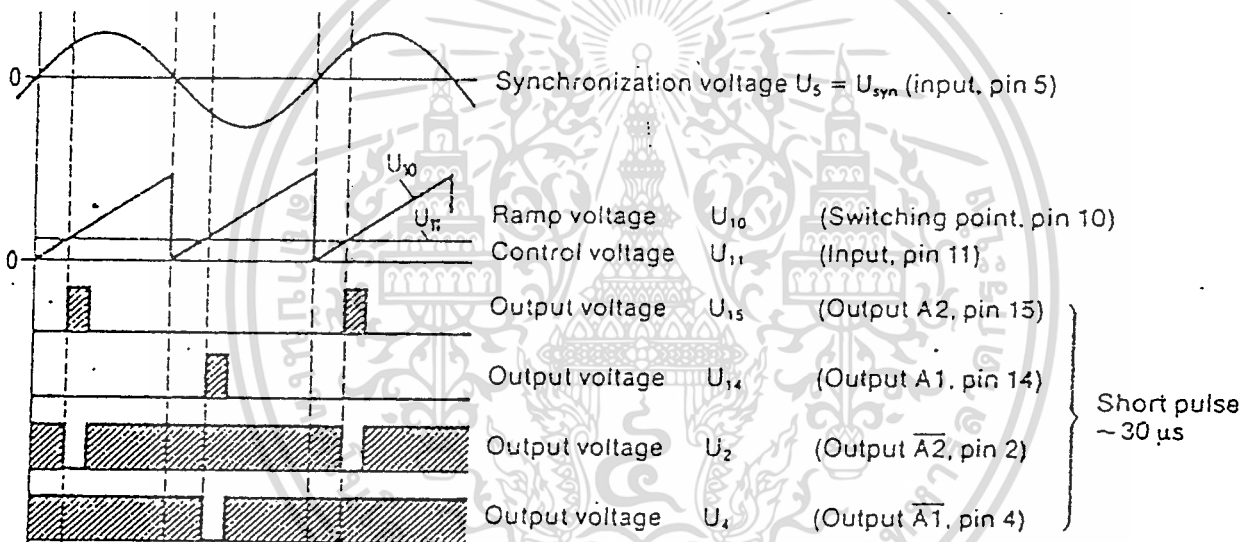


รูปที่ 4.5 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาลอก

การทำงานของวงจร

ขนาดของมูมทริก(D₀...D₇) จะถูกส่งเข้า 8-bit latched (74373)กำหนด เฟสที่จะรักษา(latch) ข้อมูล โดย D₉ , D₈ ข้อมูลมูมทริกของแต่ละเฟสจะถูกส่งเข้า DAC0800 เพื่อแปลงเป็นสัญญาณอนาลอกกระแสเอาท์พุทจาก DAC0800 จะถูกส่งเข้าวงจรมาย (UA741) เพื่อสร้างแรงดันอ้างอิง (0~10V) ที่มีค่าคงที่

2. วงจรควบคุมเฟส หลักการคือทำงานสร้างสัญญาณลาดเอียง (Ramp) ที่มีความถี่และเฟสตรงกับไฟฟ้ากระแสสลับที่จะใช้โรริสเตอร์ควบคุม แล้วใช้แรงดันอ้างอิง (แปรผันตรงกับมูมทริก) มาทำการเปรียบเทียบจะได้คลื่นพัลส์สำหรับการทริกโรริสเตอร์ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณของ TCA 785

ระดับแรงดันอ้างอิงที่ใช้มีค่า 0~10V คือสามารถปรับมูมทริก 18 องศาต่อแรงดัน 1V โดยแรงดันอ้างอิงจะได้รับจากวงจรแปลงดิจิทัลเป็นอนาลอกของข้อมูลขนาดมูมทริกที่ส่งมาจากการ์ด การออกแบบวงจรส่วนนี้เลือกใช้ IC TCA 785 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวงจรควบคุมเฟส ด้วยแรงดัน โครงสร้างภายใน TCA 785 จะประกอบด้วย

- ตัวตรวจจับศูนย์ (Zero detector)
- ตัวเปรียบเทียบ (Comparator)
- การควบคุมตรรก (Logic control)

การใช้งานจะใช้หม้อแปลงแปลงแรงดันระหว่างสายแล้วป้อนเข้าส่วนตัวตรวจจับศูนย์

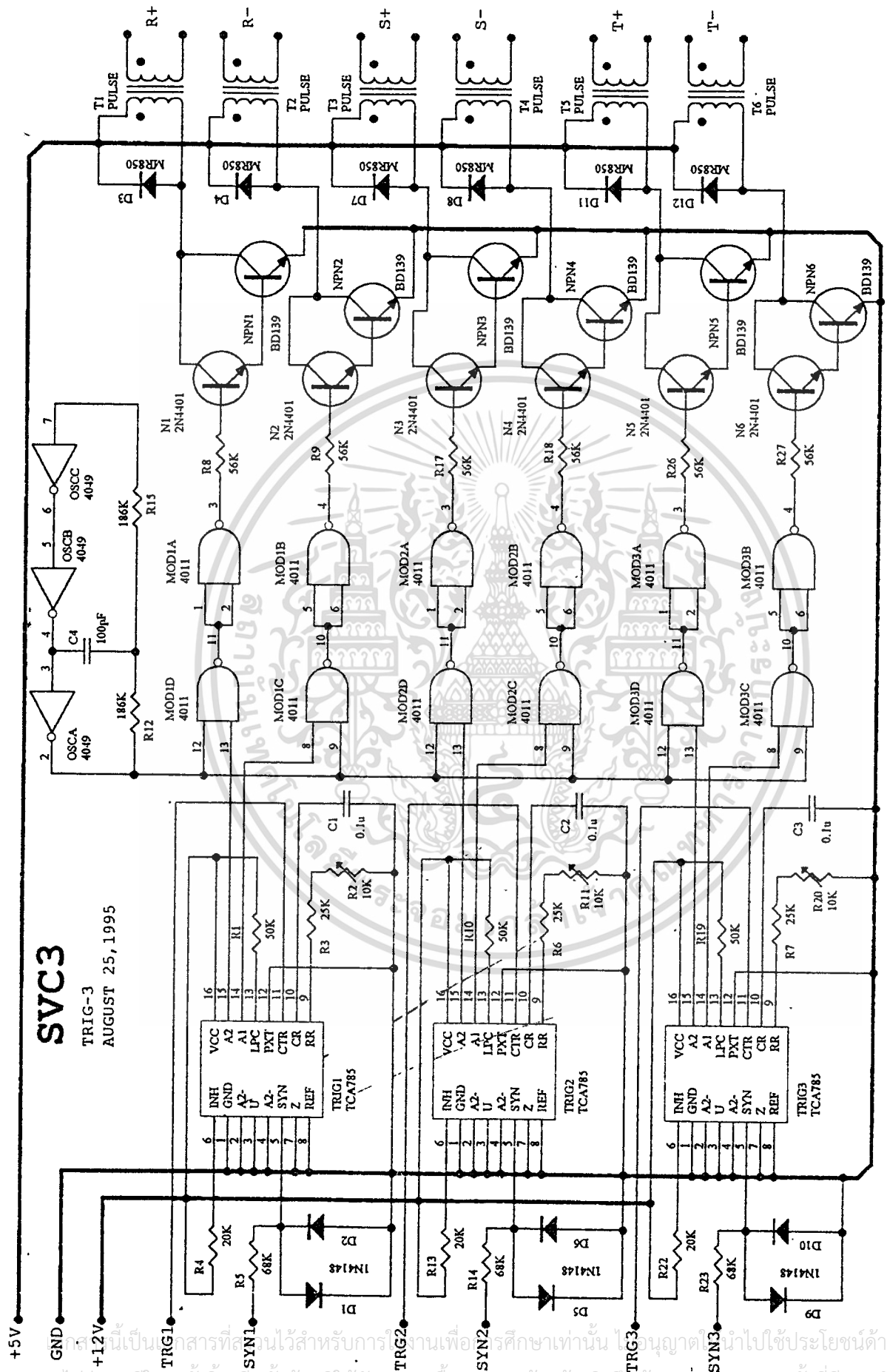
(ขาว) เพื่อทำการสร้างคลื่นรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณลาดเอียงตามลำดับแรงดันอ้างอิงที่ใช้กำหนด ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มทริกได้จากวงจรแปลงคิจิตอลเป็นอนาลอก โดยป้อนเข้าขา 11 (แรงดันควบคุม) เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณลาดเชิงผ่านตัวเปรียบเทียบ (Comparator) และวงจรตรรก (Logic) จะได้สัญญาณทริก A1 สำหรับสัญญาณซีกลบ และ A2 สำหรับสัญญาณซีกบวก (จ่ายกระแสได้สูงสุด 55 mA จาก Emitter follower)

ในการใช้งานจะประสบปัญหากระแสสัญญาณทริกต่ำจำเป็นต้องใช้ทรานซิสเตอร์ช่วยจ่ายกระแส และใช้หม้อแปลงพัลส์ (Pulse transformer) เพื่อเพิ่มแรงดันในการทริก คั้งนั้นหลังจากได้สัญญาณทริก A2 (ขา15) สำหรับซีกบวก และ A1 (ขา1) สำหรับซีกลบ

แล้วจึงนำสัญญาณทริกที่ได้มาทำการผสมคลื่น (Modulation) กับคลื่นความถี่สูงเพื่อให้สามารถผ่านหม้อแปลงพัลส์ การออกแบบเลือกใช้คลื่นพาหะจากการแกว่ง (Oscilate) ของวงจรป้อนกลับของ CMOS 4049(Inverter) และใช้ CMOS 4011 (NAND GATE) เป็นตัวรวมคลื่น สัญญาณที่ถูกผสมคลื่นแล้วนี้จะถูกใช้สวิทช์ทรานซิสเตอร์จ่ายกระแสก่อนจะป้อนเข้าหม้อแปลงพัลส์เพื่อควบคุม ไริสเตรอร์

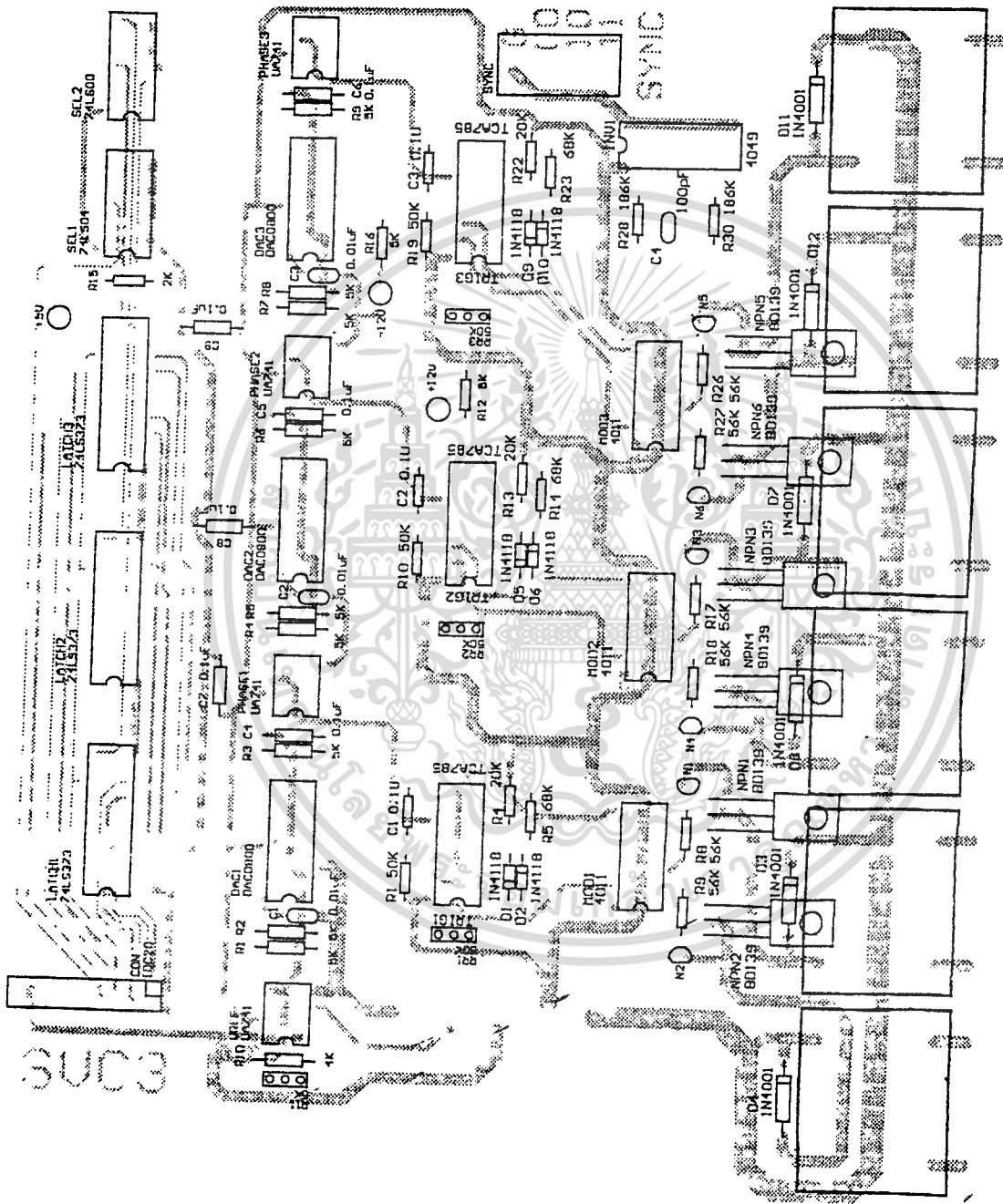




SVC3
 TRIG-3
 AUGUST 25, 1995

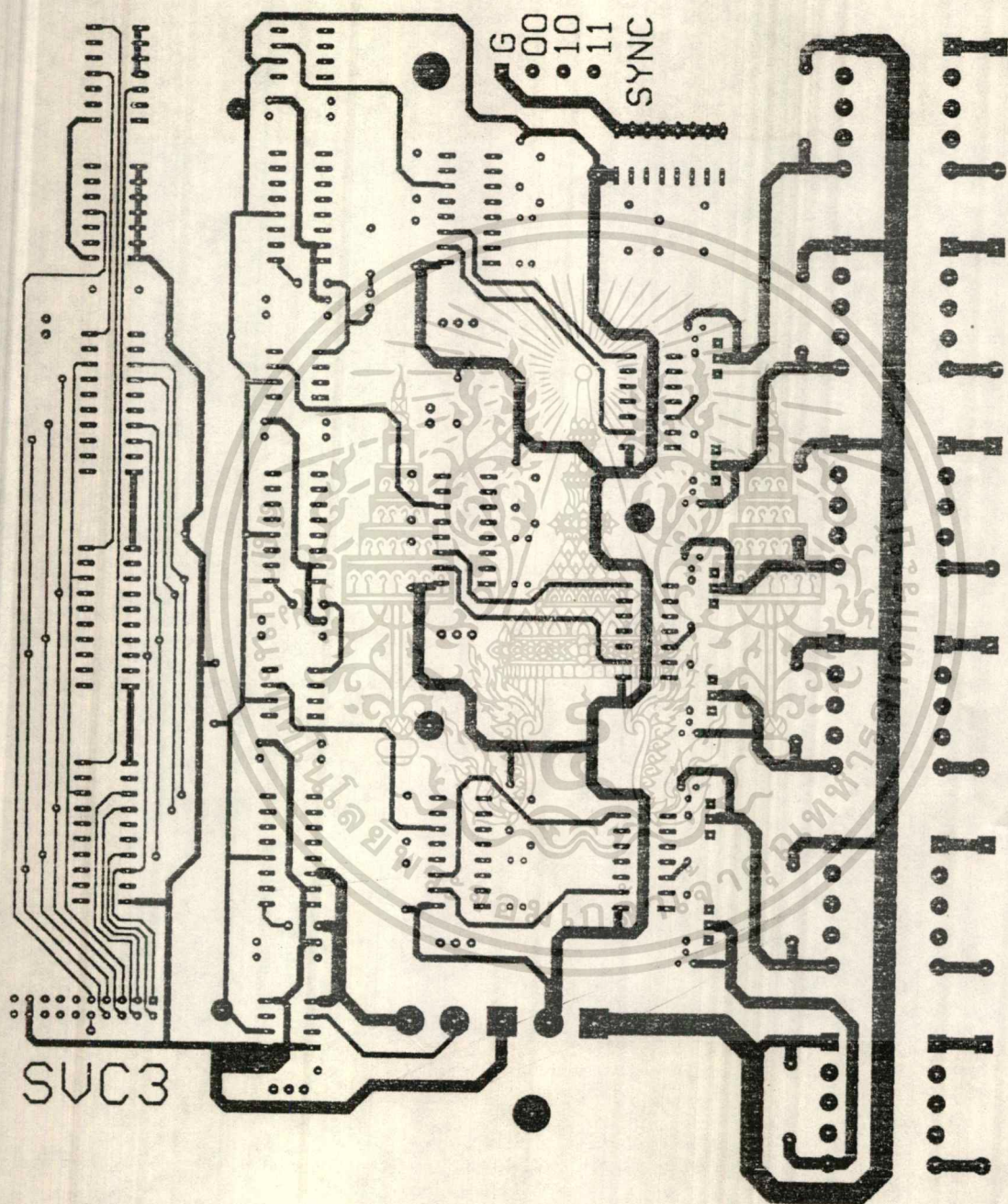
รูปที่ 4.7 วงจรทริกโรตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



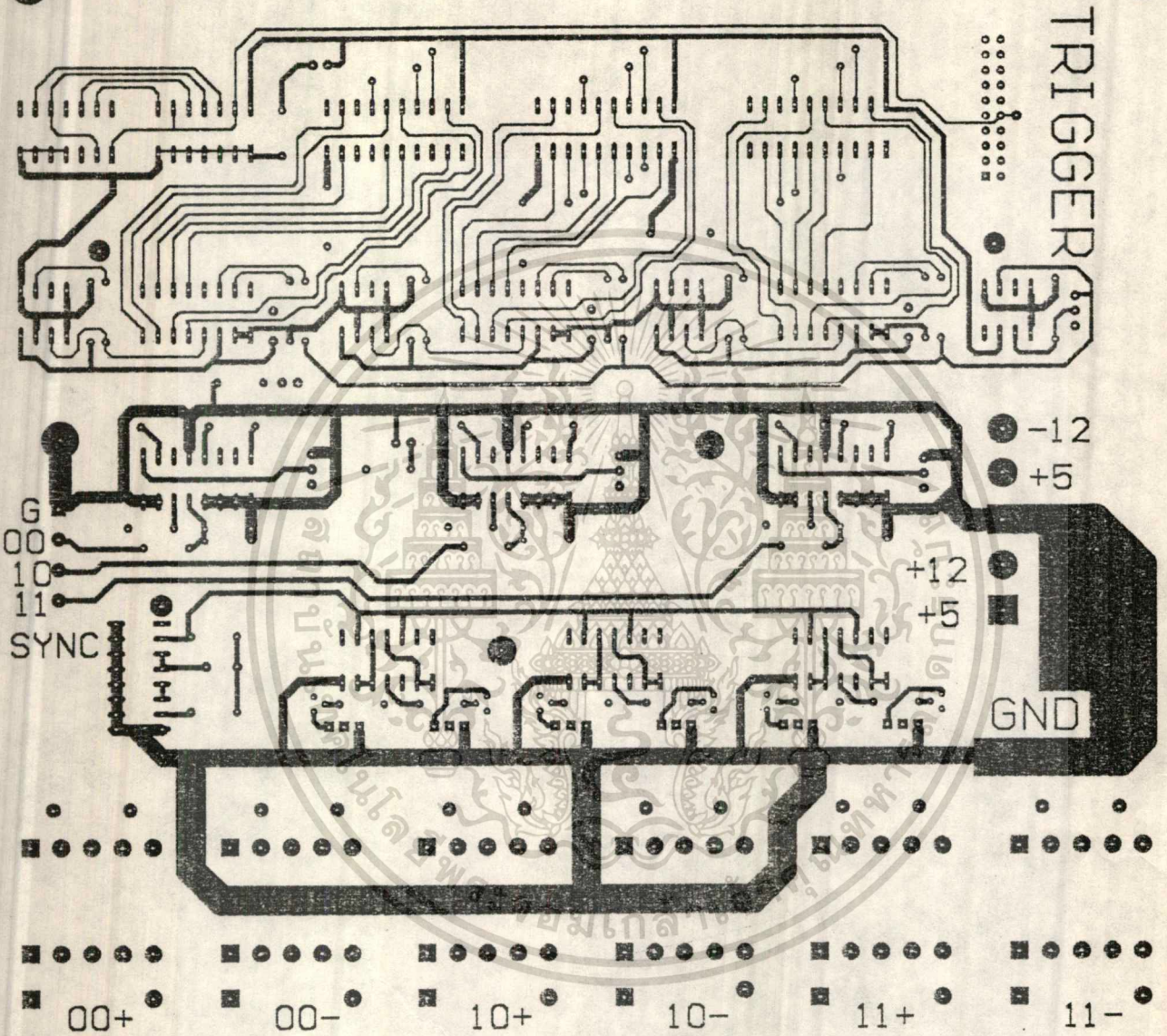
รูปที่ 4.8 ภาพแสดงอุปกรณ์และการต่อวงจร (Top overlay and Top Layer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แผ่นวงจรพิมพ์ด้านบน (Top layer printed circuit board)

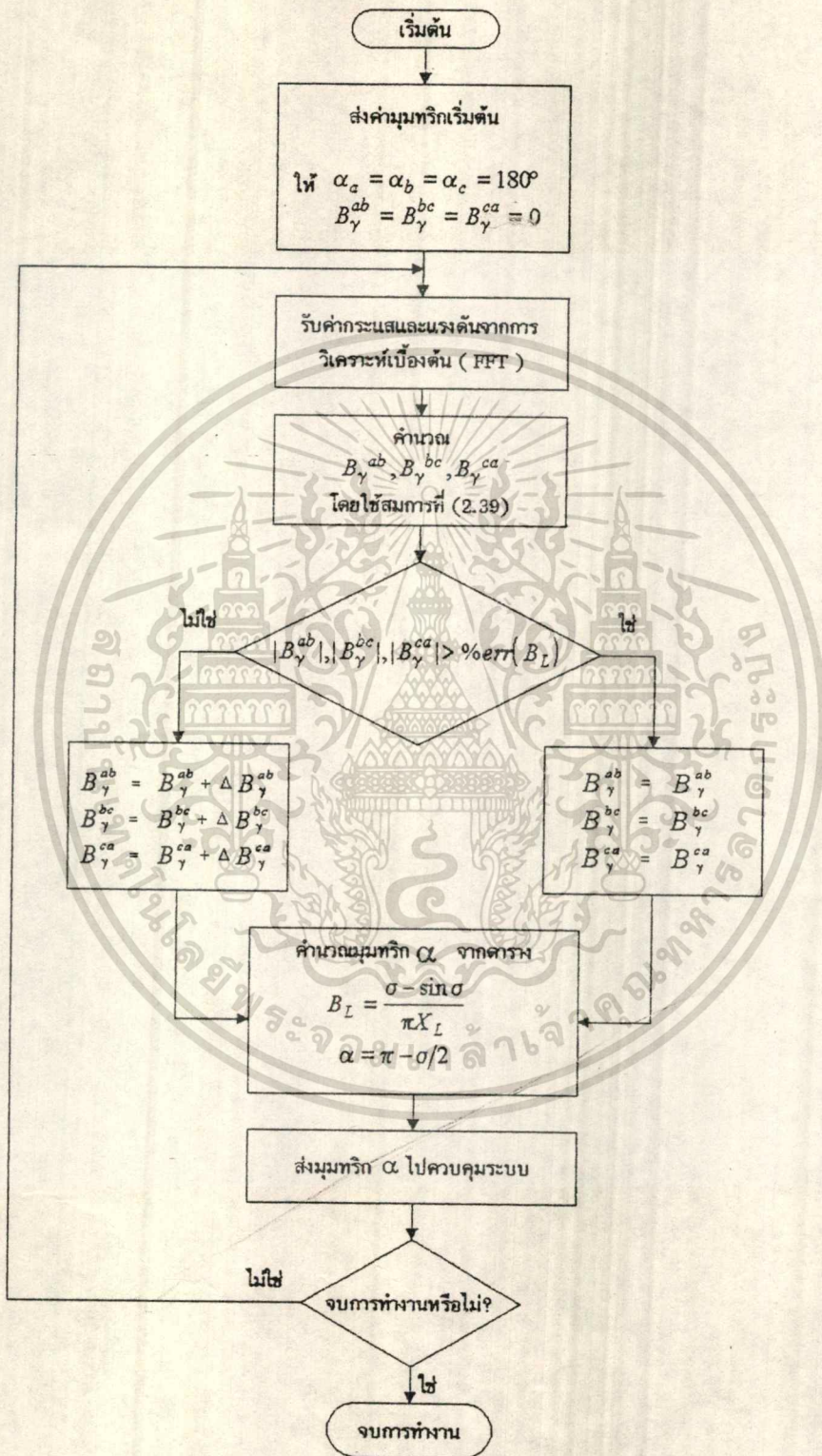
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แผ่นวงจรพิมพ์ด้านล่าง (Bottom layer printed circuit board)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุม



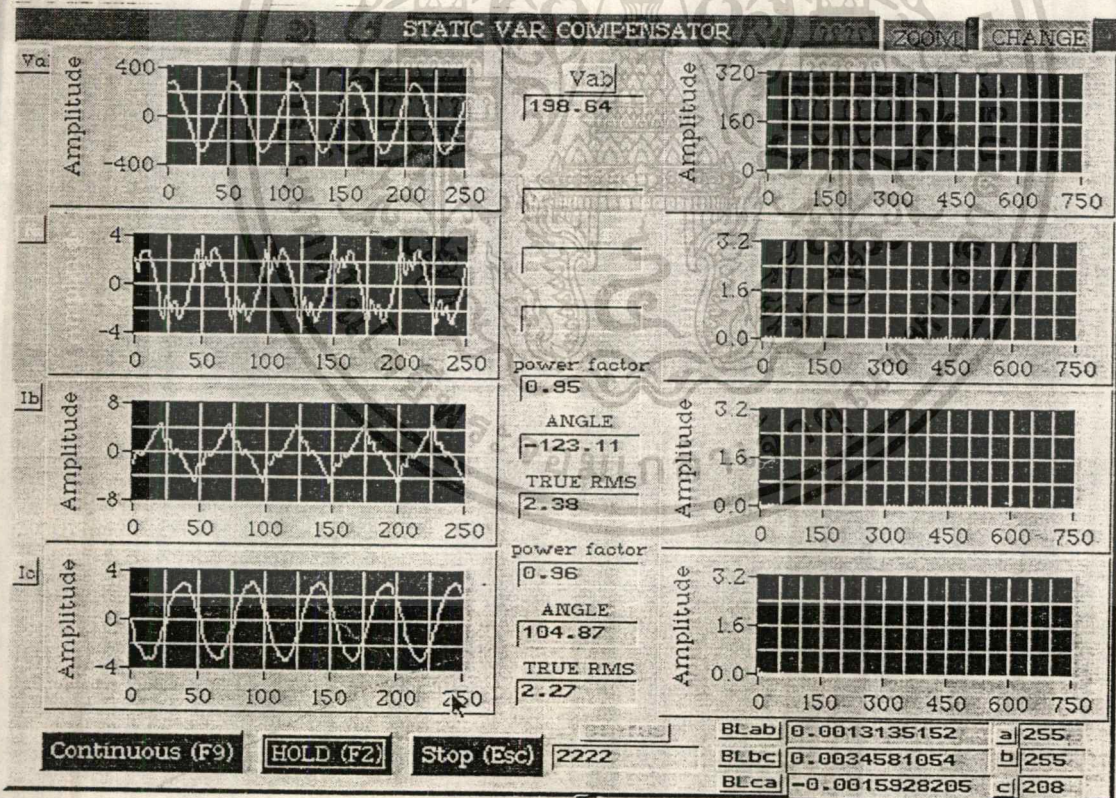
รูปที่ 4.11 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมควบคุมตัวชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของโปรแกรม

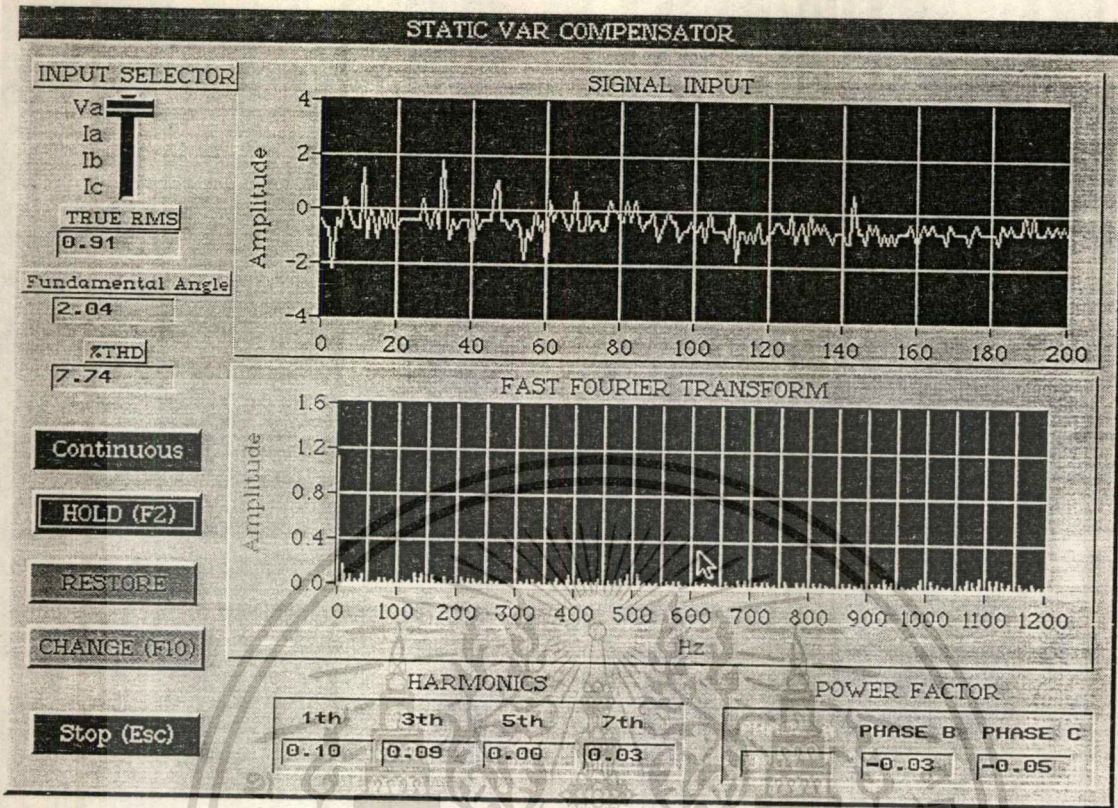
1. จัดระบบเริ่มต้นการทำงานของวงจรแปลงขนาดออกเป็นคิจิตอด และส่งมุมทริก 180° ให้โวลติเตอร์หยุคนำกระแส
2. รับค่ากระแสและแรงดัน เพื่อคำนวณ $B_{\gamma}^{ab}, B_{\gamma}^{bc}, B_{\gamma}^{ca}$
3. ทดสอบเงื่อนไขว่า $B_{\gamma}^{ab}, B_{\gamma}^{bc}, B_{\gamma}^{ca}$ มากกว่าค่าความผิดพลาดคงที่หรือไม่
 - 3.1 ถ้า "ใช่" คำนวณมุมทริกด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Method)
 - 3.2 ถ้า "ไม่ใช่" คำนวณมุมทริกด้วยวิธีการป้อนกลับ
4. กลับไปปรับค่าแล้วตรวจสอบสถานะการทำงานใหม่

หน้าจอแสดงผล

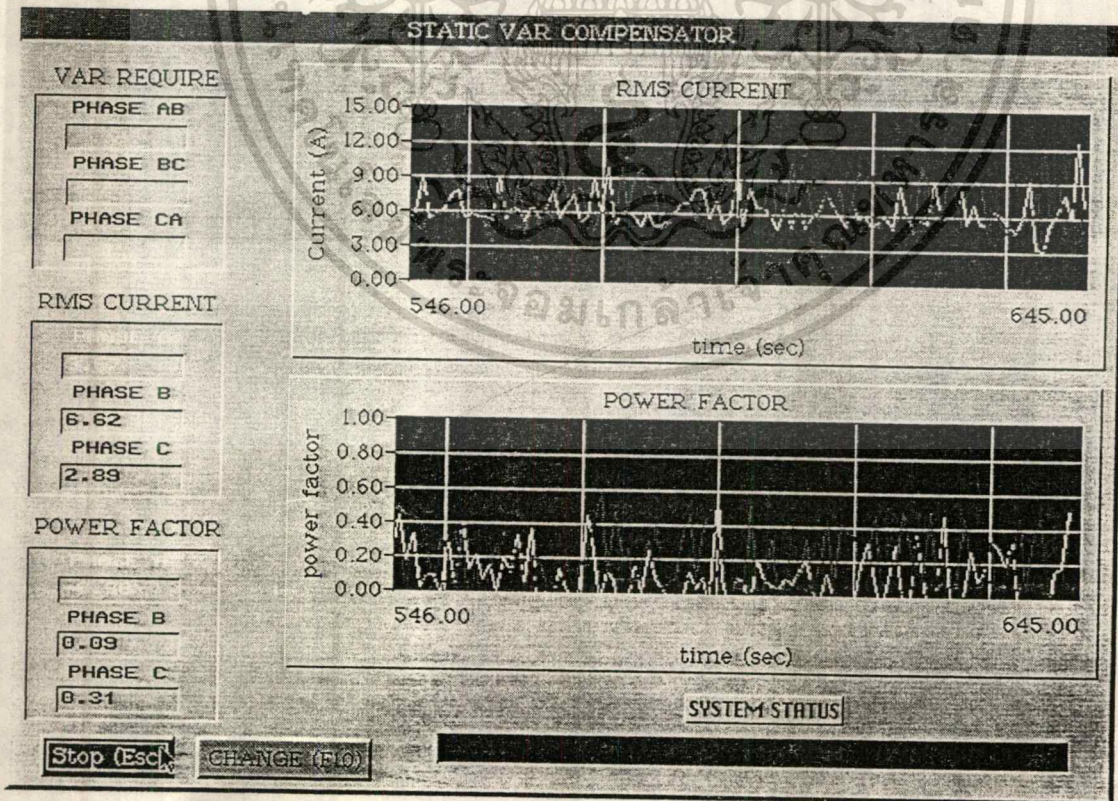


รูปที่ 4.12 หน้าจอแสดงผลหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 หน้าจอแสดงรูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมขยายแต่ละเฟส



รูปที่ 4.14 หน้าจอแสดงแนวโน้มของค่าตัวประกอบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าเกิดจากการที่โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) เข้ามาต่ออยู่ในระบบ กระแสที่ไหลผ่านและแรงดันที่คร่อมโหลดจะเป็นรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน (Distorted Wave) รูปคลื่นที่เพี้ยนนี้ ถ้าแยกออกมาจะพบว่าประกอบด้วยรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency เช่น 50Hz) และรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่า (2,3,4,...) ของความถี่หลักมูลมีชื่อเรียกว่า “ฮาร์โมนิกส์” และเรียกจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลว่า ระดับฮาร์โมนิกส์ เช่น รูปคลื่นความถี่ 250 Hz มีระดับฮาร์โมนิกส์เท่ากับ 5 หรือเรียกว่า ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 เป็นต้น

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ โหลดที่จะกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่สำคัญ คือ

- หม้อแปลงไฟฟ้า หรือเครื่องจักรไฟฟ้าที่ทำงานเกินพิกัด (Overload)
- คอนเวอร์เตอร์กำลังสถิต (Static Power Converter)
- เตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnances)
- เครื่องควบคุมกำลังกระแสสลับใช้ไทรสเตอร์ (Thyristor A.C. Power Controllers)
- รีแอกแตนซ์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Reactor)
- ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cyclo Converter)
- เครื่องเชื่อมอาร์ค (Arc Welders)

ผลเสียของฮาร์โมนิกส์ต่ออุปกรณ์และระบบไฟฟ้า เมื่อมีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นในระบบจะมีผลเสียต่ออุปกรณ์และระบบไฟฟ้าดังนี้

- ระบบระบบโทรศัพท์
- ระบบระบบควบคุมให้เกิดทำงานผิดพลาด
- เครื่องจักรกลไฟฟ้า มีผลทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น และเกิดเรโซแนนซ์ทางกล (Mechanical Resonance) ได้
- เครื่องมือวัด ทำให้เครื่องมือวัดทำงานผิดพลาด
- ค่าแรงค่านี้อาจลดลงของตัวเก็บประจุจะมีค่าน้อยลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ทำให้เกิด Overload ขึ้นในตัวเก็บประจุและระบบ

วิธีการแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์ กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลผ่านระบบไฟฟ้า สามารถควบคุมได้หลายวิธี คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เปลี่ยนตำแหน่งที่ตั้งตัวเก็บประจุและ/หรือเปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุ การที่ระบบไฟฟ้ามีปัญหาฮาร์โมนิกส์นั้น ส่วนใหญ่เนื่องจากระดับฮาร์โมนิกส์ที่เรโซแนนซ์ของระบบใกล้เคียงกับระดับฮาร์โมนิกส์ที่แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ผลิตออกมา การแก้ฮาร์โมนิกส์วิธีนี้ ใช้กับระบบที่มีอุปกรณ์ที่ผลิตฮาร์โมนิกส์ออกมาไม่มากนัก

2. การทำเฟสมัลติพลิเคชัน (Phase Multiplication) ถ้าคอนเวอร์เตอร์มีจำนวนเฟสหรือพัลส์สูงฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นระดับสูงและมีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงควรเลือกคอนเวอร์เตอร์ที่มีพัลส์สูงๆ หรือคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์หลายๆชุดมาต่อกันผ่านหม้อแปลงที่มีมุมต่างกัน 15 องศา

3. ชั้นตัดฟิวเตอร์ (Shunt Filter) เมื่อเกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์มากจนกระทั่งสองวิธีดังกล่าวมาใช้ไม่ได้ผลแสดงว่าเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างระบบกับตัวเก็บประจุที่ระดับฮาร์โมนิกส์ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ผลิตออกมาทำให้เกิดภาวะโหลคเกินทั้งกระแสและแรงดันที่ตัวเก็บประจุ วิธีที่แก้ปัญหาคำแนะนำที่ดีที่สุดคือ การใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกส์ โดยการนำตัวเหนี่ยวนำมาต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุเพื่อปรับความถี่เรโซแนนซ์ โดยตัวกรองฮาร์โมนิกส์แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- ดิจูนฟิวเตอร์ (Detuned Filter) จะปรับรีแอกแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมกับตัวเก็บประจุที่ความถี่ต่ำกว่าระดับฮาร์โมนิกส์ต่ำสุดที่มีในระบบปกติ คือฮาร์โมนิกส์ที่ 5 โดยทั่วไปจะใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกส์ที่มีค่าอินดักแตนซ์ 4.5-7% ของค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

การใช้ดิจูนฟิวเตอร์กระแสฮาร์โมนิกส์จะไหลเข้าฟิวเตอร์น้อย แต่จะไหลเข้าด้านแรงสูงของระบบมาก

- จูนฟิวเตอร์ (Tuned Filter) ใช้เมื่อต้องการให้กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลเข้าฟิวเตอร์ทั้งหมดโดยปรับรีแอกแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมกับตัวเก็บประจุที่ตรงกับระดับฮาร์โมนิกส์ที่มีในระบบไฟฟ้า

ข้อควรคำนึงถึงเกี่ยวกับการแก้ปัญหฮาร์โมนิกส์ ต้องการทราบข้อมูลต่างๆ เช่น

- กระแสฮาร์โมนิกส์จากแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์
- แรงดันอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง
- วัดค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ระดับต่างๆ โดยใช้ ฮาร์โมนิกส์อนาไลเซอร์ (Harmonic Analyser) แรงดันที่ตัวเก็บประจุจะสูงกว่าปกติ ต้องใช้ตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันได้สูงขึ้น รีแอกแตนซ์ต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และต้องมีระบบป้องกันที่เพียงพอ

ทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิกส์โดยทั่วไป

จากพื้นฐานที่ว่าคลื่นต่างๆประกอบด้วยคลื่นที่มีลักษณะรูปขายนี่ที่มีความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆผสมกันอยู่ ซึ่งขนาดของฮาร์โมนิกส์จะมีค่าลดลงเมื่ออันดับของฮาร์โมนิกส์มีค่าเพิ่มขึ้นสามารถเขียนสมการทั่วไปของคลื่นได้ดังนี้

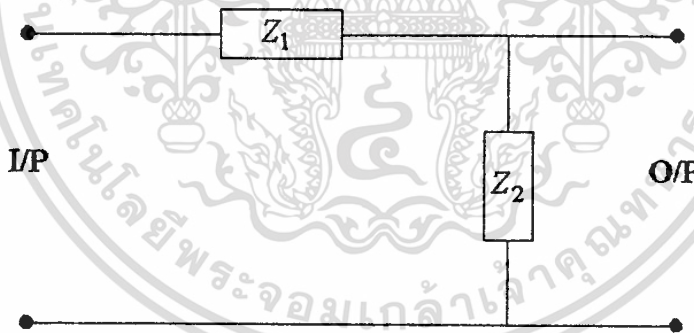
$$V = V_1 \sin(\omega t + \phi_1) + V_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + V_3 \sin(3\omega t + \phi_3) + \dots \quad \text{..... (4.14)}$$

ลักษณะของ output filter

1. regulation ของตัวกรองฮาร์โมนิกส์ควรจะทำ
2. ควรมี effect ของ V-A rating ต่ำ
3. มีกำลังงานสูญเสีย , ขนาด และราคาต่ำ
4. ผลของ distortion น้อย

แนวความคิดของ Filter

เพื่อที่จะให้คลื่นขาออกเป็นรูปขายนี่จริงๆต้องกำจัดฮาร์โมนิกส์อื่นๆทิ้งโดยใช้วงจรกรองความถี่ซึ่งมีหลักแนวความคิดดังนี้



รูปที่ 4.15 รูปสมมติของวงจรกรองความถี่

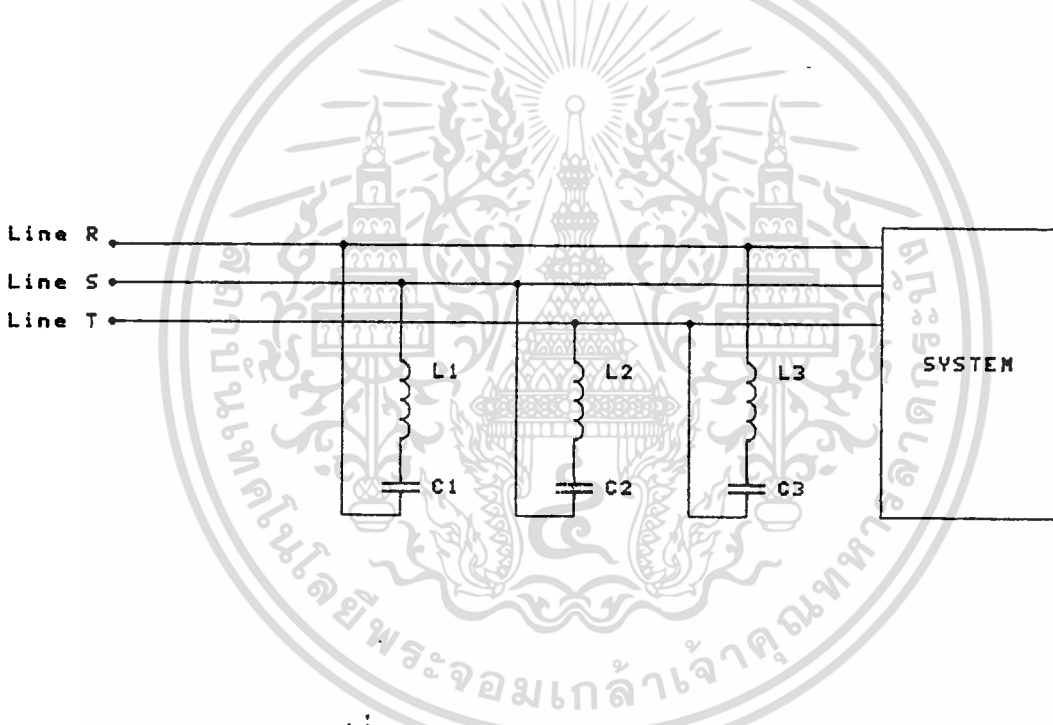
ที่ความถี่หลักจะต้องทำให้ค่า Z_1 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และ Z_2 มีค่าเข้าใกล้อนันต์ เพื่อที่คลื่นที่มีความถี่หลักผ่าน Z_1 มาได้สะดวก โดยไม่มีความดันตกคร่อม Z_1 เลยและไม่ให้มีกระแสของคลื่นที่มีความถี่หลักไหลเข้าไปใน Z_2 ใ้สำหรับคลื่นที่เป็นฮาร์โมนิกส์จะทำให้ค่า Z_1 มีค่าเข้าใกล้อนันต์ และค่า Z_2 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เพื่อไม่ให้กระแสฮาร์โมนิกส์ผ่าน Z_1 มาได้และถ้ามีฮาร์โมนิกส์ผ่านมาได้บ้างก็จะทำการลดทอนด้วย Z_2 ไป ฉะนั้นคลื่นที่ผ่านวงจรกรองความถี่ออกมาได้จึงเป็นคลื่นที่มีเฉพาะความถี่หลักมูลเท่านั้น

การเลือกตัวกรองฮาร์โมนิกส์ที่ไปใช้โรงงาน

ระบบของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟออกมาเพื่อใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย และ 3 เฟส 4 สาย และเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวกรองฮาร์โมนิกส์น้อยที่สุด ตัวกรองฮาร์โมนิกส์จึงเป็นแบบจูนฟิลเตอร์สามตัวต่อกันแบบเดลต้า (Δ) โดยมีข้อกำหนดการออกแบบดังนี้

1. แรงดัน 380 V ที่ความถี่ 50 Hz
2. กระแสความถี่หลักมุดสูญเสียในตัวกรองฮาร์โมนิกส์ต่ำกว่า 0.5 %
3. กำจัดฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 , 7 , 11 และสูงกว่า 11 เป็นต้นไป

1. ออกแบบโดยกำหนดประสิทธิภาพของตัวกรองฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 4.16 วงจรตัวกรองฮาร์โมนิกส์

ความสัมพันธ์ของกระแสในระบบจะเป็นไปดังสมการ

$$I_{out} = I_{in} - I_f$$

$$\eta = \frac{I_{out} \cdot V}{I_{in} \cdot V}$$

$$= \frac{I_{out}}{I_{in}}$$

.....(4.15)

เมื่อกำหนด I_{in} = กระแสจากแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{out} = กระแสจ่ายให้ระบบ

I_f = กระแสที่สูญเสียในฟิลเตอร์

พิจารณากระแสที่จ่ายให้ฟิลเตอร์ที่ความถี่หลักมูล

$$\frac{I_{f1}}{I_{in1}} = 1 - \frac{I_{out1}}{I_{in1}} = 1 - \eta$$

$$I_{f1} = (1 - \eta) I_{in1} \quad \text{.....(4.16)}$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของฟิลเตอร์จะมีค่าคงสมการ

$$Z_f = R_f + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

$$|Z_f| = \sqrt{R_f^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \text{.....(4.17)}$$

เมื่อความต้านทานของฟิลเตอร์มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ จึงประมาณค่า $|Z_f|$ เป็น

$$|Z_f| = \left| \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C} \right| \quad \text{.....(4.18)}$$

ที่ความถี่หลักมูล

$$|Z_{f1}| = \left| \frac{\omega_1^2 LC - 1}{\omega_1 C} \right|$$

$$\begin{aligned} I_{f1} &= \frac{V}{|Z_{f1}|} \\ &= \frac{V \cdot \omega_1 C}{|\omega_1^2 LC - 1|} \end{aligned} \quad \text{.....(4.19)}$$

$$|Z_f| \text{ มีค่าน้อยที่สุดเมื่อ } \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$$

$$LC = \frac{1}{\omega^2} \quad \text{.....(4.20)}$$

เมื่อฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการกำจัดที่มีอันดับที่ n ความถี่ที่ฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวจะมีค่า n เท่าของความถี่หลักมูล และที่ความถี่นี้ค่า $|Z_f|$ ต้องมีค่าน้อยมากเพื่อกำจัดค่าแรงแสฮาร์โมนิกส์ให้หมด

ค่า LC จะสอดคล้องกับความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$LC = \frac{1}{\omega_n^2} \tag{4.21}$$

$$LC = \frac{1}{(n\omega_1)^2}$$

$$|Z_{fn}| = 0$$

แทนค่า LC ในสมการ I_{f1}

$$I_{f1} = \frac{V \cdot \omega_1 C}{\left| \omega_1^2 \left(\frac{1}{n\omega_1} \right)^2 - 1 \right|} \tag{4.22}$$

$$= \frac{V \cdot \omega_1 C}{\left| \frac{1}{n^2} - 1 \right|}$$

และจากความสัมพันธ์ $I_{f1} = (1-\eta) I_{in1}$

$$C = \frac{(1-\eta)(I_{in1}) \left(\frac{1}{n^2} - 1 \right)}{\omega_1 V} \tag{4.23}$$

$$L = \frac{V}{\omega_1 (1-\eta)(I_{in1})(1-n^2)} \tag{4.24}$$

2. ออกแบบโดยกำหนดความถี่ที่ต้องการกำจัดและแบนด์วิดท์

จาก $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$

$$= \frac{I_{out}^2 R_{out}}{I_{in}^2 R_{in}} \tag{4.25}$$

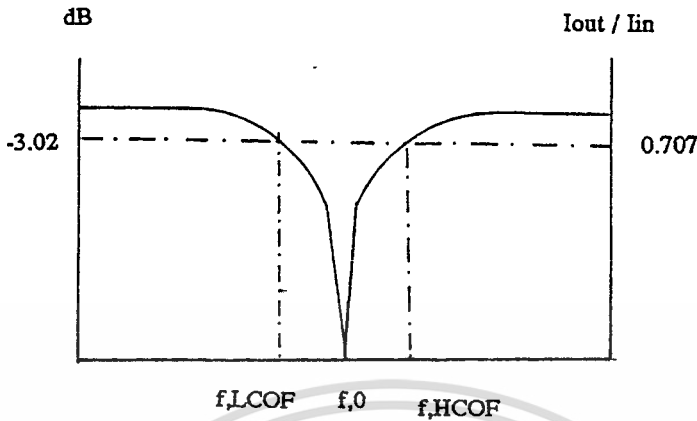
ในการส่งพลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด R_{out} จะต้องสมพจน์ (match) กับ R_{in}

$$\eta = \frac{I_{out}^2}{I_{in}^2}$$

$$dB = 10 \log \eta$$

$$= 10 \log \frac{I_{out}^2}{I_{in}^2}$$

$$= 20 \log \frac{I_{out}}{I_{in}} \tag{4.26}$$



รูปที่ 4.17 แสดงอัตราขยาย (gain) ที่ความถี่ต่างๆ

$$f_0 = \text{central frequency} = \text{tuned frequency} \dots\dots\dots(4.27)$$

$$f_L = f_0 - \frac{\text{bandwidth}}{2}$$

$$f_H = f_0 + \frac{\text{bandwidth}}{2}$$

ที่ความถี่ f_L และ f_H (cut off frequency)

$$dB = -3.012 = 20 \log \frac{I_{out}}{I_{in}}$$

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = 0.707$$

$$I_{f, (HCOF)} = I_{f, (LCOF)}$$

HCOF = High frequency cut off

LCOF = Low frequency cut off

$$\frac{I_{f, COF}}{I_{in, COF}} = 1 - \frac{I_{out}}{I_{in}} = 0.293$$

โดยประมาณค่า

$$I_{in, COF} = (\text{Percent of harmonics})$$

$$I_{f, COF} = \frac{V}{|Z_{f, COF}|} = \frac{V \omega_{COF} C}{|\omega_{COF}^2 LC - 1|}$$

$$\dots\dots\dots(4.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ $|Z_f|$ ควรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ $|Z_f|$ จะสอดคล้องสมการ $LC = \frac{1}{\omega_n^2}$

$$LC = \frac{1}{(n\omega_1)^2}$$

$$C = (I_{f,COF}) \frac{|\omega_{COF}^2 LC - 1|}{\omega_{COF} V}$$

.....(4.29)

$$C = 0.293(\%H)(I_{in,1}) \frac{|\omega_{COF}^2 - 1|}{n^2 \omega_1^2}$$

$$L = \frac{V}{0.293(\%H)(I_{in,1}) \left| \omega_{COF} - \frac{n^2 \omega_1^2}{\omega_{COF}} \right|}$$

.....(4.30)

การกำหนดค่า L และ C ควรเลือกใช้ที่ความถี่ high frequency cut off หรือ low frequency cut off ความถี่ใดความถี่หนึ่งเนื่องจากค่าที่ได้จะแตกต่างกันเล็กน้อย

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ระบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้รับการออกแบบให้ทำงานได้ทุกระดับแรงดัน 0-400 V โดยมีพิกัดกระแสไม่เกิน 20 A จึงทดสอบระบบโดยการจ่ายโหลดที่สภาวะต่างกัน ณ ระดับแรงดัน 220V เพื่อให้การพิจารณาประสิทธิภาพทำได้ชัดเจน

1. สภาวะโหลดสมดุล ทดสอบโดยการจ่ายโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ เปรียบเทียบการชดเชยขณะมอเตอร์รับโหลดสภาวะต่างๆ
2. สภาวะโหลดไม่สมดุลอย่างมาก ทดสอบโดยการจ่ายโหลดหลอดไฟ ระหว่างสาย RS เท่านั้นทำให้กระแสสาย T มีค่าเป็นศูนย์
3. สภาวะโหลดไม่สมดุล ทดสอบโดยการจ่ายโหลดหลอดไฟระหว่างสาย RS และ ST

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงผลการทดลองจ่ายโหลดสมดุล

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงผลการทดลองจ่ายโหลดไม่สมดุล 1 เฟส

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงผลการทดลองจ่ายโหลดไม่สมดุล 2 เฟส

สรุปผลการทดลอง

พิจารณาแนวโน้มผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

1. ตัวชดเชยสามารถชดเชยให้กระแสสายสามเฟสสมดุลกัน
2. ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (power factor) ให้มีค่าสูงขึ้น
3. ตัวชดเชยสามารถรักษาระดับแรงดัน โหลดให้คงที่ได้ดีแต่ยังไม่สามารถเปรียบเทียบกับการชดเชยแบบอื่นให้เห็นชัดเจนเนื่องจาก
 - 3.1. ไม่สามารถทดสอบระบบตัวชดเชยในแหล่งจ่ายอ้างอิงที่มีระดับแรงดันสม่ำเสมอได้
 - 3.2. ไม่สามารถวัด โหลดค่าสูงๆเพื่อให้ระบบตัวชดเชยทำงานที่พิกัด

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงผลการทดลองจ่ายโหลดสมดุล

Balance		Experiment data																			
		System									Load										
Status		Vrs	Vat	Vr	Ir	Is	It	PF r	PF s	PF t	DTr	DTr	DTr	DTr	Ir	Is	It	PF	Watts	VA	
Uncompensate																					
no-load		216	217	218	1.8	1.8	1.8	0.16 lag	0.11 lag	0.13 lag	99	99	99	99	1.9	1.8	1.9	0.14	97	707	
load 1		215	216	217	1.8	1.8	1.9	0.34 lag	0.28 lag	0.31 lag	99	99	99	99	2	1.9	2	0.32	233	733	
load 2		215	215	216	2.1	2	2.2	0.58 lag	0.53 lag	0.54 lag	99	99	99	99	2.2	2.1	2.2	0.55	450	824	
load 3		214	215	216	2.4	2.3	2.4	0.69 lag	0.65 lag	0.66 lag	99	99	99	99	2.6	2.4	2.5	0.67	631	938	
load 4		213	214	215	2.9	2.8	2.9	0.79 lag	0.77 lag	0.76 lag	99	99	99	99	3	2.9	3	0.77	865	1120	
Capacitor bank																					
no-load		218	219	221	1	1.1	1	0.3 lead	0.22 lead	0.23 lead	97	97	98	98	2	1.9	2	0.26	110	434	
load 1		218	219	221	1.2	1.2	1.1	0.54 lead	0.47 lead	0.51 lead	98	98	98	98	2.1	1.9	2.1	0.51	247	485	
load 2		218	218	220	1.6	1.6	1.4	0.77 lead	0.72 lead	0.76 lead	99	99	99	99	2.3	2.1	2.3	0.75	477	633	
load 3		218	218	219	2	1.8	1.8	0.85 lead	0.82 lead	0.86 lead	99	99	99	99	2.6	2.4	2.6	0.84	647	763	
load 4		217	217	218	2.5	2.4	2.3	0.91 lead	0.9 lead	0.92 lead	99	99	99	99	3.1	2.9	3	0.91	870	951	
SVC compensata																					
no-load		219	220	222	0.5	0.5	0.5	0.5	0.47	0.48	48	47	48	48	2	1.9	2	0.48	130	273	
load 1		219	221	222	0.8	0.8	0.8	0.78	0.76	0.78	78	76	78	78	2.1	2	2.1	0.78	300	385	
load 2		219	220	221	1.3	1.3	1.3	0.9	0.9	0.92	90	92	92	92	2.4	2.2	2.4	0.918	527	573	
load 3		217	218	219	1.8	1.8	1.8	0.96	0.95	0.96	96	95	96	96	2.7	2.5	2.7	0.95	700	724	
load 4		215	215	216	2.2	2.2	2.2	0.97	0.97	0.97	97	97	97	97	3	2.8	2.9	0.97	850	874	

หมายเหตุ ค่าที่ประกอบกำลังกรณิใช้การชดเชยโหลดแบบสถิตจะแกว่งในช่วงใกล้ unity โดยเป็น Lead/lag สลับกัน

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงผลการทดลองจ่ายโหลดไม่สมดุล 1 เฟส

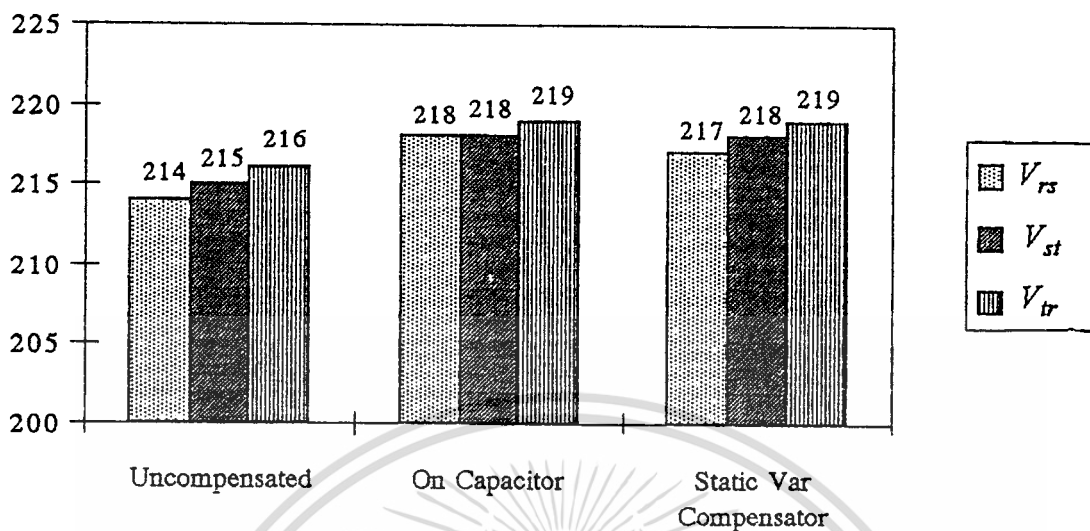
Unbalance 1 เฟส RS		Experiment data																
Status	Vrs	System										Load						
		Vst	Vtr	Ir	Is	It	PFr	PFs	PFt	DTr	DTrs	DTrt	Ir	Is	It	PF	Watts	VA
Uncompensate																		
no-load	217	218	220	0.1	0.1	0.1	0.002 lag	0.012 lead	0.007 lead	90	72	87	0	0	0	0.008	0.21	53.3
2 หลอด	216	219	219	0.7	0.9	0.1	0.92 lag	0.81 lead	0 lead	99	99	87	0.8	0.8	0	0.801	192	240
4 หลอด	214	217	217	1.6	1.7	0.1	0.89 lag	0.84 lead	0 lead	99	99	85	1.7	1.7	0	0.834	377	452
6 หลอด	212	217	216	2.4	2.6	0.1	0.89 lag	0.85 lead	0.002 lead	99	99	84	2.5	2.5	0	0.846	561	663
8 หลอด	210	216	215	3.3	3.4	0.1	0.88 lag	0.85 lead	0.001 lead	99	99	86	3.4	3.4	0	0.851	740	868
10 หลอด	211	219	217	4.1	4.2	0.1	0.88 lag	0.86 lead	0.011 lead	99	99	85	4.2	4.2	0	0.855	917	1070
Capacitor bank																		
no-load	222	221	223	3	3	3	0.006 lead	0.026 lead	0.004 lead	99	99	99	0	0	0	0.01	11	1212
2 หลอด	219	221	221	2.7	3.5	3	0.27 lead	0.23 lead	0.002 lead	99	99	99	0.8	0.8	0	0.17	206	1228
4 หลอด	217	220	221	2.6	4.2	3	0.56 lead	0.37 lead	0.006 lead	99	99	99	1.7	1.7	0	0.307	392	1280
6 หลอด	215	220	218	2.8	4.8	3	0.79 lead	0.48 lead	0.009 lead	99	99	99	2.5	2.5	0	0.42	578	1377
8 หลอด	214	220	218	3.2	5.6	3	0.91 lead	0.54 lead	0.001 lead	99	99	99	3.4	3.4	0	0.49	746	1495
10 หลอด	215	222	220	3.7	6.4	3	0.97 lead	0.59 lead	0.01 lead	99	99	99	4.3	4.3	0	0.557	941	1686
SVC compensata																		
no-load	217	218	219	0.6	0.6	0.6	0.22	0.24	0.18	24	28	18	0	0	0	0.22	65	290
2 หลอด	217	217	219	0.7	0.8	0.9	0.72	0.62	0.58	73	62	58	0.8	0.8	0	0.64	246	384
4 หลอด	216	216	217	1.1	1.1	1.1	0.87	0.81	0.84	88	82	84	1.7	1.7	0	0.84	440	520
6 หลอด	214	215	215	1.6	1.6	1.6	0.89	0.91	0.93	89	91	94	2.5	2.5	0	0.913	625	683
8 หลอด	212	215	215	2	2.2	2	0.93	0.94	0.97	93	94	98	3.4	3.4	0	0.95	800	836
10 หลอด	213	215	217	2.7	2.7	2.3	0.94	0.96	0.96	96	96	99	4.2	4.2	0	0.95	985	1034

หมายเหตุ ค่าตัวประกอบกำลังกรณีใช้การชดเชยโหลดแบบกึ่งอิสระในช่วงใกล้ unity โดยเป็น load/lag ต่อกัน

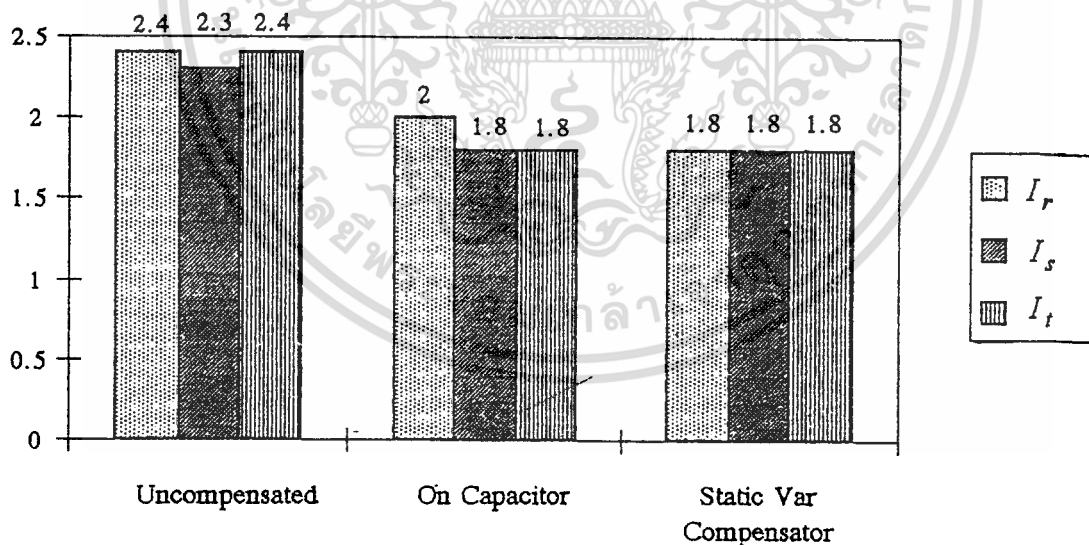
ตารางที่ 5.8 ตารางแสดงผลการทดลองจ่ายโหลดไม่สมดุล 2 เฟส

Experiment data																				
Unbalance 2 เฟส RS ST		System																		
rs	st	lr	V _{rs}			V _{tr}			I _t			PF			Load					
			V _{rs}	V _{st}	V _{tr}	I _r	I _s	I _t	PF _r	PF _s	PF _t	DIFr	DIFs	DIFt	I _r	I _s	I _t	PF	Watts	VA
Uncompensate																				
0	0	0	219	220	223	0.1	0.1	0.1	0.002 lead	0.01 lag	0.016 lead	90	78	85	0	0	0	0.01	0.5	52.8
4	2	0	216	219	221	1.6	2.3	0.9	0.89 lead	0.97 lag	0.81 lead	99	99	99	1.7	2.2	0.8	0.917	573	625
8	6	0	212	217	219	3.3	5.1	2.6	0.88 lead	0.99 lag	0.85 lead	99	99	99	3.3	5.2	2.6	0.929	1296	1395
8	8	0	212	216	220	3.3	5.8	3.5	0.88 lead	1 lag	0.86 lead	99	99	99	3.4	5.8	3.4	0.932	1477	1584
10	6	0	210	217	219	4.1	6.6	3.5	0.88 lead	0.99 lag	0.86 lead	99	99	99	4.2	6.6	3.4	0.931	1650	1771
Capacitor bank																				
0	0	0	223	223	226	3.1	3	3.1	0.024 lead	0.006 lead	0.007 lead	99	99	99	0	0	0	0.012	14	1230
4	2	0	220	223	224	2.6	4.2	3.6	0.56 lead	0.56 lead	0.21 lead	99	99	99	1.7	2.2	0.8	0.44	600	1360
8	6	0	215	221	223	3.2	6.2	4.9	0.91 lead	0.85 lead	0.46 lead	99	99	99	3.4	5.2	2.6	0.73	1340	1839
8	8	0	214	220	222	3.2	6.6	5.7	0.91 lead	0.91 lead	0.54 lead	99	99	99	3.4	5.9	3.4	0.77	1526	1977
10	6	0	213	219	221	3.7	7.5	5.7	0.97 lead	0.9 lead	0.54 lead	99	99	99	4.2	6.7	3.4	0.8	1697	2133
SVC compensato																				
0	0	0	220	220	222	0.6	0.6	0.6	0.24	0.22	0.26	25	24	26	0	0	0	0.24	67	281
4	2	0	218	218	220	1.6	1.6	1.6	0.91	0.92	0.87	91	92	87	1.7	2.2	0.8	0.9	637	701
8	6	0	215	216	217	3.8	3.5	3.5	0.98	0.99	0.97	98	99	97	3.4	5.2	2.5	0.98	1370	1395
8	8	0	214	214	216	4.2	4.2	4	0.97	0.99	0.98	97	99	98	3.4	5.9	3.4	0.98	1550	1578
10	6	0	213	214	216	4.6	4.6	4.4	0.98	0.99	0.98	98	99	98	4.2	6.7	3.4	0.988	1720	1742

หมายเหตุ ค่าตัวประกอบกำลังกรณีใช้การชดเชยโหลดแบบสถิตจะแกว่งในช่วงใกล้ unity โดยเป็น load/lag สถิตกับ

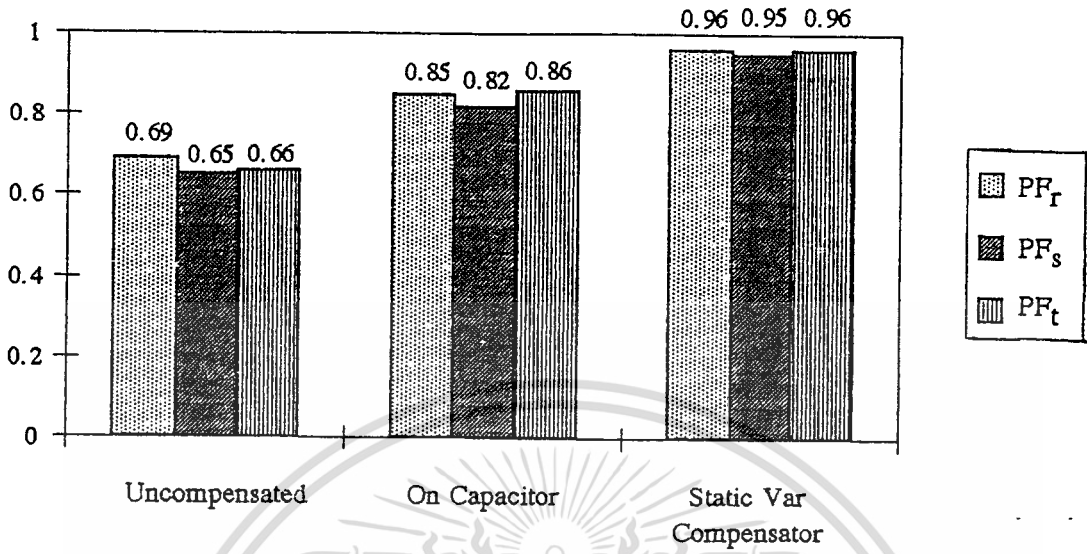


รูปที่ 5.1 กราฟแสดงขนาดของแรงดันระหว่างสาย V_{rs} V_{st} V_{tr} กรณีโหลดสมดุล (โหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส)

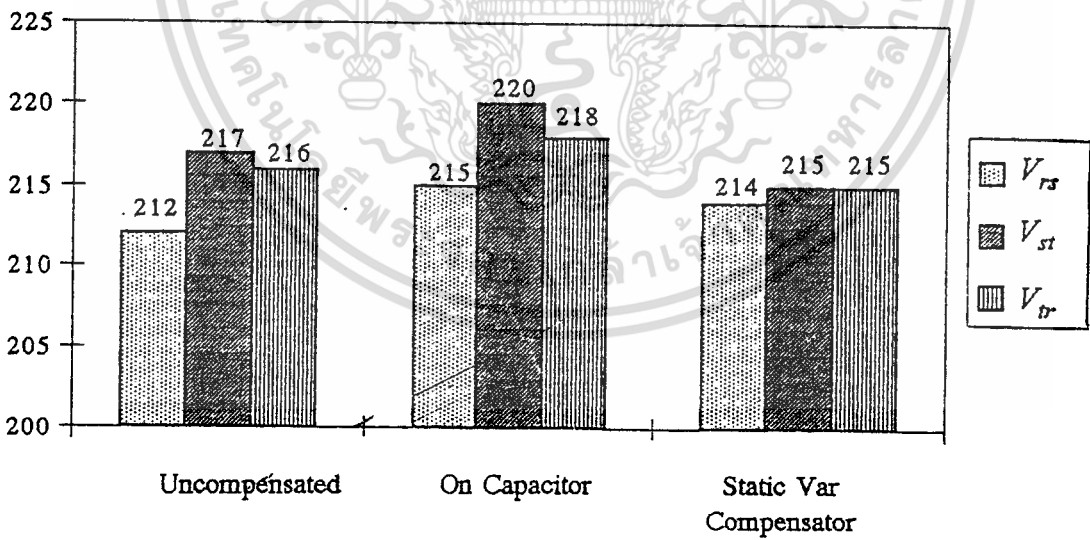


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงขนาดของกระแสสายเข้าระบบ I_r I_s I_t กรณีโหลดสมดุล (โหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

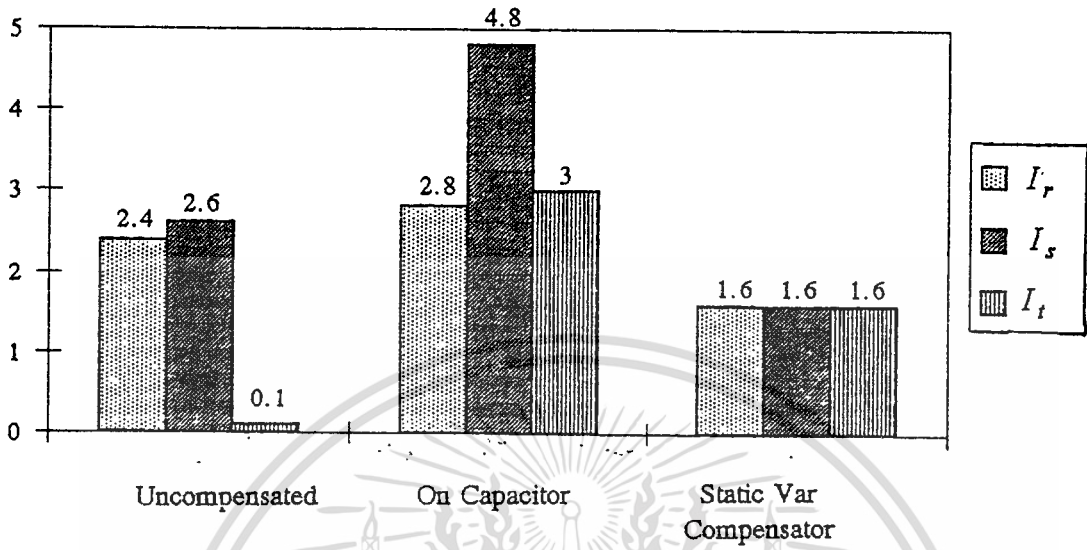


รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่าตัวประกอบกำลัง PF_r PF_s PF_t กรณีโหลดสมดุล (โหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส)

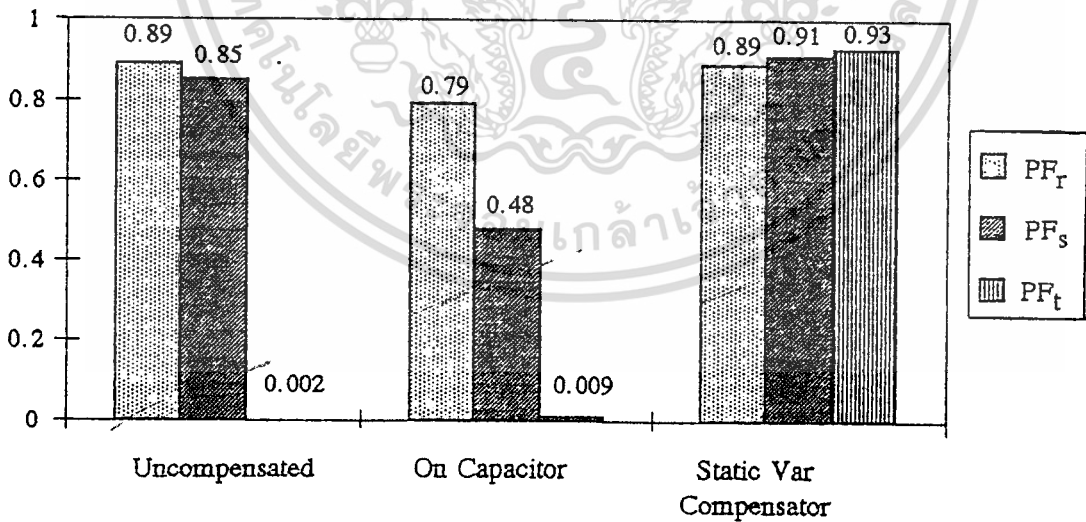


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงขนาดของแรงดันระหว่างสาย V_{rs} V_{st} V_{tr} กรณีโหลดไม่สมดุล (โหลดหลอดไฟ r_s 1 เฟส)

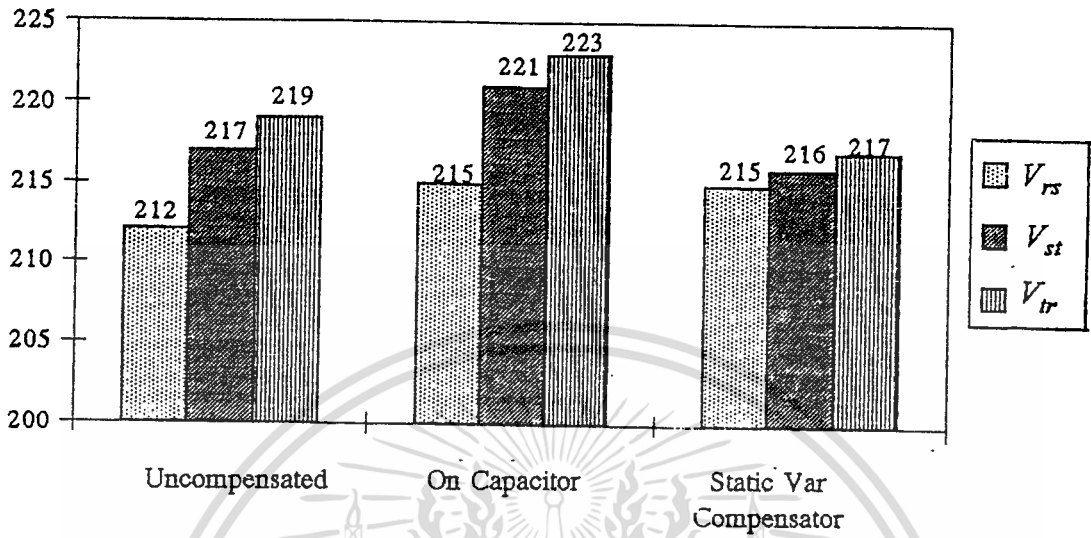
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



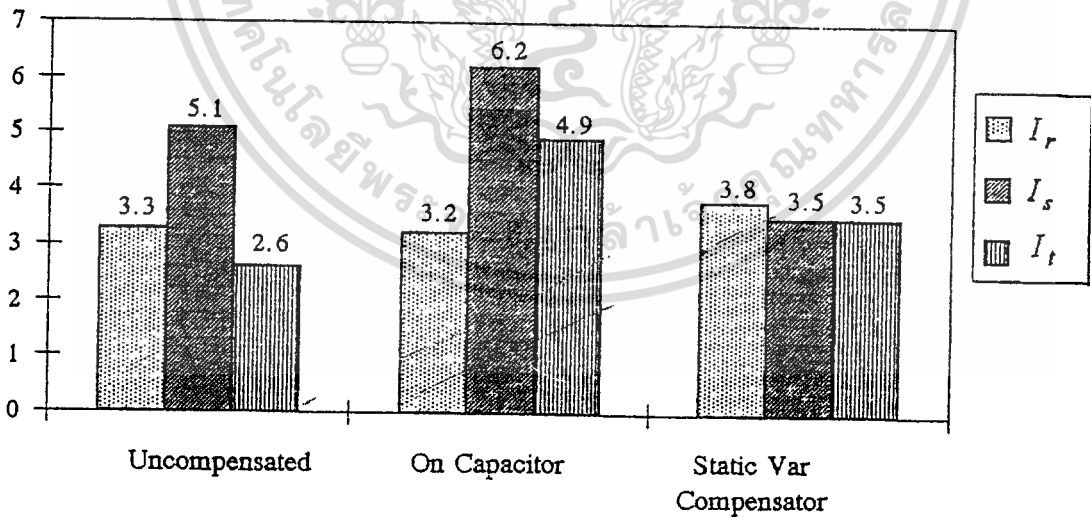
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงขนาดของกระแสสายเข้าระบบ I_r , I_s , I_t กรณีโหลดไม่สมดุล (โหลดหลอดไฟ rs 1 เฟส)



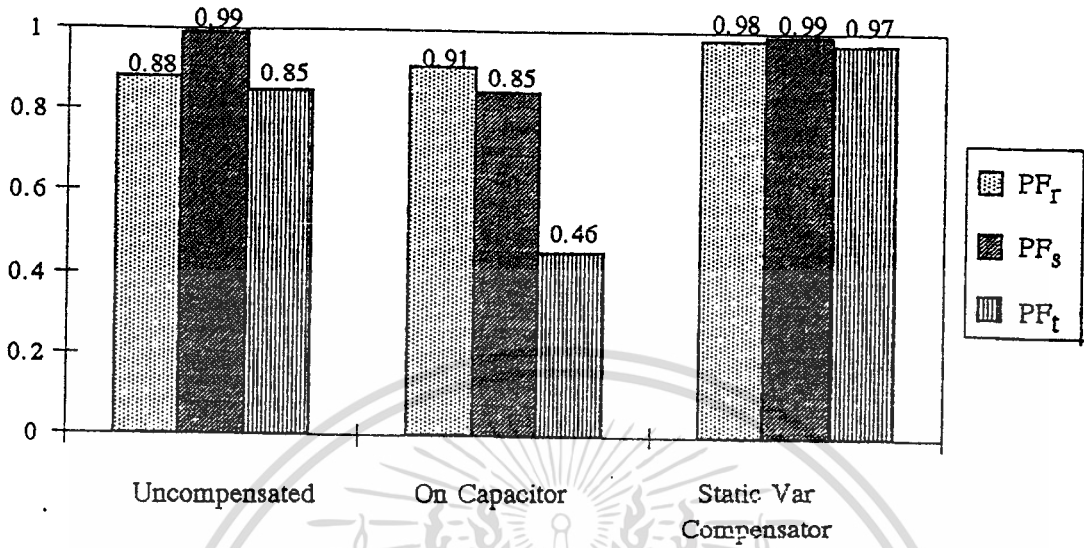
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าตัวประกอบกำลัง PF_r , PF_s , PF_t กรณีโหลดไม่สมดุล (โหลดหลอดไฟ rs 1 เฟส)



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงขนาดของแรงดันระหว่างสาย V_{rs} V_{st} V_{tr} กรณีโหลดไม่สมดุล (โหลดหลอดไฟ rs และ st 2 เฟส)



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงขนาดของกระแสสายเข้าระบบ I_r I_s I_t กรณีโหลดไม่สมดุล (โหลดหลอดไฟ rs และ st 2 เฟส)



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าตัวประกอบกำลัง PF_r , PF_s , PF_t กรณีโหลดไม่สมดุล (โหลดหลอดไฟ r_s และ st 2 เฟส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทวิจารณ์และบทสรุป

ผลการวิเคราะห์แนวโน้มของผลการทดลองอย่างละเอียดสรุปได้ว่า ระบบการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสามารถทำงานได้จริงสอดคล้องกับทฤษฎีทุกประการดังนี้

1. สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และจัดสมดุลกระแสสายสามเฟส โดยการชดเชยเฉพาะความนำจินตภาพเท่านั้น สอดคล้องกับสมการ (2.39)

2. เรกกูเลชันของแรงดันคี่ขึ้น เนื่องจากผลทางเวกเตอร์ของกระแสและแรงดันขณะระบบมีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง (PF = 1) และกระแสสายสามเฟสสมดุลกัน

สรุปปัญหาและแนวทางการแก้ไข

- ปัญหาในระบบชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ที่ใช้โรตอร์ปรับค่ารีแอกเตอร์ ต่อร่วมกับชุดตัวเก็บประจุค่าคงที่

1. ไม่สามารถปรับค่ารีแอกเตอร์ให้เป็นเชิงเส้นได้ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างมุมนำกระแสและค่าความนำจินตภาพ เป็นไปตามสมการ

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

ในขณะที่การส่งค่ามุมทริกโรตอร์ไปควบคุมระบบเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมระบบไม่สม่ำเสมอ การออกแบบระบบควบคุมจะทำได้ยาก

2. ผลของฮาร์โมนิกส์ทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเสียไป และทำให้การควบคุมคลาดเคลื่อน

- ปัญหาของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ของโครงงานนี้ที่เกิดจากการออกแบบ

3. การออกแบบการควบคุมส่วนการแปลงค่าดิจิทัลเป็นอนาลอก แปลงค่าไม่ละเอียดพอ ทำให้การควบคุมผิดพลาดที่ย่านการทำงานไหลดต่ำๆ

แนวทางในการพัฒนาระบบชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

1. ออกแบบตัวชดเชยโดยแบ่งชุดรีแอกเตอร์และชุดตัวเก็บประจุให้เป็นย่อยอิสระจากกันแต่ละเฟส โดยแต่ละเฟสจะมีชุดตัวเก็บประจุหลายชุดและรีแอกเตอร์หลายชุดเช่นกัน ซึ่งจะสามารทำให้ชดเชยความนำเชิงซ้อนเป็นเชิงเส้นได้ เพื่อประกอบกับรีแอกเตอร์ที่ปรับค่าโดย

ไรริสเตอร์ การควบคุมระบบจะทำได้ง่ายและแม่นยำขึ้น ทั้งนี้ยังช่วยลดผลกระทบจากฮาร์โมนิกส์ได้ส่วนหนึ่ง

2. เพิ่มความละเอียดในการแปลงค่าดิจิทัลเป็นอนาลอก ซึ่งจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนค่าบิตลง

3. ออกแบบและสร้างชุดกรองฮาร์โมนิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งจะช่วยให้คุณภาพไฟฟ้าดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



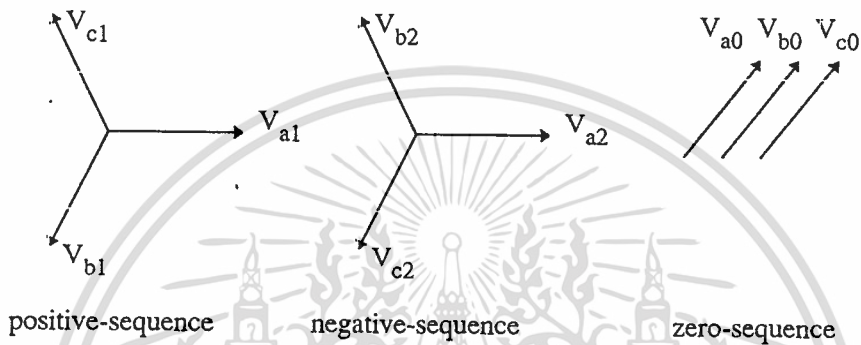
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ส่วนประกอบสมมาตร

(SYMMETRICAL COMPONENT)

การวิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบสมมาตร



ให้ $a = 1 \angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

จากแผนภาพเฟสเซอร์ (Phasor Diagram)

$$\begin{aligned} V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \\ V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \end{aligned} \quad \dots\dots (ก.1)$$

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \\ V_c &= V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \end{aligned} \quad \dots\dots (ก.2)$$

แทนค่าของส่วนประกอบต่างๆจากสมการที่ (ก.1) ลงในสมการที่ (ก.2) จะได้

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \\ V_c &= V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \end{aligned} \quad \dots\dots (ก.3)$$

เขียนในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad \dots\dots (ก.4)$$

เรียกเมตริกซ์ $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$ ว่า "A-operator"

หาอินเวอร์ส (inverse) ของเมตริกซ์ A

$$\text{cof}(A) = \begin{bmatrix} (-1)^{(1+1)}(a^4 - a^2) & (-1)^{(1+2)}(a^2 - a) & (-1)^{(1+3)}(a - a^2) \\ (-1)^{(2+1)}(a^2 - a) & (-1)^{(2+2)}(a^2 - 1) & (-1)^{(2+3)}(a - 1) \\ (-1)^{(3+1)}(a - a^2) & (-1)^{(3+2)}(a - 1) & (-1)^{(3+3)}(a^2 - 1) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} a - a^2 & a - a^2 & a - a^2 \\ a - a^2 & a^2 - 1 & 1 - a \\ a - a^2 & 1 - a & a^2 - 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} a(1-a) & a(1-a) & a(1-a) \\ a(1-a) & -(1+a)(1-a) & (1-a) \\ a(1-a) & (1-a) & -(1+a)(1-a) \end{bmatrix}$$

$$\text{adj}(A) = [\text{cof}(A)]^t$$

$$= (1-a) \begin{bmatrix} a & a & a \\ a & -(1+a) & 1 \\ a & 1 & -(1+a) \end{bmatrix}$$

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

$$\text{adj}(A) = (1-a) \begin{bmatrix} a & a & a \\ a & a^2 & 1 \\ a & 1 & a^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \det(A) &= 1(-1)^{(1+1)}(a^4 - a^2) + 1(-1)^{(1+2)}(a^2 - a) + 1(-1)^{(1+3)}(a - a^2) \\ &= (a - a^2) + (a - a^2) + (a - a^2) \\ &= 3a(1-a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A^{-1} &= \frac{1}{\det(A)} \text{adj}(A) = \frac{1}{3a(1-a)} (1-a) \begin{bmatrix} a & a & a \\ a & a^2 & 1 \\ a & 1 & a^2 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & 1/a \\ 1 & 1/a & a \end{bmatrix} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก $\frac{1}{a} = \frac{1}{e^{j\frac{\pi}{3}}} = e^{-j\frac{\pi}{3}} = a^2$

ดังนั้น $A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$ (ก.5)

เมื่อต้องการหาค่าของส่วนประกอบสมมาตรจะหาได้โดยคูณ A^{-1} ทั้งสองข้างของสมการที่ (ก.4)

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$
 (ก.6)

ทำนองเดียวกับแรงดัน สามารถกระจายกระแสให้อยู่ในรูปส่วนประกอบสมมาตรได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$
 (ก.7)

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$
 (ก.8)

ภาคผนวก ข

การแปลงฟูรีเยอร์ (THE FOURIER TRANSFORM)

ข.1 อนุกรมฟูรีเยอร์ (Fourier Series)

ข.1.1 อนุกรมที่ก้ำกั๋ง (Exponential Series)

ถ้าให้ $x(t)$ เป็นสัญญาณต่อเนื่องในโดเมนเวลา (time domain) โดยทั่วไปปริมาณนี้อาจเป็นปริมาณของศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือประจุไฟฟ้า ถ้า $x(t)$ มีคุณสมบัติเป็นฟังก์ชันคาบ (periodic function) .ที่มีคาบเป็น T_0 กล่าวคือ $x(t+T_0)=x(t)$ ต่อทุกค่าของเวลา t เราสามารถกระจายหรือเขียนแทนฟังก์ชันเป็นคาบนี้ได้ด้วย อนุกรมตรีโกณมิติ คือ

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X_n e^{j2\pi n f_0 t} \quad \dots\dots (ข.1)$$

โดย n เป็นเลขจำนวนเต็ม และสัมประสิทธิ์ X_n สามารถหาได้จากสมการที่ (ข.1) โดยการอินทิเกรตพจน์ต่อพจน์ ดังนี้

$$X_n = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) e^{-j2\pi n f_0 t} dt \quad ; \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad \dots\dots (ข.2)$$

และเรียก f_0 ว่าความถี่หลักมูล (fundamental frequency) ของสัญญาณเป็นคาบ $x(t)$ ในขณะที่ $n f_0$ จะเรียกว่าฮาร์โมนิกที่ n (n^{th} harmonic) คาบเวลาของความถี่หลักมูลคือ $T_0 = 1/f_0$ ซึ่งจะ เป็นคาบเวลาของ $x(t)$ สำหรับ X_n ในสมการที่ (ข.2) คือสัมประสิทธิ์ฟูรีเยอร์ (Fourier Coefficients) ซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อน และสามารถเขียนในเทอมของขนาดและเฟสได้เป็น

$$X_n = |X_n| e^{j\angle X_n} \quad \dots\dots (ข.3)$$

จากสมการที่ (ข.3) นี้ เราอาจเขียนสมการที่ (ข.1) ได้เป็น

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |X_n| e^{j\angle X_n} e^{j2\pi n f_0 t} \quad \dots\dots (ข.4)$$

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ฟูรีเยอร์จะพบว่ามีความสมบัตินสมมาตร (symmetry) กล่าวคือ X_{-n} จะเป็น ตัวยุค (complex conjugate) ของ X_n

$$X_{-n} = X_n^* \quad \dots\dots (ข.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงวินโลโก้ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (ข.5) คำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งหมายความว่า

$$|\mathbf{X}_{-n}| = |\mathbf{X}_n| \quad \text{..... (ข.6)}$$

และ

$$\angle \mathbf{X}_{-n} = -\angle \mathbf{X}_n \quad \text{..... (ข.7)}$$

จากสมการที่ (ข.2) เมื่อค่า $n = 0$ จะได้อัตราค่าสัมประสิทธิ์เป็นจำนวนจริง

$$X_0 = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) dt \quad \text{..... (ข.8)}$$

ซึ่งคือค่าเฉลี่ย (average value) ของสัญญาณเป็นคาบ $x(t)$ เพราะว่าค่า X_0 ในสมการที่ (ข.8) นี้คือพื้นที่ใต้กราฟของ $x(t)$ ในช่วง 1 คาบเวลาหารด้วยระยะเวลา 1 คาบ (T_0)

ข.1.2 อนุกรมโคไซน์ (Cosine Series)

จากสมการที่ (ข.4) สามารถแยกเป็น 3 ส่วน

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{-1} |\mathbf{X}_n| e^{j\angle \mathbf{X}_n} e^{j2\pi n f_0 t} + X_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} |\mathbf{X}_n| e^{j\angle \mathbf{X}_n} e^{j2\pi n f_0 t} \quad \text{..... (ข.9)}$$

ถ้าเรากลับเครื่องหมายของ n ในเทอมแรก จะได้

$$\sum_{n=1}^{+\infty} |\mathbf{X}_{-n}| e^{j\angle \mathbf{X}_{-n}} e^{-j2\pi n f_0 t} \quad \text{..... (ข.10)}$$

จากคุณสมบัติสมมาตรดังสมการที่ (ข.6) และ (ข.7) อาจเขียนสมการที่ (ข.10) ใหม่ได้เป็น

$$\sum_{n=1}^{+\infty} |\mathbf{X}_n| e^{-j\angle \mathbf{X}_n} e^{-j2\pi n f_0 t} \quad \text{..... (ข.11)}$$

แทนเทอมแรกในรูปใหม่นี้ลงในสมการที่ (ข.9) จะได้

$$x(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} |\mathbf{X}_n| e^{-j\angle \mathbf{X}_n} e^{-j2\pi n f_0 t} + X_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} |\mathbf{X}_n| e^{j\angle \mathbf{X}_n} e^{j2\pi n f_0 t} \quad \text{..... (ข.12)}$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler)

$$e^{j\theta} + e^{-j\theta} = 2 \cos \theta \quad \text{..... (ข.13)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เราสามารถจัดรูปสมการที่ (ข.12) ใหม่เป็น

$$x(t) = X_0 + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} |X_n| \cos(2\pi n f_0 t + \angle X_n) \quad \text{..... (ข.14)}$$

โดยเทอม X_0 ยังคงเป็นไปตามสมการที่ (ข.8) ซึ่งบางครั้งอาจจะเรียกว่าส่วนประกอบกระแสตรง (dc component)

ข.1.3 อนุกรมไซน์-โคไซน์ (Sine-Cosine Series)

แม้ว่าอนุกรมฟูรีเยอร์ในรูปเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการที่ (ข.1) และในรูปโคไซน์ (cosine) ดังสมการที่ (ข.14) จะนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่บางครั้งเราอาจเขียนสัญญาณเป็นคาบ $x(t)$ ในรูปของ

$$x(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(2\pi n f_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(2\pi n f_0 t) \quad \text{..... (ข.15)}$$

เทอมค่าเฉลี่ยยังคงเหมือนเดิม คือ

$$X_0 = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) dt \quad \text{..... (ข.16)}$$

สัมประสิทธิ์ของเทอมโคไซน์

$$A_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt \quad \text{..... (ข.17)}$$

สัมประสิทธิ์ของเทอมไซน์

$$B_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt \quad \text{..... (ข.18)}$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler)

$$e^{-j2\pi n f_0 t} = \cos(2\pi n f_0 t) - j \sin(2\pi n f_0 t) \quad \text{..... (ข.19)}$$

ทำให้เราสามารถเขียนสมการที่ (ข.2) ใหม่ได้เป็น

$$X_n = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) [\cos(2\pi n f_0 t) - j \sin(2\pi n f_0 t)] dt \quad \text{..... (ข.20)}$$

แยกสมการที่ (ข.20) เป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพ จะได้

$$\mathbf{X}_n = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt - j \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt \quad \text{..... (ข.21)}$$

จากค่า A_n และ B_n ในสมการที่ (ข.17) และ (ข.18) จะได้ว่า

$$\mathbf{X}_n = \frac{1}{2} A_n - j \frac{1}{2} B_n = \frac{1}{2} (A_n - j B_n) \quad \text{..... (ข.22)}$$

หรือ

$$A_n = 2 \operatorname{Re}[\mathbf{X}_n] \quad \text{และ} \quad B_n = -2 \operatorname{Im}[\mathbf{X}_n] \quad \text{..... (ข.23)}$$

ข.2 การแปลงฟูรีเยอร์เต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform : DFT)

เนื่องจากผลการแปลงฟูรีเยอร์เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่มีประโยชน์ โดยเฉพาะในการวิเคราะห์และศึกษาระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจำเป็นต้องมีวิธีการคำนวณที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมที่จะใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ แต่เนื่องจากนิยามการแปลงฟูรีเยอร์ที่กล่าวมา การคำนวณเป็นการหาค่าอินทิกรัล ซึ่งอาจหาค่าตอบได้หรือไม่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของฟังก์ชัน และการคำนวณหาค่าอินทิกรัลโดยใช้คอมพิวเตอร์จะเป็นการทำการวนรอบเพื่อหาค่าตอบ ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณนาน และไม่แน่ว่าจะมีการลู่เข้าของคำตอบหรือไม่ ในทางกลับกัน ถ้าหากเราสามารถหาวิธีการแปลงแบบใหม่ที่การคำนวณใช้อนุกรมจำกัดให้ได้ค่าใกล้เคียงกับการแปลงเดิม แต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อย การแปลงวิธีใหม่นี้เราเรียกว่า “การแปลงฟูรีเยอร์เต็มหน่วย” ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้งานวิเคราะห์คลื่นสัญญาณต่างๆ

นิยามของการแปลงฟูรีเยอร์เต็มหน่วย

ถ้าให้ $x_p(t)$ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องและมีคุณสมบัติเป็นคาบ โดยที่มีคาบเป็น T_p หรือเขียนได้ว่า

$$x_p(t) = x_p(t + mT_p) \quad \text{..... (ข.24)}$$

โดยที่ m เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆ ในเชิงคณิตศาสตร์ฟังก์ชันแบบนี้อาจเขียนแทนได้ด้วยอนุกรมฟูรีเยอร์ได้ดังนี้

$$x_p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_p(k) e^{j2\pi k f_0 t} \quad \text{..... (ข.25)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $f_0 = 1/T_p$ ซึ่งเป็นค่าความถี่หลักมูล และการเขียนแทนด้วยสมการ

$$X_p(k) = (1/T_p) \int_0^{T_p} x_p(t) \cdot e^{-j2\pi k f_0 t} dt \quad \dots\dots (ข.26)$$

ถึงแม้ว่า $x_p(t)$ ในสมการที่ (ข.24) จะเป็นค่าจริง และ $X_p(k)$ ในสมการที่ (ข.26) จะเป็นค่าเชิงซ้อน แต่โดยทั่วไปแล้วไม่ได้จำกัดว่าต้องเป็นเช่นนี้เสมอไป $x_p(t)$ อาจเป็นค่าเชิงซ้อนและ $X_p(k)$ อาจเป็นค่าจริง หรือเป็นค่าเชิงซ้อนทั้งคู่ก็ได้ ข้อที่น่าสังเกตก็คือ $x_p(t)$ เป็นฟังก์ชันแบบต่อเนื่อง และสเปกตรัม(spectrum) ของมันมีค่าเป็นฟังก์ชันเต็มหน่วย (Discrete Function)

ต่อไปจะเป็นการพิจารณาอนุกรมฟูริเยอร์เมื่อทำการสุ่มสัญญาณแบบต่อเนื่องและเป็นคาบ $x_p(t)$ โดยในการสุ่มสัญญาณได้นั้น สัญญาณต้องมีแถบความถี่ปฏิบัติงานที่แน่นอน (ถ้าหากสัญญาณนั้นๆ ไม่มีแถบความถี่ปฏิบัติงานหรือมีแต่กว้างมาก เราอาจทำการกำหนดแถบความถี่ปฏิบัติงานของมันได้โดยการป้อนผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) เสียก่อน) สมมติให้มีแถบความถี่ปฏิบัติงานเป็น f_1 หรือให้

$$X_p(k) = 0 \quad \text{เมื่อ} \quad |k| > k_1$$

โดยที่ k_1 เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆที่ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของความถี่เป็น

$$k_1 \cdot f_0 = f_1$$

กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เรากำหนดให้สเปกตรัมของความถี่ที่เกินค่า f_1 มีค่าแอมพลิจูดเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูป ข.1(ข)

โดยอาศัยทฤษฎีของการสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่กล่าวไว้ว่า ค่าความถี่ของสัญญาณสุ่มตัวอย่างจะมีค่าน้อยที่สุดเป็น 2 เท่าของแถบความถี่ปฏิบัติงาน หรือในกรณีนี้ต้องเท่ากับ $2f_1$ เพราะฉะนั้น ช่วงเวลาสุ่มตัวอย่าง T ที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณนี้มีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{1}{2f_1} = \frac{1}{2k_1 f_0} = \frac{T_p}{2k_1} \quad \dots\dots (ข.27)$$

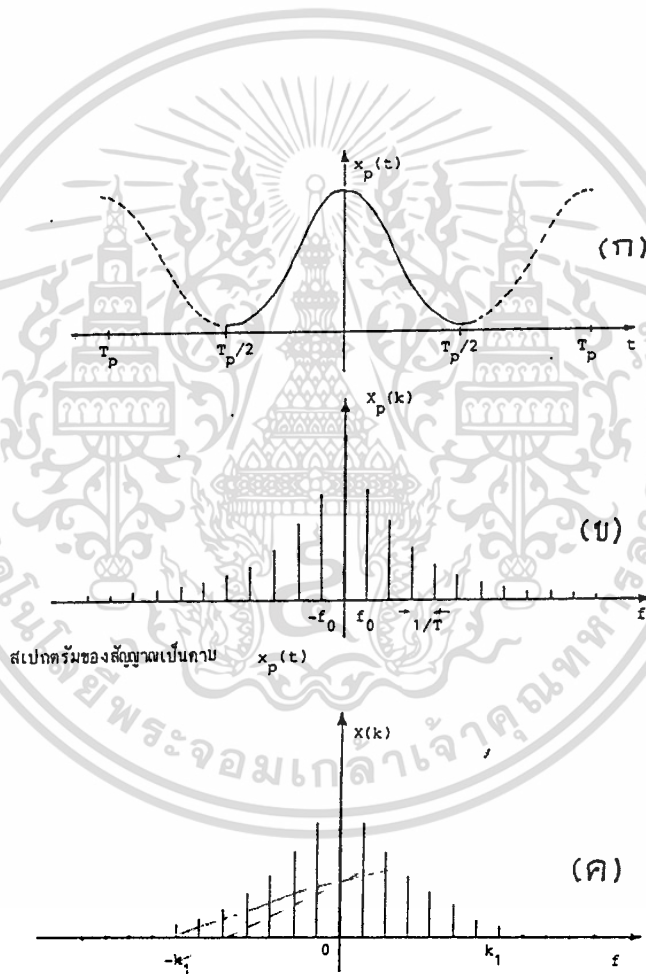
และถ้าในหนึ่งคาบของสัญญาณเราทำการสุ่ม N ช่วง ทำให้ได้ว่า $2k_1 = N$

ดังนั้นสัญญาณ $x_p(t)$ ที่อยู่ในช่วง $0 < t < T_p$ เมื่อถูกสุ่มออกเป็น N ช่วงนี้ สามารถเขียนสมการแทนได้เป็น

$$x(t/T) = \sum_{n=0}^{N-1} x_p(t/T) \cdot \delta((t/T) - n) \quad \dots\dots (ข.28)$$

โดยที่ t/T เป็นเวลาบรรทัดฐาน(normalized time)ซึ่งนิยามในช่วง $0 \leq t < T_p$ หรือ $0 \leq t/T < N$ เนื่องจากสัญญาณ $x(t/T)$ ในสมการที่ (ข.28) เป็นสัญญาณแบบเป็นคาบเช่นกัน ดังนั้นจึงอาจหาสัมประสิทธิ์ฟูรีเยอร์ได้คือ

$$X(k) = \frac{1}{N} \int_0^{N-1} x(t/T) \cdot e^{-j2\pi k/N} \cdot (t/T) dt/T \quad \dots\dots (ข.29)$$



- รูปที่ ข.1 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่มีแถบความถี่ปฏิบัติงานจำกัด
- (ก) สัญญาณเป็นคาบ
- (ข) สเปกตรัมของสัญญาณในรูป ข.1(ก)
- (ค) สเปกตรัมเมื่อจำกัดแถบความถี่ปฏิบัติงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อแทนค่า $x(t/T)$ จากสมการที่ (ข.28) จะได้

$$X(k) = \frac{1}{N} \int_0^{N-1} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} x_p(t/T) \cdot \delta((t/T) - n) \cdot e^{-j2\pi k/N} \cdot (t/T) \right\} d(t/T) \quad \text{..... (ข.30)}$$

และจากคุณสมบัติของอิมพัลส์ $\delta(t_0)$ ที่นิยามว่า

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t/T) \cdot \delta((t/T) - n) \cdot d(t/T) = f(n) \quad \text{..... (ข.31)}$$

เพราะฉะนั้นทำให้ได้

$$X'(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_p(n) \cdot e^{-j2\pi kn/N}$$

และเนื่องจากที่จุดที่ทำการสุ่มสัญญาณ สัญญาณที่สุ่มมา $x(n)$ มีค่าเท่ากับ $x_p(n)$ ดังนั้น

$$X'(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad \text{..... (ข.32)}$$

แต่โดยทั่วไปจะนิยามให้

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad \text{..... (ข.33)###}$$

สมการนี้เรียกว่า การแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย หรือ DFT ของลำดับสัญญาณ $x(n)$ สำหรับการแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วยผกผัน (Inverse Discrete Fourier Transform หรือ IDFT) สามารถหาได้จากสมการที่ (ข.25) โดยการแทน $t = nT$ และ $x_p(t) = x(n)$ และจากสมการที่ (ข.32) และ (ข.33) จะได้ว่า

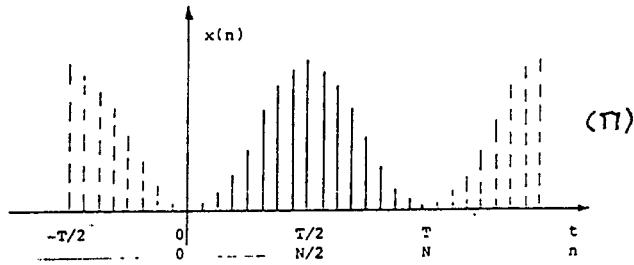
$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{j2\pi kn/N} \quad \text{..... (ข.34)###}$$

โดยที่ลำดับสัญญาณและลำดับของสเปกตรัมจะต้องมีคุณสมบัติความเป็นคาบด้วย กล่าวคือ

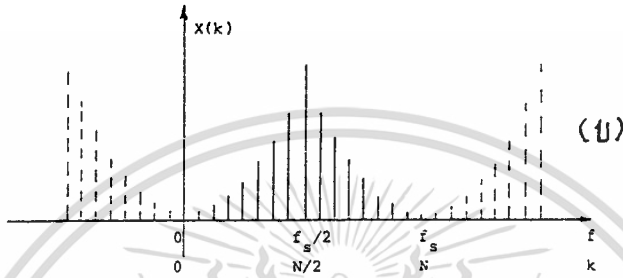
$$x(n) = x(n + mN) \quad \text{เมื่อ } N \text{ เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆ}$$

$$X(k) = X(k + mN) \quad \text{เมื่อ } N \text{ เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆ}$$

คุณสมบัติความเป็นคาบของลำดับ $x(n)$ นั้น มาจากสมมติฐานตอนแรกที่เราทำการสุ่มสัญญาณที่เป็นคาบ ส่วนคุณสมบัติความเป็นคาบของ $X(k)$ เป็นผลมาจากสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่างมา สเปกตรัมของมันมีความเป็นคาบด้วย



$$X(k) = 1/N \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N}$$



$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi nk/N}$$

รูปที่ ข.2 (ก) แสดงลำดับสัญญาณที่ทำการสุ่มตัวอย่างจากฟังก์ชันต่อเนื่องและเป็นคาบ
(ข) สเปกตรัมของรูป ก

กล่าวโดยสรุปก็คือ จากการที่ทำการสุ่มฟังก์ชันเป็นคาบและต่อเนื่อง $x_p(t)$ ออกเป็นฟังก์ชันเต็มหน่วยจำนวน N ลำดับด้วยกัน สเปกตรัมของลำดับเต็มหน่วยนี้หาได้โดยใช้สมการที่ (ข.33) และเมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของลำดับเต็มหน่วยกับสเปกตรัมของฟังก์ชันต่อเนื่องตัวต้นแบบ ในช่วง $0 < k < N-1$ แล้วปรากฏว่าเท่ากันทุกประการ ต่างไปแต่ว่าสเปกตรัมของลำดับเต็มหน่วยมีคุณสมบัติความเป็นคาบด้วย ดังแสดงในรูปที่ ข.2(ข) ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของการคำนวณสเปกตรัมโดยใช้โดยใช้สมการที่ (ข.33) ก็คือ สมการนี้เหมาะเป็นอย่างยิ่งที่จะใช้การคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการคำนวณมีค่าน้อย

ข.3 การแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์ (FAST FOURIER TRANSFORM ; FFT)

การแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์เป็นวิธีการง่ายๆที่ใช้คำนวณการแปลงฟูริเยอร์เต็มหน่วย ซึ่งทำได้รวดเร็วกว่าวิธีอื่นๆ ดังนั้นจะอธิบายแต่เพียงขั้นตอนการคำนวณเท่านั้น ส่วนผลลัพธ์ที่ออกมา นั้นจะเหมือนกับการแปลงฟูริเยอร์เต็มหน่วย

ในการอธิบายจะใช้การสังเกตจากตัวอย่างการแยกตัวประกอบเมตริกซ์อย่างง่าย เมตริกซ์ที่ถูกแยกตัวประกอบแล้วอาจจะแทนด้วยกราฟการไหลของสัญญาณ (signal flow graph)

ได้ ซึ่งจากกราฟนี้จะนำไปสู่การเขียนโปรแกรมคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ หัวข้อต่อไปนี้จะอธิบาย ทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการพัฒนากระบวนการคำนวณแบบฟาสต์ฟูริเยอร์ (FFT Algorithm)

ข.3.1 การก่อรูปเมตริกซ์ (MATRIX FORMULATION)

จากการแปลงฟูริเยอร์เต็มหน่วย

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(k) e^{-j2\pi nk/N} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad \dots\dots (ข.35)$$

ซึ่งได้จากการแทน kT ด้วย k และแทน n/NT ด้วย n เพื่อสะดวกต่อการอธิบาย จากสมการที่ (ข.35) จะต้องมีการคำนวณทั้งสิ้น N สมการ ถ้ากำหนดให้

$$W = e^{-j2\pi/N} \quad \dots\dots (ข.36)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (ข.35) ใหม่ได้เป็น

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(k) W^{nk} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad \dots\dots (ข.37)$$

สำหรับกรณี $N = 4$ กระดาษสมการที่ (ข.37) ได้ดังนี้

$$\begin{array}{l} k=0 \quad k=1 \quad k=2 \quad k=3 \\ n=0 \rightarrow X(0) = x_0(0)W^0 + x_0(1)W^0 + x_0(2)W^0 + x_0(3)W^0 \\ n=1 \rightarrow X(1) = x_0(0)W^0 + x_0(1)W^1 + x_0(2)W^2 + x_0(3)W^3 \\ n=2 \rightarrow X(2) = x_0(0)W^0 + x_0(1)W^2 + x_0(2)W^4 + x_0(3)W^6 \\ n=3 \rightarrow X(3) = x_0(0)W^0 + x_0(1)W^3 + x_0(2)W^6 + x_0(3)W^9 \end{array} \quad \dots\dots (ข.38)$$

จากสมการที่ (ข.38) สามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad \dots\dots (ข.39)$$

สมมติให้ตัวอักษรตัวหนาแทนเมตริกซ์จะได้ว่า

$$\mathbf{X}(n) = \mathbf{W}^{nk} \mathbf{x}_0(k) \quad \dots\dots (ข.40)$$

พิจารณาสมการที่ (ข.39) เนื่องจาก W เป็นจำนวนเชิงซ้อน และ $x(k)$ ก็อาจจะเป็นจำนวนเชิงซ้อนด้วย ดังนั้นในการคำนวณจะต้องทำการคูณจำนวนเชิงซ้อน N^2 ครั้งและบวกจำนวนเชิงซ้อนอีก $(N)(N-1)$ ครั้ง แต่เนื่องจากคอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำการคูณได้โดยตรง

กล่าวคือจะใช้เวลาในการคูณมาก การแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์จะเป็นวิธีการที่ช่วยลดจำนวนครั้งในการคูณและการบวกที่ใช้ในการคำนวณสมการที่ (ข.39) ในหัวข้อต่อไปนี้จะอธิบายว่าการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์สามารถลดจำนวนครั้งในการคูณได้อย่างไร

ข.8.2 การหาวิธีการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์

เพื่อความสะดวกในการอธิบายกระบวนการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์เราจะกำหนดจุดในการสุ่ม $N = 2^\gamma$ โดย γ เป็นจำนวนเต็ม และใช้การศึกษาจากตัวอย่างกรณี $N = 4$ ซึ่งมีผลลัพธ์ดังสมการที่ (ข.39)

จากคุณสมบัติความเป็นคาบของจำนวนเชิงซ้อน

$$W^{nk} = W^{[nk \bmod N]} \quad \dots\dots (ข.41)$$

เช่น $N = 4 \quad W^6 = W^{6 \bmod 4} = W^2$

เนื่องจาก
$$\begin{aligned} W^{nk} &= W^6 = e^{(-j\frac{2\pi}{4})(6)} = e^{-j3\pi} \\ &= e^{-j\pi} = e^{(-j\frac{2\pi}{4})(2)} = W^2 = W^{nk \bmod N} \quad \dots\dots (ข.42) \end{aligned}$$

จากคุณสมบัติความเป็นคาบนี้ สามารถเขียนสมการที่ (ข.39) ใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W^1 & W^2 & W^3 \\ 1 & W^2 & W^0 & W^2 \\ 1 & W^3 & W^2 & W^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad \dots\dots (ข.43)$$

และจากคุณสมบัติความเป็นคาบนี้เองทำให้เราสามารถแยกตัวประกอบของเมตริกซ์ W^{nk} ออกเป็นเมตริกซ์ย่อยหลายเมตริกซ์คู่กัน โดยพยายามทำให้สมาชิกภายในเมตริกซ์ย่อยมีค่าเป็นศูนย์มากที่สุด

วิธีการแยกตัวประกอบเมตริกซ์ (Matrix-Factorization)

ในการแยกตัวประกอบจะเขียนครรชนี k และ n ของสมการที่ (ข.37) ในรูปตัวเลขฐานสอง สำหรับกรณีตัวอย่าง $N = 4$ ครรชนี k และ n จะมีค่าได้เพียง 0,1,2 และ 3 เท่านั้น ดังนั้นจึงแทนด้วยเลขฐานสองจำนวน 2 หลัก คือ

$$\begin{aligned} k &= 0, 1, 2, 3 & \text{or} & & k &= (k_1, k_0) = 00, 01, 10, 11 \\ n &= 0, 1, 2, 3 & \text{or} & & n &= (n_1, n_0) = 00, 01, 10, 11 \quad \dots\dots (ข.44) \end{aligned}$$

โดยที่ k_1, k_0, n_1 และ n_0 เป็นเลขโดดที่มีค่า 0 หรือ 1 เท่านั้น ครรชนี k และ n ในสมการที่ (ข.44) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$k = 2k_1 + k_0 \quad n = 2n_1 + n_0 \quad \dots\dots (ข.45)$$

เมื่อนำค่าตัวแปร k และ n ในสมการที่ (ข.45) ไปแทนลงในสมการที่ (ข.37) จะได้

$$X(n_1, n_0) = \sum_{k_0=0}^1 \sum_{k_1=0}^1 x_0(k_1, k_0) W^{(2n_1+n_0)(2k_1+k_0)} \quad \dots\dots (ข.46)$$

จากคุณสมบัติความเป็นคาบของ W ทำให้ได้ความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} W^{(2n_1+n_0)(2k_1+k_0)} &= W^{(2n_1+n_0)2k_1} \cdot W^{(2n_1+n_0)k_0} \\ &= W^{4n_1k_1} \cdot W^{2n_0k_1} \cdot W^{(2n_1+n_0)k_0} \end{aligned}$$

เนื่องจาก $W^{4n_1k_1} = (W^4)^{n_1k_1} = [e^{-j2\pi/4}]^{n_1k_1} = [1]^{n_1k_1} = 1$
ดังนั้น

$$W^{(2n_1+n_0)(2k_1+k_0)} = W^{2n_0k_1} \cdot W^{(2n_1+n_0)k_0} \quad \dots\dots (ข.47)$$

เพราะฉะนั้นสมการที่ (ข.46) จะกลายเป็น

$$X(n_1, n_0) = \sum_{k_0=0}^1 \left\{ \sum_{k_1=0}^1 x_0(k_1, k_0) W^{2n_0k_1} \right\} W^{(2n_1+n_0)k_0} \quad \dots\dots (ข.48)$$

สมการนี้จะใช้เป็นพื้นฐานของกระบวนการคำนวณแบบฟาสต์ฟูริเยอร์ ชั้นแรกพิจารณาแต่ละผลรวมของสมการที่ (ข.48) โดยสมมติให้ $x_1(n_0, k_0)$ แทนค่าผลรวมที่อยู่ในวงเล็บปีกกา ซึ่งเป็นการคำนวณระหว่างกลาง

$$x_1(n_0, k_0) = \sum_{k_1=0}^1 x_0(k_1, k_0) W^{2n_0k_1} \quad \dots\dots (ข.49)$$

จากสมการที่ (ข.49) แทนค่า n_0, k_1, k_0 แล้วพิจารณาคำตอบที่ได้

$$\begin{aligned} & \begin{matrix} k_1 = 0 & k_1 = 1 \end{matrix} \\ n_0 = 0, k_0 = 0 & \rightarrow x_1(0,0) = x_0(0,0)W^{2(0)(0)} + x_0(1,0)W^{2(0)(1)} \\ n_0 = 0, k_0 = 1 & \rightarrow x_1(0,1) = x_0(0,1)W^{2(0)(0)} + x_0(1,1)W^{2(0)(1)} \quad \dots\dots (ข.50) \\ n_0 = 1, k_0 = 0 & \rightarrow x_1(1,0) = x_0(0,0)W^{2(1)(0)} + x_0(1,0)W^{2(1)(1)} \\ n_0 = 1, k_0 = 1 & \rightarrow x_1(1,1) = x_0(0,1)W^{2(1)(0)} + x_0(1,1)W^{2(1)(1)} \end{aligned}$$

เขียนสมการที่ (ข.50) ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x_1(0,0) \\ x_1(0,1) \\ x_1(1,0) \\ x_1(1,1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0,0) \\ x_0(0,1) \\ x_0(1,0) \\ x_0(1,1) \end{bmatrix} \quad \dots\dots (ข.51)$$

ทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลรวมภายนอกของสมการที่ (ข.48)

$$x_2(n_0, n_1) = \sum_{k_0=0}^1 x_1(n_0, k_0) W^{(2n_1+n_0)k_0} \quad \dots\dots (ข.52)$$

แทนค่า n_1, n_0, k_0 แล้วพิจารณาคำตอบที่ได้

$$\begin{array}{l} k_0 = 0 \qquad k_0 = 1 \\ n_0 = 0, n_1 = 0 \rightarrow x_2(0,0) = x_1(0,0)W^{[2(0)+0](0)} + x_1(0,1)W^{[2(0)+0](1)} \\ n_0 = 0, n_1 = 1 \rightarrow x_2(0,1) = x_1(0,0)W^{[2(1)+0](0)} + x_1(0,1)W^{[2(1)+0](1)} \\ n_0 = 1, n_1 = 0 \rightarrow x_2(1,0) = x_1(1,0)W^{[2(0)+1](0)} + x_1(1,1)W^{[2(0)+1](1)} \\ n_0 = 1, n_1 = 1 \rightarrow x_2(1,1) = x_1(1,0)W^{[2(1)+1](0)} + x_1(1,1)W^{[2(1)+1](1)} \end{array} \quad \dots\dots (ข.53)$$

เขียนสมการที่ (ข.53) ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x_2(0,0) \\ x_2(0,1) \\ x_2(1,0) \\ x_2(1,1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(0,0) \\ x_1(0,1) \\ x_1(1,0) \\ x_1(1,1) \end{bmatrix} \quad \dots\dots (ข.54)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (ข.48) กับสมการที่ (ข.52) จะได้ว่า

$$X(n_1, n_0) = x_2(n_0, n_1) \quad \dots\dots (ข.55)$$

นั่นคือ ผลลัพธ์ $x_2(n_0, n_1)$ ที่ได้จากผลรวมภายนอกของสมการที่ (ข.48) จะมีลำดับที่กลับบิต (bit reversed order) กับค่า $X(n_1, n_0)$ ซึ่งเป็นการสลับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้การแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์

$$\begin{bmatrix} X(0,0) \\ X(1,0) \\ X(0,1) \\ X(1,1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(0,0) \\ x_2(0,1) \\ x_2(1,0) \\ x_2(1,1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(0,0) \\ x_1(0,1) \\ x_1(1,0) \\ x_1(1,1) \end{bmatrix} \quad \dots\dots (ข.56)$$

สรุปสมการที่ใช้ในการคำนวณกระบวนการแปลงฟาสต์ฟูรีเยอร์ ๒ ชั้น $N = 4$ ด้วยวิธีของ Cooley-Tukey ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}x_1(n_0, k_0) &= \sum_{k_1=0}^1 x_0(k_1, k_0) W^{2n_0 k_1} \\x_2(n_0, n_1) &= \sum_{k_0=0}^1 x_1(n_0, k_0) W^{(2n_1+n_0)k_0}\end{aligned}\quad \text{..... (ข.57)}$$

$$X(n_1, n_0) = x_2(n_0, n_1)$$

จากวิธีการแยกตัวประกอบที่ได้แสดงมาทั้งหมดจะทำให้เราสามารถแยกตัวประกอบของเมตริกซ์จัตุรัสในสมการที่ (ข.43) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix}\quad \text{..... (ข.58)}$$

ต่อไปจะเป็นการอธิบายผลที่ได้จากการแยกตัวประกอบเมตริกซ์ และพิจารณาว่าการแปลงฟาสต์ฟูรีเยอร์สามารถลดจำนวนครั้งในการคูณได้อย่างไร

เมื่อตรวจสอบสมการที่ (ข.58) พบว่าผลคูณของเมตริกซ์จัตุรัสจะได้ผลเหมือนกับเมตริกซ์จัตุรัสในสมการที่ (ข.43) ยกเว้นเพียงแถวที่ 1 และ 2 จะสลับกัน (เรียกแถวที่ 0,1,2,3) สมมติให้ $\overline{X(n)}$ แทนเมตริกซ์ที่ถูกสลับแถวกัน (row-interchange vector) นั่นคือ

$$\overline{X(n)} = \begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix}\quad \text{..... (ข.59)}$$

จากสมการที่ (ข.58) ให้เมตริกซ์ $x_1(k)$ แทนผลคูณของ 2 เมตริกซ์ทางด้านขวา

$$x_1(k) = \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_1(1) \\ x_1(2) \\ x_1(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix}\quad \text{..... (ข.60)}$$

ในการคำนวณสมาชิก $x_1(0)$ ต้องใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้ง สำหรับ W^0 บางตัวที่ไม่ถูกลดรูปลงเป็น 1 เพราะว่าการพัฒนาให้อยู่ในรูปทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_1(0) = x_0(0) + W^0 x_0(2) \quad \text{..... (ข.61)}$$

ในการหาสมาชิก $x_1(1)$ จะต้องคูณจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้ง แต่สำหรับ $x_1(2)$ สามารถทำให้เหลือเพียงการบวกจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้งอย่างเดียว โดยอาศัยความจริงที่ว่า $W^2 = -W^0$ กล่าวคือ

$$\begin{aligned} x_1(2) &= x_0(0) + W^2 x_0(2) \\ &= x_0(0) - W^0 x_0(2) \end{aligned} \quad \text{..... (ข.62)}$$

เมื่อผลคูณจำนวนเชิงซ้อน $W^0 x(2)$ ได้ถูกคำนวณเรียบร้อยแล้วในการหา $x_1(0)$ ในสมการที่ (ข.61) ในทำนองเดียวกันสามารถคำนวณ $x_1(3)$ โดยใช้เพียงการบวกจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้ง ไม่ต้องคูณจำนวนเชิงซ้อน สรุปได้ว่าในการหาเมตริกซ์ $x_1(k)$ จะใช้การบวกจำนวนเชิงซ้อน 4 ครั้ง และใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียง 2 ครั้งเท่านั้น

พิจารณาการคำนวณสมการที่ (ข.58) ต่อให้สมบูรณ์

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(0) \\ x_2(1) \\ x_2(2) \\ x_2(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_1(1) \\ x_1(2) \\ x_1(3) \end{bmatrix} \quad \text{..... (ข.63)}$$

สมาชิก $x_1(0)$ สามารถหาได้โดยใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้ง

$$x_2(0) = x_1(0) + W^0 x_1(1) \quad \text{..... (ข.64)}$$

สำหรับ $x_2(1)$ จะใช้เพียงการบวกจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้งเท่านั้น เนื่องจาก $W^2 = -W^0$ ด้วยเหตุผลเดียวกันการหา $x_2(2)$ จะใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้งและบวกจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้ง ส่วน $x_2(3)$ ใช้แต่การบวกจำนวนเชิงซ้อน 1 ครั้ง

สรุปได้ว่าการคำนวณ $\overline{X(n)}$ ตามสมการที่ (ข.58) จะใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมด 4 ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมด 8 ครั้ง ซึ่งแต่เดิมถ้าเราใช้สมการที่ (ข.39) ในการคำนวณ $X(n)$ เราจะต้องใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อนถึง 16 ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อนอีก 12 ครั้ง วิธีการแยกตัวประกอบเมตริกซ์นี้จะเป็นการนำค่า 0 เข้าไปในเมตริกซ์ย่อย (factored matrices) ซึ่งจะช่วยลดจำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อน จากตัวอย่างกรณี $N = 4$ วิธีการแยกตัวประกอบเมตริกซ์สามารถลดจำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อนลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งทำให้สามารถคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ได้เร็วขึ้น ด้วยเหตุนี้เองการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์จึงเป็นวิธีการคำนวณที่มีประสิทธิภาพสูง

สำหรับ $N = 2^Y$ (Y เป็นจำนวนเต็ม) กระบวนการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์จะสามารถแยกตัวประกอบเมตริกซ์ $N \times N$ ออกเป็น Y เมตริกซ์ได้โดยง่าย (แต่ละเมตริกซ์ย่อยมีมิติ $N \times N$) โดยแต่ละเมตริกซ์ย่อยจะมีคุณลักษณะเฉพาะที่ทำให้จำนวนครั้งในการคูณและบวกจำนวนเชิงซ้อนลดลง

เมื่อเราพิจารณาผลจากตัวอย่างที่ผ่านมาจะพบว่า เมื่อใช้วิธีการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์

- จำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อน เท่ากับ

$$\frac{N}{2} Y = \frac{N}{2} (\log_2 N) = \frac{4}{2} (\log_2 4) = 4 \text{ ครั้ง}$$

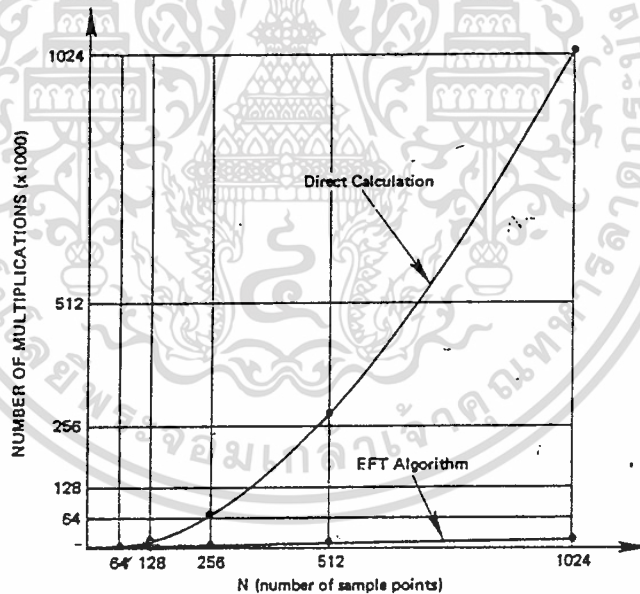
- จำนวนครั้งในการบวกจำนวนเชิงซ้อน เท่ากับ

$$N Y = N (\log_2 N) = 4 (\log_2 4) = 8 \text{ ครั้ง}$$

ในขณะที่ถ้าใช้วิธีการโดยตรงตามสมการที่ (ข.39)

- จำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อน เท่ากับ N^2 ครั้ง

- จำนวนครั้งในการบวกจำนวนเชิงซ้อน เท่ากับ $N(N-1)$ ครั้ง



รูปที่ ข.3 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อนเมื่อคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์กับคำนวณด้วยวิธีโดยตรง

ถ้าสมมติให้เวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการคำนวณขึ้นตรงกับจำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นเราสามารถประมาณอัตราส่วนเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีโดยตรงต่อวิธีการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์ได้ดังสมการ

$$\frac{N^2}{\frac{N}{2} \log_2 N} = \frac{2N}{\log_2 N} \quad \text{..... (ข.65)}$$

เช่น กรณี $N = 1024 = 2^{10}$ เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะลดลง $\frac{2 \times 1024}{\log_2 1024} = 204.8$ เท่า

วิธีการแยกตัวประกอบเมตริกซ์นี้มีข้อเสียอยู่ 1 ประการคือ เมื่อคำนวณสมการที่ (ข.58) แล้วจะได้ $\overline{X(n)}$ แทนที่จะได้ $X(n)$ กล่าวคือ

$$\overline{X(n)} = \begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} \quad \text{แทนที่จะเป็น} \quad X(n) = \begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} \quad \text{..... (ข.66)}$$

แต่การที่จะต้องจัดเรียงลำดับของคำตอบใหม่นี้ถือว่าเป็นปัญหาที่เล็กน้อย เนื่องจากมีวิธีการเฉพาะที่ใช้สลับสมาชิกภายใน (unscrambling) $\overline{X(n)}$ ให้เป็นเมตริกซ์ $X(n)$ คือ วิธีผันกลับบิต (bit-reversed) ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. เขียน $\overline{X(n)}$ ใหม่ โดยแทนอาร์กิวเมนต์ (argument) n ด้วยเลขฐานสอง

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} \quad \text{กลายเป็น} \quad \begin{bmatrix} X(00) \\ X(10) \\ X(01) \\ X(11) \end{bmatrix} \quad \text{..... (ข.67)}$$

2. กลับลำดับบิตของอาร์กิวเมนต์ n (เช่น 01 กลายเป็น 10 , 10 กลายเป็น 01) จะได้

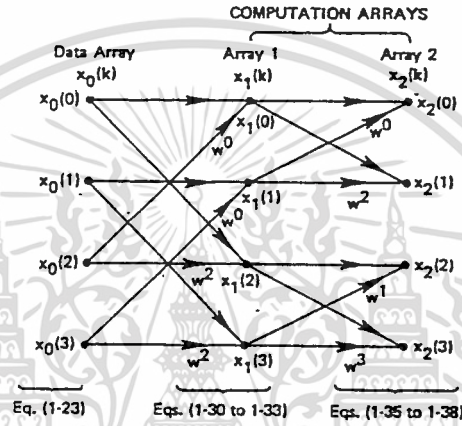
$$\overline{X(n)} = \begin{bmatrix} X(00) \\ X(10) \\ X(01) \\ X(11) \end{bmatrix} \quad \text{กลายเป็น} \quad \begin{bmatrix} X(00) \\ X(01) \\ X(10) \\ X(11) \end{bmatrix} = X(n) \quad \text{..... (ข.68)}$$

ซึ่งสามารถพัฒนาวิธีการสลับผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์ให้อยู่ในรูปทั่วไปได้

การแยกตัวประกอบเมตริกซ์อย่างสมการที่ (ข.58) ในกรณีที่ N มากกว่า 4 จะทำได้ลำบาก ด้วยเหตุนี้เราจึงใช้แผนภาพ (graphical manner) แสดงการคำนวณตามสมการที่ (ข.58) ซึ่งทำให้เราสามารถพัฒนาต่อไปเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข.3.3 กราฟการไหลของสัญญาณ (SIGNAL FLOW GRAPH)

เราสามารถเปลี่ยนสมการที่ (ข.58) ให้เป็นกราฟการไหลของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ ข.4 จากรูปเราแทนเวกเตอร์ข้อมูลหรืออาร์เรย์ข้อมูล $x_0(k)$ ด้วยคอลัมน์แนวตั้งของโนดต่างๆ ทางด้านซ้ายของกราฟ อาร์เรย์แนวตั้งที่สองของโนดต่างๆเป็นเวกเตอร์ $x_1(k)$ ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (ข.60) และอาร์เรย์แนวตั้งถัดมาเป็นเวกเตอร์ $x_2(k) = \overline{X(n)}$ ดังสมการที่ (ข.63) โดยทั่วไปจะมีอาร์เรย์คำนวณทั้งหมด γ อาร์เรย์ เมื่อ $N = 2^\gamma$



รูปที่ ข.4 กราฟการไหลของสัญญาณแสดงการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์กรณี $N = 4$

สังเกตจากกราฟการไหลของสัญญาณพบว่าแต่ละโนดจะมีเส้นตรงเข้า 2 เส้นแทนเส้นทางส่งสัญญาณ (transmission paths) จากโนดก่อนหน้า เส้นทางที่เขียนนี้ใช้แทนการส่งค่าจากโนดในอาร์เรย์หนึ่ง คูณด้วย W^p และนำผลลัพธ์ส่งให้โนดในอาร์เรย์ถัดไป โดย W^p จะเขียนไว้ใกล้กับหัวลูกศรของเส้นทางส่งสัญญาณ ถ้าไม่ได้เขียนไว้แสดงว่า $W^p = 1$ ผลลัพธ์ที่ได้จากเส้นทางส่งสัญญาณ 2 เส้นจะนำมาบวกกันก่อนเข้าสู่โนดในอาร์เรย์ถัดไป

ยกตัวอย่างเช่น โหนด $x_1(2)$ ในรูปที่ ข.4 จากหลักการของกราฟการไหลของสัญญาณจะได้ว่า

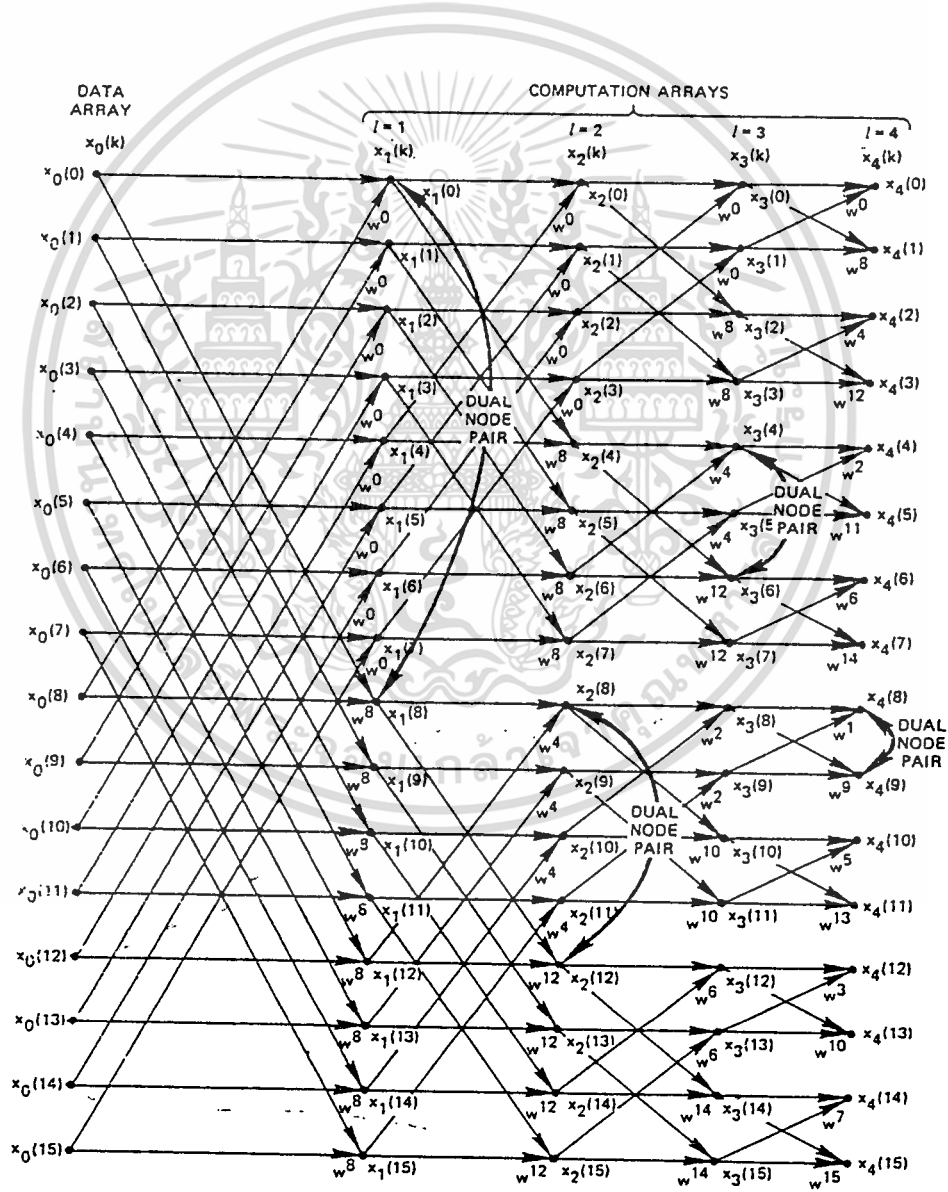
$$x_1(2) = x_0(0) + W^2 x_0(2) \quad \dots\dots (ข.69)$$

ซึ่งเหมือนกับสมการที่ (ข.62) สำหรับโนดอื่นๆของกราฟการไหลของสัญญาณก็เขียนได้ในทำนองเดียวกับตัวอย่างนี้

การแสดงผลการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์แบบแยกตัวประกอบเมตริกซ์ (factored matrix FFT algorithm) ดังสมการที่ (ข.58) โดยใช้กราฟการไหลของสัญญาณสามารถทำได้สะดวก คอลัมน์คำนวณแต่ละคอลัมน์ของกราฟจะสอดคล้องกับเมตริกซ์ย่อย (factored matrix)

โดยถ้ามีการสุ่ม N จุด จะใช้อาร์เรย์แนวดิ่ง γ อาร์เรย์ ($N = 2^\gamma$) ประโยชน์ของการแสดงการคำนวณด้วยรูปกราฟคือเพื่อความง่ายในการอธิบายกระบวนการแยกตัวประกอบเมตริกซ์เมื่อ N มีค่ามากๆ

จากรูปที่ ข.5 แสดงกราฟการไหลของสัญญาณ กรณี $N=16$ ซึ่งกราฟขนาดนี้สามารถมองเห็นวิธีการคำนวณทั้งหมดในรูปทั่วไป และสามารถพัฒนาไปสู่การเขียนแผนภูมิการทำงาน (flowchart) สำหรับการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์ด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ ข.5 ตัวอย่างแสดงโนคคู่เสมอกัน (dual-node)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3.4 โหนดคู่เสมอกัน (DUAL NODES)

พิจารณาจากรูปที่ ข.5 จะสังเกตพบว่าในทุกๆอาร์เรย์จะมี 2 โหนด ที่มีเส้นทางส่งสัญญาณมาจากคู่ของโหนดในอาร์เรย์ก่อนหน้าคู่เดียวกัน เช่น โหนด $x_1(0)$ และ $x_1(8)$ จะคำนวณมาจากเทอม $x_0(0)$ และ $x_0(8)$ และยังพบอีกว่าโหนด $x_0(0)$ และ $x_0(8)$ ไม่ได้ถูกใช้คำนวณโหนดอื่นๆเลย เราจะเรียกโหนด 2 โหนดดังกล่าวนี้ว่า “คู่โหนดคู่เสมอกัน (Dual Node Pair)”

เนื่องจากการคำนวณคู่โหนดเป็นอิสระจากโหนดอื่นๆ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณแบบแทนที่ตัวแปรเดิม (in-place computation) ได้ กล่าวคือ จากรูปที่ ข.5 เราสามารถคำนวณ $x_1(0)$ และ $x_1(8)$ ในเทอมของ $x_0(0)$ และ $x_0(8)$ แล้วส่งค่าผลลัพธ์เข้าเก็บไว้ในตัวแปร $x_0(0)$ และ $x_0(8)$ ซึ่งทำให้ใช้พื้นที่เก็บอาร์เรย์ข้อมูล $x_0(k)$ เท่านั้น โดยผลลัพธ์ที่คำนวณได้ในแต่ละอาร์เรย์จะถูกส่งกลับมายังอาร์เรย์ $x_0(k)$ นี้

- ระยะห่างระหว่างโหนดคู่เสมอกัน (Dual-Node Spacing)

หัวข้อนี้จะเป็นการพิจารณาระยะห่างระหว่างโหนดคู่เสมอกัน (วัดในแนวตั้งในเทอมของดรรชนี k). ในการอธิบายจะอ้างอิงจากรูปที่ ข.5

- ในอาร์เรย์ $l=1$ คู่โหนด $\{x_1(0), x_1(8)\}$ ห่างกัน $k=8 = N/2^1 = 16/2^1$
- ในอาร์เรย์ $l=2$ คู่โหนด $\{x_2(8), x_2(12)\}$ ห่างกัน $k=4 = N/2^2 = 16/2^2$
- ในอาร์เรย์ $l=3$ คู่โหนด $\{x_3(4), x_3(6)\}$ ห่างกัน $k=2 = N/2^3 = 16/2^3$
- ในอาร์เรย์ $l=4$ คู่โหนด $\{x_4(8), x_4(9)\}$ ห่างกัน $k=1 = N/2^4 = 16/2^4$

จากการพิจารณาตัวอย่าง สรุปได้ว่า “ระยะห่างระหว่างโหนดคู่เสมอกันในอาร์เรย์ที่ l จะมีค่า $N/2^l$ ” ดังนั้น โหนด $x_1(k)$ จะมีโหนดคู่เสมอกันคือโหนด $x_1(k + N/2^l)$ ซึ่งจากข้อสรุปนี้ช่วยทำให้เราหาคู่โหนดได้ง่ายขึ้น

- การคำนวณโหนดคู่เสมอกัน (Dual-Node Computation)

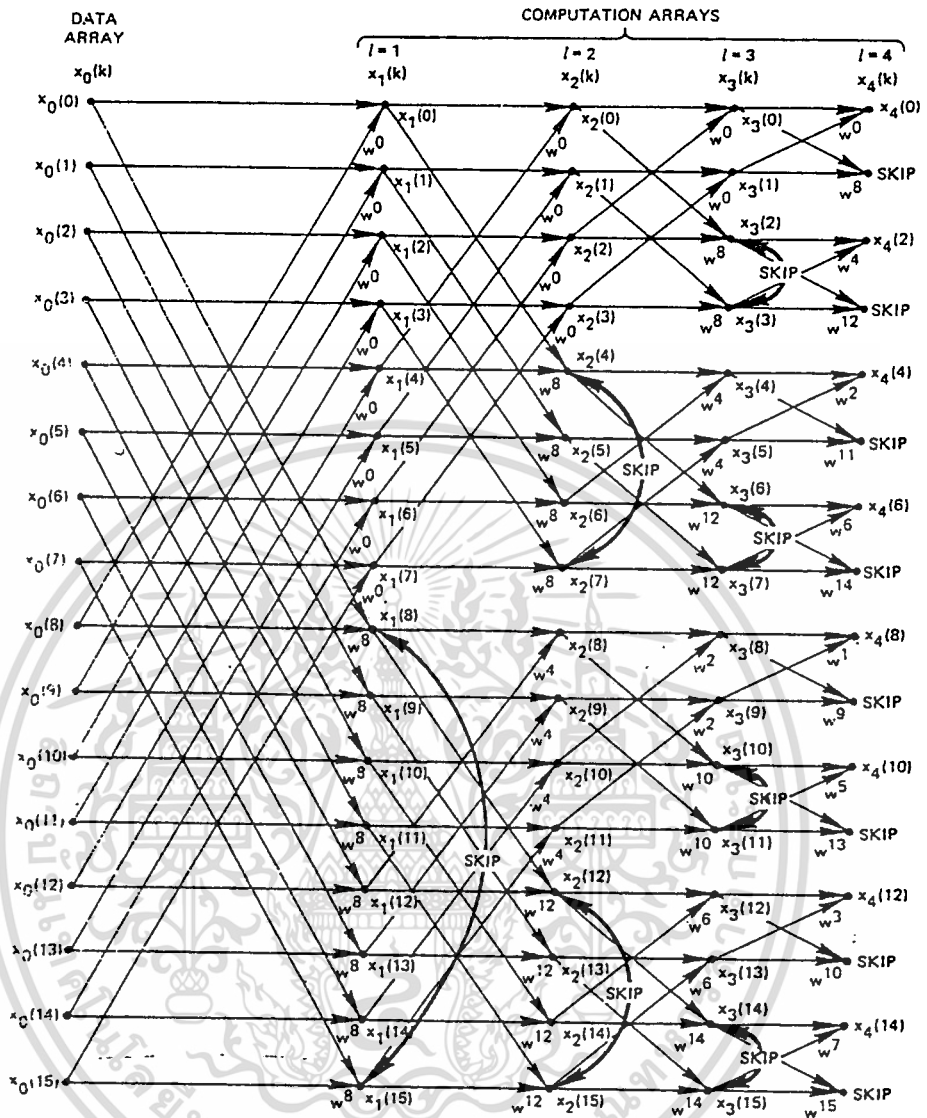
ในการคำนวณโหนดจะต้องคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น พิจารณาตัวอย่างที่โหนด $x_2(8)$ และโหนดคู่เสมอกันของมันคือ $x_2(12)$ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ ข.5 พบว่าเส้นทางส่งสัญญาณที่กำเนิดมาจากโหนด $x_1(12)$ จะถูกคูณด้วย W^4 เข้าสู่โหนด $x_2(8)$ และคูณด้วย W^{12} เข้าสู่โหนด $x_2(12)$ และที่สำคัญคือ $W^4 = -W^{12}$ ดังนั้นจึงมีการคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียง 1 ครั้งเท่านั้น เพราะว่าข้อมูล $x_1(12)$ จะถูกคูณด้วยเทอม W^4 นี้เหมือนกัน

$$x_2(8) = x_1(12) + W^4 x_1(12)$$

$$x_2(12) = x_1(12) + W^{12} x_1(12)$$

$$= x_1(12) - W^4 x_1(12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 ตัวอย่างแสดงโนดที่ต้องกระโดดข้าม เมื่อคำนวณกราฟการไหลของสัญญาณ

โดยทั่วไป ถ้าตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) ที่โนดใดโนดหนึ่งมีค่า W^P แล้ว ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักที่โนดคู่เสมอกันจะเป็น $W^{P+N/2}$ และเนื่องจาก $W^P = -W^{P+N/2}$ ดังนั้นในการคำนวณแต่ละคู่โนดจึงมีการคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น การคำนวณคู่โนดใดๆ จะใช้สมการคู่ต่อไปนี้

$$\begin{aligned} x_l(k) &= x_{l-1}(k) + W^P x_{l-1}(k + N/2^l) \\ x_l(k + N/2^l) &= x_{l-1}(k) - W^P x_{l-1}(k + N/2^l) \end{aligned} \quad \text{..... (ข.70)}$$

ในการคำนวณอาร์เรย์หนึ่งๆ เราจะเริ่มต้นที่โนด $k=0$. โดยคำนวณตามสมการที่ (ข.70) จากนั้นจะเพิ่มค่า k เพื่อทำจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของอาร์เรย์ และจากข้อสรุปในหัวข้อ

ก่อนหน้านี้ โหนดคู่เสมอกันของโนดใดๆในอาร์เรย์ที่ l จะอยู่ต่ำลงไป $N/2^l$ ในอาร์เรย์นั้น และเนื่องจากว่าระยะห่างระหว่างโนดคู่เสมอกันเป็น $N/2^l$ ดังนั้นในการคำนวณเราจึงสามารถกระโดดข้าม (skip) ทุกๆ $N/2^l$ โหนดได้ (ยกตัวอย่างเช่น อาร์เรย์ $l=2$ ในรูปที่ ข.6 ที่โนดเริ่มต้น $k=0$ ตามที่ได้อธิบายมาแล้ว โหนดคู่เสมอกันจะอยู่ที่ $k = N/2^l = 16/2^2 = 4$ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากรูปที่ ข.6 เมื่อเราคำนวณลงมาเรื่อยๆจนถึงโนดที่ 4 ซึ่งเราได้คำนวณและป้อนค่าใหม่เข้าไปเรียบร้อยแล้ว เนื่องจากโนด $k=4,5,6$ และ 7 เป็น dual-node ของโนด $k=0,1,2$ และ 3 ดังนั้นจึงสามารถข้ามโนด $k=4,5,6$ และ 7 ไปได้ สำหรับโนด 8,9,10 และ 11 ก็เหมือนกัน ก็จะมีโนดคู่เสมอกันอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำลงมา 4 ตำแหน่ง สรุปได้ว่าในการคำนวณอาร์เรย์ที่ l ใดๆ จากบนลงล่าง เราจะคำนวณตามสมการที่ (ข.70) ใน $N/2^l$ โหนดแรก แล้วข้าม $N/2^l$ โหนดถัดมา สลับกันไปเช่นนี้ และจะหยุดการคำนวณในอาร์เรย์นี้เมื่อค่าครชนิชีค่าโนด (k) มากกว่า $N-1$

ข.3.5 การหาค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก W^p

หัวข้อต่างๆที่ผ่านมาเราได้อธิบายคุณสมบัติของแต่ละอาร์เรย์ยกเว้นค่า p ในสมการที่ (ข.70) ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้ศึกษาวิธีการหาค่า p ใน W^p ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เขียนค่าครชนิชีค่าโนด k ในรูปเลขฐานสองขนาด γ บิต
2. เลื่อนบิตของเลขฐานสองที่เขียนได้ในขั้นตอนที่ 1 ไปทางขวา (shift right) $\gamma-l$ บิต และเติมเลข 0 ฐานสองเข้าในตำแหน่งที่ว่างทางด้านซ้าย
3. กลับลำดับบิตค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 เช่น จาก $a_4a_3a_2a_1$ เป็น $a_1a_2a_3a_4$
ค่าที่กลับบิตเรียบร้อยแล้ว คือ ค่า p ที่นำไปใช้แทนในสมการที่ (ข.70)

ยกตัวอย่างเช่น จากรูปที่ ข.6 พิจารณาโนด $x_3(8)$ เนื่องจาก $\gamma=4$, $k=8$ และ $l=3$ ดังนั้นเลขฐานสองของค่า k จะเป็น 1000 เลื่อนบิตไปทางขวา $\gamma-l = 4-3 = 1$ ตำแหน่งและเติม 0 เข้าทางซ้าย ได้ผลลัพธ์เป็น 0100 เมื่อเรากลับลำดับบิตจะได้ 0010 ซึ่งเท่ากับ 2 ในเลขฐานสิบ ดังนั้น p จึงเท่ากับ 2

วิธีการผันกลับบิตโดยใช้คอมพิวเตอร์

เราจะมาศึกษากระบวนการผันกลับบิตจากตัวอย่างซึ่งสมมติให้จำนวนเต็มที่ต้องการกลับลำดับบิตสามารถเขียนในรูปเลขฐานสองได้เป็น $a_4a_3a_2a_1$ ซึ่งมีค่าในฐานสิบเท่ากับ $a_4 \times 2^3 + a_3 \times 2^2 + a_2 \times 2^1 + a_1 \times 2^0$ จำนวนที่กลับลำดับบิตแล้วมีค่าในฐานสิบเท่ากับ $a_1 \times 2^3 + a_2 \times 2^2 + a_3 \times 2^1 + a_4 \times 2^0$ ดังนั้นถ้าเราสามารถหาเทคนิคในการหาบิตต่างๆของเลขฐานสองของเลขจำนวนเต็มฐานสิบจากเลขจำนวนเต็มฐานสิบได้ เราก็จะสามารถนิยามกระบวนการผันกลับบิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้ M เป็นเลขฐานสองเท่ากับ $a_4a_3a_2a_1$

1. เมื่อหาร M ด้วย 2 หรือ 10_2 ซึ่งเหมือนเป็นการเลื่อนบิตไปทางขวา (shift right) ได้ $a_4a_3a_2$
2. จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้จากข้อ 1 คูณด้วย 2 หรือ 10_2 ซึ่งเหมือนเป็นการเลื่อนบิตไปทางซ้าย (shift left) ได้ $a_4a_3a_20$
3. นำค่า M ลบด้วยค่าที่คำนวณได้จากข้อ 2 จะได้

$$a_4a_3a_2a_1 - 2(a_4a_3a_2) = a_4a_3a_2a_1 - a_4a_3a_20$$

ซึ่งถ้าบิต a_1 เป็น 0 จะได้ค่าผลต่างในข้อ 3 นี้เป็น 0 แต่ถ้าบิต a_1 เป็น 1 ค่าผลต่างนี้จะเท่ากับ 1 ซึ่งจากคุณสมบัติข้อนี้ทำให้เราสามารถใช้นิยามนี้ในการหาค่า a_1 ว่าเป็น 0 หรือ 1

ในการหาบิต a_2 ก็ทำได้ในทำนองเดียวกัน โดยการพิจารณาสมการผลต่างที่เหมาะสม คือ $a_4a_3a_2 - 2(a_4a_3) = a_4a_3a_2 - a_4a_30$ ถ้าผลต่างเป็น 0 แสดงว่า a_2 เท่ากับ 0 สำหรับบิต a_3 และ a_4 ก็ทำได้ในทำนองเดียวกันนี้ กระบวนการหาการผันกลับบิตตามตัวอย่างนี้สามารถที่จะพัฒนาไปสู่การเขียนโปรแกรมด้วยคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมอีกครั้งในหัวข้อที่ ข.3.7

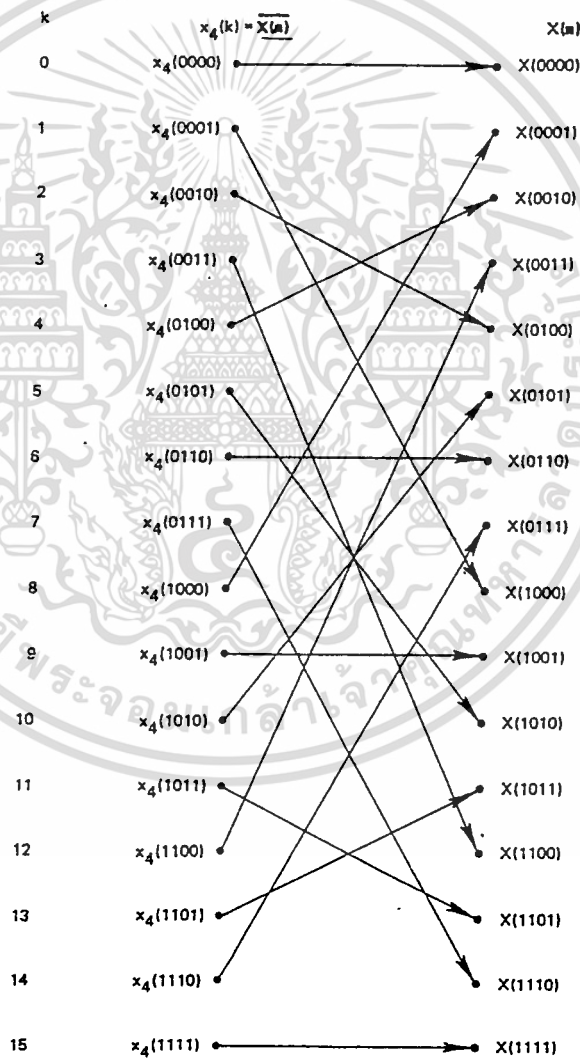
ข.3.6 การสลับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์

ขั้นตอนสุดท้ายในการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์คือการสลับผลลัพธ์ที่ได้ คล้ายกับการแปลง $\overline{X(n)}$ ให้เป็น $X(n)$ ดังสมการที่ (ข.68) โดยกระบวนการในการสลับสมาชิกของเมตริกซ์ $\overline{X(n)}$ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เริ่มต้นที่ $k=0$
2. ให้เขียนค่า k ในรูปเลขฐานสอง
3. ทำการสลับลำดับบิตเลขฐานสองของ k ด้วยวิธีการในหัวข้อที่ ข.3.5 สมมติให้ผลลัพธ์ที่ได้เท่ากับ I
4. ถ้าค่า I ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ k ให้ทำการสลับค่าผลลัพธ์ในอาร์เรย์ที่ γ ระหว่าง $x_\gamma(k)$ กับ $x_\gamma(i)$ แต่ถ้าค่า I ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า k แสดงว่าค่าผลลัพธ์ที่โนด k นี้ได้ถูกสลับค่าเรียบร้อยแล้วตั้งแต่ตอนที่ k มีค่าเท่ากับค่า I ที่คำนวณได้ในตอนหลังนี้
5. เพิ่มค่า k ขึ้น 1 แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 2, 3, 4 ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนกว่าจะทำครบทุกโนด

ยกตัวอย่างเช่น กรณี $\gamma=4$ ที่โนด $k=2 \rightarrow k=0010$ จะได้ $i=0100 \rightarrow i=4$ นั่นคือ สลับค่า $x_4(4)$ กับค่า $x_4(2)$

จากรูปที่ ข.7 แสดงการสลับผลลัพธ์ที่ได้สำหรับ $N=16$ ซึ่ง $\gamma=4$ โหนด $k=0$ ยังคงอยู่ตำแหน่งเดิม โหนด $k=1,2$ และ 3 ได้ถูกสลับกับโนด $8,4$ และ 12 ตามลำดับ โหนดถัดไปที่จะพิจารณาคือโนด $k=4$ จำนวนค่า i ได้เท่ากับ 2 แต่เนื่องจาก $x_4(4)$ ได้ถูกสลับกับค่า $x_4(2)$ เรียบร้อยแล้วจึงไม่ต้องสลับค่ากันอีก



รูปที่ ข.7 ตัวอย่างการผืนกลับบิต (bit-reversing) กรณี $N = 16$

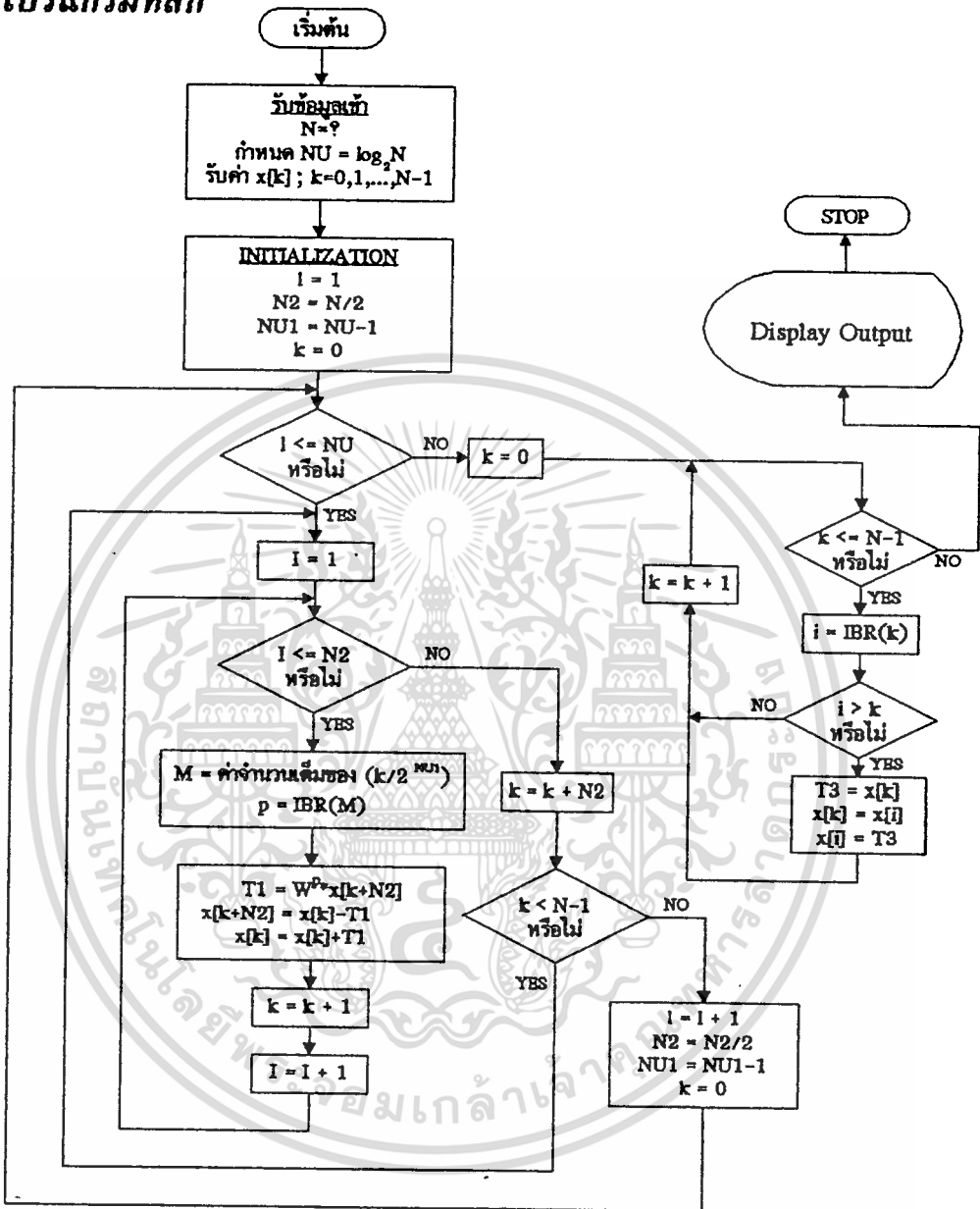
ข.8.7 แผนภูมิการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูรีเยอร์

(FFT COMPUTATION FLOWCHART)

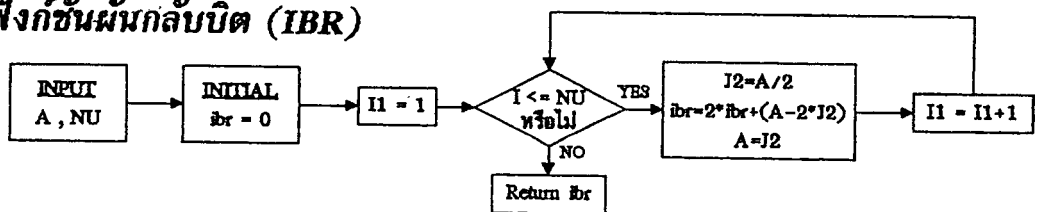
จากคุณสมบัติของกราฟการไหลของสัญญาณที่แสดงการคำนวณฟาสต์ฟูรีเยอร์ (FFT Signal Flow Graph) สามารถที่จะพัฒนาเป็นการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูรีเยอร์ด้วยการเขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ จากการอธิบายในหัวข้อที่ผ่านมาสามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูรีเยอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้ดังนี้

1. คำนวณอาร์เรย์ $I=1$ โดยเริ่มต้นที่โนด $k=0$ และทำการคำนวณจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของอาร์เรย์
2. ที่โนด k ใดๆ ให้คำนวณโดยใช้คู่สมการของสมการที่ (ข.70) สำหรับค่า p ใน WP สามารถหาได้จากกระบวนการที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ ข.3.5
3. ทำตามข้อ 2 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงบริเวณของโนดที่ต้องกระโดดข้าม ให้กระโดดข้ามโนดเหล่านี้ไป เนื่องจากได้ทำการคำนวณเรียบร้อยแล้ว และคำนวณในโนดที่ต่อจากบริเวณที่ข้ามไป ทำเช่นนี้จนกว่าจะครบทุกโนดในอาร์เรย์
4. คำนวณอาร์เรย์ที่เหลืออยู่โดยใช้กระบวนการเดียวกัน จนครบทุกอาร์เรย์ (γ อาร์เรย์)
5. ขั้นตอนสุดท้าย ให้ทำการสลับสมาชิกในอาร์เรย์สุดท้าย จะได้ผลลัพธ์ของกระบวนการแปลงฟาสต์ฟูรีเยอร์ตามต้องการ

โปรแกรมหลัก



ฟังก์ชันผัดกลับบิต (IBR)



รูปที่ ข.8 แสดงแผนภูมิการทำงานสำหรับเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณ

กระบวนการแปลงฟาสต์ฟูริเยอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

ในรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor-Controlled Reactor) ใช้ตัวเก็บประจุ 3 เฟส ที่ต่อแบบเดลต้าขนาด 10 kVA ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำที่จะต่อขนานกับตัวเก็บประจุจะต้องมีขนาด 10/3 kVA ต่อเฟส

กำหนดพิกัดของตัวเหนี่ยวนำ

1. แรงดัน 380 V
2. กำลังต่อเฟส 3.3 kVA
3. ความถี่ 50 Hz
4. Δ Temperature 25°C

คำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ

$$\begin{aligned} \text{current per phase} &= \frac{(3.34 \times 10^4)}{380} = 8.8 \text{ A} \\ X_L &= \frac{380}{8.8} = 43.18 \ \Omega \\ L &= \frac{X_L}{2\pi f} \\ &= \frac{43.18}{2\pi(50)} \\ &= 137.45 \text{ mH} \end{aligned}$$

คำนวณผลคูณเชิงพื้นที่ (Area Product)

เลือกแผ่นเหล็กผสมซิลิกอนแบบแกนรูป EI เป็นแกนตัวเหนี่ยวนำ

จากตารางข้อมูลในหนังสือ "Transformer and Inductor Design Handbook" ของ Colonel Wm.T. McLyman กำหนดค่า K_j : Current Density Coefficient ที่ Δ Temperature = 25°C เท่ากับ 366 และกำหนดค่า K_w : Window Utilization Factor = 0.4

$$\begin{aligned}
 A_p &= \left\{ \frac{VA \times 10^4}{4.44 f B_m K_j K_u} \right\}^{1.14} \\
 &= \left\{ \frac{(3.34 \times 10^3)(10^4)}{4.44(50)(1)(366)(0.4)} \right\}^{1.14} \\
 &= 2,713.39 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

จากตารางเลือกแกน EI ขนาด 3 นิ้ว ซึ่งมีหน้าตัดแกนที่ประหยัดสุดและแกนเหล็กที่สุด คือ A_c :

Core Area

$$\begin{aligned}
 A_c &= (3 \times 2.54)^2 \\
 &= 58.0644 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

คำนวณจำนวนรอบ

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{E}{4.44 f B_m A_c} = \frac{380 \times 10^4}{4.44(50)(1)(58.06)} \\
 &= 294.82 \text{ turn} \\
 &\approx 295 \text{ turn}
 \end{aligned}$$

คำนวณขนาดของอากาศ

$$\begin{aligned}
 g &= \frac{0.4\pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{L} \\
 &= \frac{0.4\pi(295)^2(58.06)(10^{-8})}{(137.45 \times 10^{-3})} \\
 &= 0.462 \text{ cm} \\
 &= 4.62 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

คำนวณค่า Fringing Flux ; F

$$\begin{aligned}
 F &= 1 + \frac{g}{\sqrt{A_c}} \ln \left(\frac{2G}{g} \right) \\
 &= 1 + \frac{(0.462)}{\sqrt{58.06}} \ln \frac{2(2.54 \times 4.5)}{0.462} \\
 &= 1.237 \text{ Wb}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณจำนวนรอบที่ถูกต้อง

$$\begin{aligned}
 N' &= \sqrt{\frac{gL}{0.4\pi A_c F \times 10^{-8}}} \\
 &= \sqrt{\frac{(0.462)(137.45 \times 10^{-3})}{0.4\pi(58.06)(1.237 \times 10^{-8})}} \\
 &= 265.25 \text{ turn} \\
 &= 266 \text{ turn}
 \end{aligned}$$

$N-N' = 29$ รอบ คิดเป็น 10% ของจำนวนรอบ N ซึ่งเท่ากับ 295 รอบ จึงกำหนดการแบ่งขดลวด ออกเป็น 3 ชุด (3 Taps) ที่จำนวนรอบ 266 รอบ , 295 รอบ และ 325 รอบ ตามลำดับ

คำนวณค่าความหนาแน่นกระแส J : Current Density

$$\begin{aligned}
 J &= K_j A_p^{-0.12} \\
 &= 366(2713.39)^{-0.12} \\
 &= 141.73 \text{ A/cm}^2 \\
 A_w &= \frac{I}{J} = \frac{8.8}{141.73} = 62.09 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ 8.8 A จากตารางของลวดอบน้ำยา เลือกเส้นลวดเบอร์

SWG16

ภาคผนวก ง

โปรแกรมควบคุมการทำงาน

```
/******  
* Program : SVC03.C *  
* Description : Test program for "Static VAR Compensator Control" *  
* using PCL-818 pacer trigger A/D conversion with *  
* interrupt data transfer. *  
* Revision : 1.00 *  
* Date : 9/March/96 Electrical Engineering KMIT'L *  
*****/  
  
#include <stdio.h>  
#include <conio.h>  
#include <stdlib.h>  
#include <dos.h>  
#include <alloc.h>  
#include <math.h>  
#include "C:\BORLANDC\TEMP\complex1.h"  
#include "C:\BORLANDC\TEMP\userint.h"  
#include "C:\BORLANDC\TEMP\svc2.h"  
  
#define pi 3.141592654  
#define NUMPTS 256  
#define N 256  
#define f 50  
#define Delay 1.0835*pi/180  
#define errBL 0.18/xl /* %error BL */  
#define ADD 0.1  
#define fbck 0.00005  
#define xl 48.1  
#define hardware_delay 0  
extern pcl818(int , unsigned int *);  
  
void main_panel(void);  
void zoom_panel(void);  
void pf_panel(void);  
void FFT(void);  
int IBR(int A);  
double convert_angle(double angle);  
void SUS_CAL(void);  
void DIGITAL_OUT_PORT(unsigned int x,unsigned int y,unsigned int z);  
void TABLE(void);  
int SUS_SIGMA(double CAL_BL);  
void CONTROL(void);  
void INITIAL_CARD(void);  
void initial_control(void);  
void FEEDBACK(void);  
void WINDOWS(int plotnum);  
  
void ham(complex *x,int n);  
void han(complex *x,int n);  
void triang(complex *x,int n);  
void black(complex *x,int n);  
void harris(complex *x,int n);  
  
unsigned int param[60]; /* If two boards installed, need to declare  
the second parameter array */  
  
unsigned int far * card;  
unsigned int far * dat;  
complex far *samp;  
static complex far *work;
```

```

double far *sig_plot;
double far *spec_plot;

char ch;
complex x[1500];
double RMS_Va,RMS_Ia,RMS_Ib,RMS_Ic,PF_Ia,PF_Ib,PF_Ic; /*output from DO_FFT()*/
double phi_a,phi_b,phi_c,
    Angle_Ia_refer_to_Va,Angle_Ib_refer_to_Va,Angle_Ic_refer_to_Va;
double True_RMS,Angle_Funda,RMS_Funda; /* output from FFT() */
complex Ia_load,Ib_load,Ic_load; /*load current phase a,b,c in complex number*/

int NU; /* use in FFT() and IBR(M) */
int lag_Ia,lag_Ib,lag_Ic; /* lag is logic value =1 when I lag V
    and =0 when I inphase/lead V */
int panel_hdl1,panel_hdl2,panel_hdl3;
int systemflag;
double Angle_Va_Funda,Angle_Vb_Funda,Angle_Vc_Funda;
double Angle_Ia_Funda,Angle_Ib_Funda,Angle_Ic_Funda;
double RMS_Va_Funda,RMS_Ia_Funda,RMS_Ib_Funda,RMS_Ic_Funda;
double DPF_Ia,DPF_Ib,DPF_Ic,DTF_Ia,DTF_Ib,DTF_Ic;
double rms_array[3],pf_array[3];

double comp_sus_ab,comp_sus_bc,comp_sus_ca;
double comp_ab,comp_bc,comp_ca;
double comp_sus_old_ab,comp_sus_old_bc,comp_sus_old_ca;

unsigned int alpha_ab,alpha_bc,alpha_ca;
unsigned int alpha_old_ab,alpha_old_bc,alpha_old_ca;
int fault2,fault1,ERR_ab,ERR_bc,ERR_ca;

double alpha[256];
double BL[256];
unsigned int BaseIO;

int winselect;
char winyn;

void main(void)
{
int handle,ctrl;

card = (unsigned int *) farcalloc(NUMPTS*4 ,sizeof(int));
if(!card)
{
    ConfirmPopup ("Could not allocate sampling memory.");
    GetUserEvent (1, &handle, &ctrl);
    exit(1);
}

dat = (unsigned int *) farcalloc(NUMPTS ,sizeof(int));
if(!dat)
{
    ConfirmPopup ("Could not allocate sampling memory.");
    GetUserEvent (1, &handle, &ctrl);
    exit(1);
}

samp = (complex *) farcalloc(NUMPTS ,sizeof(complex));
if(!samp)
{
    ConfirmPopup ("Could not allocate sampling memory.");
    GetUserEvent (1, &handle, &ctrl);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        exit(1);
    }

    sig_plot = (double *) farcalloc(NUMPTS ,sizeof(double));
    if(!sig_plot)
    {
        ConfirmPopup ("Could not allocate plotting memory.");
        GetUserEvent (1, &handle, &ctrl);
        exit(1);
    }

    spec_plot = (double *) farcalloc((N/2)*10 ,sizeof(double));
    if(!spec_plot)
    {
        ConfirmPopup ("Could not allocate display memory.");
        GetUserEvent (1, &handle, &ctrl);
        exit(1);
    }

    printf("Do you want to do windows y/n");
    winyn=getch(); printf("\n\n");
    if(winyn=='y')
    {
        printf(" Select Windows\n");
        printf("  1 : Hamming Windows\n");
        printf("  2 : Hanning Windows\n");
        printf("  3 : Triangle Windows\n");
        printf("  4 : Blackman Windows\n");
        printf("  5 : 4 term Blackman Windows\n");
        printf(" SELECT (1-5) ==> ");
        scanf("%d",&winselect);
    }

    INITIAL_CARD();
    TABLE();

    panel_hdl3 = LoadPanel ("svc2.uir", svcint3);
    SetMouseCursor (0);

    systemflag=1;
    while(systemflag!=0)
    {
        switch(systemflag)
        {
            case 1 :
                panel_hdl1 = LoadPanel ("svc2.uir", svcint1);
                DisplayPanel (panel_hdl1);
                main_panel();
                break;
            case 2 :
                panel_hdl2 = LoadPanel ("svc2.uir", svcint2);
                DisplayPanel (panel_hdl2);
                zoom_panel();
                break;
            case 3 :
                DisplayPanel (panel_hdl3);
                pf_panel();
                break;
        } /*end of switch(systemflag)*/
    } /*end of while(systemflag!=0)*/

    UnloadPanel (panel_hdl3);
} /* end of main() */

```

```

//*****
void main_panel(void) /*svcnt1*/
{
int mainflag,mainflag_hold;
unsigned int i,j,g;
double *DataBuf;
int plohandle[10];
int handle,ctrl;
int shift;

mainflag=1; mainflag_hold=0;
fault2 = 0;
while(mainflag)
{
/* initial control */
if(fault2==0)
{
initial_control();
}

/* end initial control */

pci818(9, param); /* Func 9 : Pacer trigger A/D conversion */
if (param[45] != 0) /* with interrupt data transfer */
{
ConfirmPopup("A/D PACER TRIGGER WITH INTERRUPT DATA TRANSFER FAILED !");
exit(1);
}

do
{
pci818(10, param); /* Func 10 : Check interrupt status */
}while((param[46] & 1) != 0); /* 0 : not active, 1 : active */

for (j = 0 ; j <= 3 ; j++)
{
for (i = 0 ; i < NUMPTS; i++)
{
dat[i] = card[4*i+j];
}

for (i = 0; i < NUMPTS; i++) /* Display data */
{
samp[i].re = dat[i] & 0xFFFF;
if(j==0) /* voltage Va */
{
samp[i].re =(((10-(-10)) * samp[i].re / 4096 ) + (-10))*75;
}
if(j!=0) /* current Ia ,Ib ,Ic */
{
samp[i].re =(((10-(-10)) * samp[i].re / 4096 ) + (-10))*5.059259259;
}
}

(10 - (-10)) : A/D input range (-10V to 10V)
4096 : Full scale 12 bit A/D data
DataBuf : A/D input data
(-10) : A/D input range "-10" V
*/

} /* end of for(i=0;i<NUMPTS;i++) */

```

/* windows sampling data (samp) */

if(winyt==y')

```

{
    WINDOWS(NUMPTS);
}

if(mainflag_hold==0)
{
    for (i = 0 ; i <= NUMPTS-1 ; i++)
    {
        sig_plot[i] = 0;
    }

    if(j==0)
        shift=0;
    else
        shift=4;
    for (i = 0 ; i <= NUMPTS-1-shift ; i++)
    {
        sig_plot[i] = samp[i+shift].re;
    }
}

/* calculate spectrum by Fast Fourier Transform (FFT) */
for (g = 0 ; g <= N-1 ; g = g+1)
{
    x[g] = samp[g*1];
}
FFT(); /* call function FFT */
if(mainflag_hold==0)
{
    for (i = 0 ; i <= 10*(N/2-1) ; i++)
    {
        spec_plot[i] = 0;
    }

    for (i = 0 ; i <= N/2-1 ; i++)
    {
        spec_plot[i*10] = c_abs(x[i]);
    }
}
/*****

switch(j)
{
    case 0 :
        if(mainflag_hold==0)
        {
            plothandle[0] = PlotY(panel_hdl1,svcint1_GRAPH1,sig_plot,NUMPTS,4,0,0,15,14);
            plothandle[4] = PlotY(panel_hdl1,svcint1_GRAPH5,spec_plot,10*(N/2),4,0,0,15,14);
        }

        RMS_Va = True_RMS/sqrt(3); /* line to neutral voltage */

        Angle_Va_Funda = Angle_Funda-30*pi/180; /* Calibrate Vab to Va */
        Angle_Vb_Funda = Angle_Va_Funda-120*pi/180;
        Angle_Vc_Funda = Angle_Va_Funda-240*pi/180;

        if(mainflag_hold==0)
        {
            SetCtrlVal (panel_hdl1, svcint1_Va, sqrt(3)*RMS_Va);
        }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

break;

case 1 :
if(mainflag_hold==0)
{
    plothandle[1] = PlotY(panel_hdl1,svcint1_GRAPH2,sig_plot,NUMPTS,4,0,0,15,14);
    plothandle[5] = PlotY(panel_hdl1,svcint1_GRAPH6,spec_plot,10*(N/2),4,0,0,15,14);
}

RMS_la = True_RMS;
Angle_la_Funda = Angle_Funda-Delay;
RMS_la_Funda = RMS_Funda;

DPF_la = cos(Angle_la_Funda-Angle_Va_Funda);
DTF_la = RMS_la_Funda/RMS_la;
PF_la = DPF_la*DTF_la;

Angle_la_refer_to_Va = Angle_la_Funda-Angle_Va_Funda;

rms_array[0] = RMS_la;
pf_array[0] = PF_la;

if(mainflag_hold==0)
{
    SetCtrlVal (panel_hdl1, svcint1_pf_a, PF_la);
    SetCtrlVal (panel_hdl1, svcint1_ang_a, Angle_la_refer_to_Va*180/pi);
    SetCtrlVal (panel_hdl1, svcint1_rms_a, RMS_la);
}

break;

case 2 :
if(mainflag_hold==0)
{
    plothandle[2] = PlotY(panel_hdl1,svcint1_GRAPH3,sig_plot,NUMPTS,4,0,0,15,14);
    plothandle[6] = PlotY(panel_hdl1,svcint1_GRAPH7,spec_plot,10*(N/2),4,0,0,15,14);
}

RMS_lb = True_RMS;
Angle_lb_Funda = Angle_Funda-2*Delay;
RMS_lb_Funda = RMS_Funda;

DPF_lb = cos(Angle_lb_Funda-Angle_Vb_Funda);
DTF_lb = RMS_lb_Funda/RMS_lb;
PF_lb = DPF_lb*DTF_lb;

Angle_lb_refer_to_Va = Angle_lb_Funda-Angle_Va_Funda;

rms_array[1] = RMS_lb;
pf_array[1] = PF_lb;

if(mainflag_hold==0)
{
    SetCtrlVal (panel_hdl1, svcint1_pf_b, PF_lb);
    SetCtrlVal (panel_hdl1, svcint1_ang_b, Angle_lb_refer_to_Va*180/pi);
    SetCtrlVal (panel_hdl1, svcint1_rms_b, RMS_lb);
}

break;

case 3 :
if(mainflag_hold==0)
{
    plothandle[3] = PlotY(panel_hdl1,svcint1_GRAPH4,sig_plot,NUMPTS,4,0,0,15,14);

```

```

        plothandle[7] = PlotY(panel_hdl1,svcint1_GRAPH8,spec_plot,10*(N/2),4,0,0,15,14);
    }

    RMS_Ic = True_RMS;
    Angle_Ic_Funda = Angle_Funda-3*Delay;
    RMS_Ic_Funda = RMS_Funda;

    DPF_Ic = cos(Angle_Ic_Funda-Angle_Vc_Funda);
    DTF_Ic = RMS_Ic_Funda/RMS_Ic;
    PF_Ic = DPF_Ic*DTF_Ic;

    Angle_Ic_refer_to_Va = Angle_Ic_Funda-Angle_Va_Funda;

    rms_array[2] = RMS_Ic;
    pf_array[2] = PF_Ic;

    if(mainflag_hold==0)
    {
        SetCtrlVal (panel_hdl1, svcint1_pf_c, PF_Ic);
        SetCtrlVal (panel_hdl1, svcint1_ang_c, Angle_Ic_refer_to_Va*180/pi);
        SetCtrlVal (panel_hdl1, svcint1_rms_c, RMS_Ic);
    }

    break;
} /* end of switch(j) */
} /* end of for(j=0;j<=3;++j) */

PlotStripChart(panel_hdl3,svcint3_rms_current_chart,rms_array,3,0,0,4);
PlotStripChart(panel_hdl3,svcint3_pf_chart,pf_array,3,0,0,4);
/* calculate control */
SUS_CAL();          /*calculate comp_sus_$$*/
CONTROL();
    SetCtrlVal(panel_hdl1,svcint1_BLab,comp_sus_old_ab);
    SetCtrlVal(panel_hdl1,svcint1_BLbc,comp_sus_old_bc);
    SetCtrlVal(panel_hdl1,svcint1_BLca,comp_sus_old_ca);

DIGITAL_OUT_PORT(alpha_old_ca,alpha_old_bc,alpha_old_ab); /*work*/
delay(hardware_delay);

    SetCtrlVal(panel_hdl1,svcint1_ab,alpha_old_ab);
    SetCtrlVal(panel_hdl1,svcint1_bc,alpha_old_bc);
    SetCtrlVal(panel_hdl1,svcint1_ca,alpha_old_ca);

/* get user event for control program */

GetUserEvent (0, &handle, &ctrl); /* "0" no wait */

switch(ctrl)
{
    case svcint1_stop :
        mainflag = 0;
        systemflag = 0;
        break;
    case svcint1_hold :
        mainflag_hold = 1;
        break;
    case svcint1_dis_cont :
        mainflag_hold = 0;
        break;
    case svcint1_zoom :

```

```

        mainflag = 0;
        systemflag = 2;
        break;
    case svcint1_change :
        mainflag = 0;
        systemflag = 3;
        break;
} /* end of switch(ctrl) */

if(mainflag_hold==0)
{
    DeleteGraphPlot (panel_hdl1, svcint1_GRAPH1, plohandle[0], 0);
    DeleteGraphPlot (panel_hdl1, svcint1_GRAPH2, plohandle[1], 0);
    DeleteGraphPlot (panel_hdl1, svcint1_GRAPH3, plohandle[2], 0);
    DeleteGraphPlot (panel_hdl1, svcint1_GRAPH4, plohandle[3], 0);
    DeleteGraphPlot (panel_hdl1, svcint1_GRAPH5, plohandle[4], 0);
    DeleteGraphPlot (panel_hdl1, svcint1_GRAPH6, plohandle[5], 0);
    DeleteGraphPlot (panel_hdl1, svcint1_GRAPH7, plohandle[6], 0);
    DeleteGraphPlot (panel_hdl1, svcint1_GRAPH8, plohandle[7], 0);
}

} /* end of while(mainflag) */

UnloadPanel (panel_hdl1);
} /* end of main_panel() */

/*****

void zoom_panel(void) /*svcint2*/
{
    int zoomflag, zoomflag_hold;
    unsigned int i, j, g;
    double *DataBuf;
    int plohandle[3];
    int handle, ctrl;
    int channel;
    int shift;

    zoomflag=1; zoomflag_hold=0;
    while(zoomflag)
    {
        GetCtrlVal (panel_hdl2 , svcint2_channel , &channel);

        param[0] = 0;          /* Board number          */
        param[1] = 0x300;      /* Base I/O address    */
        param[4] = 2;          /* IRQ level : IRQ2     */
        param[5] = 122;        /* Pacer rate = 10M/(122*8) = 10240 Hz */
        param[6] = 8;
        param[7] = 0;          /* Trigger mode, 0 : pacer trigger */
        param[8] = 0;          /* Non-cyclic           */
        param[10] = FP_OFF(card); /* Offset of A/D data buffer A */
        param[11] = FP_SEG(card); /* Segment of A/D data buffer A */
        param[12] = 0;          /* Data buffer B address, if not used, */
        param[13] = 0;          /* must set to 0.      */
        param[14] = NUMPTS*4;   /* A/D conversion number */
        param[15] = 0;          /* A/D conversion start channel */
        param[16] = 3;          /* A/D conversion stop channel */
        param[17] = 8;          /* Overall gain code, 0 : +/- 5V */
                                /*                               8 : +/- 10 V */

        /* param[18] = FP_OFF(gain_array);
        param[19] = FP_SEG(gain_array); */

```

```

/* param[45] : Error code
param[46] : Return value 0
param[47] : Return value 1 */

pcl818(3, param); /* Func 3 : Hardware initialization */
if (param[45] != 0)
{
    ConfirmPopup("DRIVER INITIALIZATION FAILED !");
    exit(1);
}

pcl818(4, param); /* Func 4 : A/D initialization */
if (param[45] != 0)
{
    ConfirmPopup("A/D INITIALIZATION FAILED !");
    exit(1);
}

pcl818(9, param); /* Func 9 : Pacer trigger A/D conversion */
if (param[45] != 0) /* with interrupt data transfer */
{
    ConfirmPopup("A/D PACER TRIGGER WITH INTERRUPT DATA TRANSFER FAILED !");
    exit(1);
}

do
{
    pcl818(10, param); /* Func 10 : Check interrupt status */
} while((param[46] & 1) != 0); /* 0 : not active, 1 : active */

for (j = 0 ; j <= 3 ; j++)
{
    for (i = 0 ; i < NUMPTS; i++)
    {
        dat[i] = card[4*i+j];
    }

    for (i = 0; i < NUMPTS; i++) /* Display data */
    {
        samp[i].re = dat[i] & 0xFFF;
        if(j==0) /* voltage Va */
        {
            samp[i].re = (((10-(-10)) * samp[i].re / 4096) + (-10))*75;
        }
        if(j!=0) /* current Ia ,Ib ,Ic */
        {
            samp[i].re = (((10-(-10)) * samp[i].re / 4096) + (-10))*5.059259259;
        }
    }
}

(10 - (-10)) : A/D input range (-10V to 10V)
4096 : Full scale 12 bit A/D data
DataBuf : A/D input data
(-10) : A/D input range "-10" V
*/

} /* end of for(i=0;i<NUMPTS;i++) */

if(zoomflag_hold==0)
{
    for (i = 0 ; i <= NUMPTS-1 ; i++)
    {
        sig_plot[i] = 0;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    if(j==0)
        shift=0;
    else
        shift=4;
    for (i = 0 ; i <= NUMPTS-1-shift ; i++)
    {
        sig_plot[i] = samp[i+shift].re;
    }
}

/* calculate spectrum by Fast Fourier Transform (FFT) */

for (g = 0 ; g <= N-1 ; g = g+1)
{
    x[g] = samp[g*1];
}

FFT(); /* call function FFT */

if(zoomflag_hold==0)
{
    for (i = 0 ; i <= 10*(N/2-1) ; i++)
    {
        spec_plot[i] = 0;
    }
    for (i = 0 ; i <= N/2-1 ; i++)
    {
        spec_plot[i*10] = c_abs(x[i]);
    }
}
/*****/

switch(j)
{
    case 0 :
        RMS_Va = True_RMS;
        Angle_Va_Funda = Angle_Funda-30*pi/180; /* Calibrate from P.T. */
        RMS_Va_Funda = RMS_Funda;

        Angle_Vb_Funda = Angle_Va_Funda-120*pi/180;
        Angle_Vc_Funda = Angle_Va_Funda-240*pi/180;

        if (channel==0 && zoomflag_hold==0)
        {
            plothandle[0] = PlotY(panel_hdl2,svcint2_input,sig_plot,NUMPTS,4,0,0,15,14);
            plothandle[1] = PlotY(panel_hdl2,svcint2_FFT,spec_plot,10*(N/2),4,0,0,15,14);

            SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_rms, RMS_Va);
            SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_funda_ang, Angle_Va_Funda);
            SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_thd, 100*RMS_Va_Funda/RMS_Va);

            SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har1, c_abs(x[5]));
            SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har3, c_abs(x[15]));
            SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har5, c_abs(x[25]));
            SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har7, c_abs(x[35]));
        } /* end of if(channel==0) */

        break;

    case 1 :
        RMS_Ia = True_RMS;
        Angle_Ia_Funda = Angle_Funda-Delay;
        RMS_Ia_Funda = RMS_Funda;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสาร การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (channel==1 && zoomflag_hold==0)
{
    plothandle[0] = PlotY(panel_hdl2,svcint2_input,sig_plot,NUMPTS,4,0,0,15,14);
    plothandle[1] = PlotY(panel_hdl2,svcint2_FFT,spec_plot,10*(N/2),4,0,0,15,14);

    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_rms, RMS_la);
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_funda_ang, Angle_la_Funda);
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_thd, 100*RMS_la_Funda/RMS_la);

    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har1, c_abs(x[5]));
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har3, c_abs(x[15]));
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har5, c_abs(x[25]));
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har7, c_abs(x[35]));
} /* end of if(channel==1) */

DPF_la = cos(Angle_la_Funda-Angle_Va_Funda);
DTF_la = RMS_la_Funda/RMS_la;
PF_la = DPF_la*DTF_la;

phi_a = acos(PF_la);

if(convert_angle(Angle_la_Funda-Angle_Va_Funda) < 0)
{
    phi_a = (-1)*phi_a;
}
Angle_la_refer_to_Va = 0*pi/180+phi_a;

rms_array[0] = RMS_la;
pf_array[0] = PF_la;

if(zoomflag_hold==0)
{
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_pf_a, PF_la);
}

break;

case 2 :
RMS_lb = True_RMS;
Angle_lb_Funda = Angle_Funda-2*Delay;
RMS_lb_Funda = RMS_Funda;

if (channel==2 && zoomflag_hold==0)
{
    plothandle[0] = PlotY(panel_hdl2,svcint2_input,sig_plot,NUMPTS,4,0,0,15,14);
    plothandle[1] = PlotY(panel_hdl2,svcint2_FFT,spec_plot,10*(N/2),4,0,0,15,14);

    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_rms, RMS_lb);
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_funda_ang, Angle_lb_Funda);
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_thd, 100*RMS_lb_Funda/RMS_lb);

    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har1, c_abs(x[5]));
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har3, c_abs(x[15]));
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har5, c_abs(x[25]));
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har7, c_abs(x[35]));
} /* end of if(channel==2) */

DPF_lb = cos(Angle_lb_Funda-Angle_Vb_Funda);
DTF_lb = RMS_lb_Funda/RMS_lb;
PF_lb = DPF_lb*DTF_lb;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสาร phi_b = acos(PF_lb); ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(convert_angle(Angle_lb_Funda-Angle_Vb_Funda) < 0)
{
    phi_b = (-1)*phi_b;
}
Angle_lb_refer_to_Va = -120*pi/180+phi_b;

rms_array[1] = RMS_lb;
pf_array[1] = PF_lb;

if(zoomflag_hold==0)
{
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_pf_b, PF_lb);
}

break;

case 3 :
RMS_lc = True_RMS;
Angle_lc_Funda = Angle_Funda-3*Delay;
RMS_lc_Funda = RMS_Funda;

if (channel==3 && zoomflag_hold==0)
{
    plohandle[0] = PlotY(panel_hdl2,svcint2_input,sig_plot,NUMPTS,4,0,0,15,14);
    plohandle[1] = PlotY(panel_hdl2,svcint2_FFT,spec_plot,10*(N/2),4,0,0,15,14);

    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_rms, RMS_lc);
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_funda_ang, Angle_lc_Funda);
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_thd, 100*RMS_lc_Funda/RMS_lc);

    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har1, c_abs(x[5]));
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har3, c_abs(x[15]));
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har5, c_abs(x[25]));
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_har7, c_abs(x[35]));
} /* end of if(channel==3) */

DPF_lc = cos(Angle_lc_Funda-Angle_Vc_Funda);
DTF_lc = RMS_lc_Funda/RMS_lc;
PF_lc = DPF_lc*DTF_lc;

phi_c = acos(PF_lc);

if(convert_angle(Angle_lc_Funda-Angle_Vc_Funda) < 0)
{
    phi_c = (-1)*phi_c;
}
Angle_lc_refer_to_Va = 120*pi/180+phi_c;

rms_array[2] = RMS_lc;
pf_array[2] = PF_lc;

if(zoomflag_hold==0)
{
    SetCtrlVal (panel_hdl2, svcint2_pf_c, PF_lc);
}

break;

} /* end of switch(j) */

} /* end of for(j=0;j<=3;+j) */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
PlotStripChart(panel_hdl3,svcint3_rms_current_chart,rms_array,3,0,0,4);
PlotStripChart(panel_hdl3,svcint3_pf_chart,pf_array,3,0,0,4);
```

```
/* get user event for control program */
```

```
GetUserEvent (0, &handle, &ctrl); /* "0" no wait */
switch(ctrl)
{
    case svcint2_stop :
        zoomflag = 0;
        systemflag = 0;
        break;
    case svcint2_hold :
        zoomflag_hold = 1;
        break;
    case svcint2_dis_cont :
        zoomflag_hold = 0;
        break;
    case svcint2_restore :
        zoomflag = 0;
        systemflag = 1;
        break;
    case svcint2_change :
        zoomflag = 0;
        systemflag = 3;
        break;
} /* end of switch(ctrl) */

if(zoomflag_hold==0)
{
    DeleteGraphPlot (panel_hdl2, svcint2_input, plohandle[0], 0);
    DeleteGraphPlot (panel_hdl2, svcint2_FFT, plohandle[1], 0);
}

} /* end of while(zoomflag) */

UnloadPanel (panel_hdl2);
} /* end of zoom_panel() */

/*****
void pf_panel(void) /*svcint3*/
{
    int pfflag;
    unsigned int i,j,g;
    double *DataBuf;
    int plohandle[3];
    int handle,ctrl;
```

```
    pfflag=1;
    while(pfflag)
    {
        param[0] = 0;          /* Board number          */
        param[1] = 0x300;      /* Base I/O address    */
        param[4] = 2;          /* IRQ level : IRQ2     */
        param[5] = 122;        /* Pacer rate = 10M/(122*8) = 10240 Hz */
        param[6] = 8;
        param[7] = 0;          /* Trigger mode, 0 : pacer trigger */
        param[8] = 0;          /* Non-cyclic           */
        param[10] = FP_OFF(card); /* Offset of A/D data buffer A */
        param[11] = FP_SEG(card); /* Segment of A/D data buffer A */
        param[12] = 0; /* Data buffer B address, if not used, */
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

param[13] = 0;          /* must set to 0.          */
param[14] = NUMPTS*4;  /* A/D conversion number      */
param[15] = 0;        /* A/D conversion start channel */
param[16] = 3;        /* A/D conversion stop channel */
param[17] = 8;        /* Overall gain code, 0 : +/- 5V
                       /*                               8 : +/- 10 V */

/* param[18] = FP_OFF(gain_array);
param[19] = FP_SEG(gain_array); */

/* param[45] : Error code
param[46] : Return value 0
param[47] : Return value 1 */

pcl818(3, param);      /* Func 3 : Hardware initialization */
if (param[45] != 0)
{
    ConfirmPopup("DRIVER INITIALIZATION FAILED !");
    exit(1);
}

pcl818(4, param);      /* Func 4 : A/D initialization      */
if (param[45] != 0)
{
    ConfirmPopup("A/D INITIALIZATION FAILED !");
    exit(1);
}

pcl818(9, param);      /* Func 9 : Pacer trigger A/D conversion */
if (param[45] != 0)    /* with interrupt data transfer */
{
    ConfirmPopup("A/D PACER TRIGGER WITH INTERRUPT DATA TRANSFER FAILED !");
    exit(1);
}

do
{
    pcl818(10, param); /* Func 10 : Check interrupt status */
} while((param[46] & 1) != 0); /* 0 : not active, 1 : active */

for (j = 0 ; j <= 3 ; j++)
{
    for (i = 0 ; i < NUMPTS; i++)
    {
        dat[i] = card[4*i+j];
    }

    for (i = 0; i < NUMPTS; i++) /* Display data */
    {
        samp[i].re = dat[i] & 0xFFFF;
        if(j==0) /* voltage Va */
        {
            samp[i].re = (((10-(-10)) * samp[i].re / 4096) + (-10))*75;
        }
        if(j!=0) /* current Ia ,Ib ,Ic */
        {
            samp[i].re = (((10-(-10)) * samp[i].re / 4096) + (-10))*5.059259259;
        }
    }
}

(10 - (-10)) : A/D input range (-10V to 10V)
4096         : Full scale 12 bit A/D data
DataBuf      : A/D input data
(-10)        : A/D input range "-10" V

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

} /* end of for(i=0;i<NUMPTS;i++) */

/* calculate spectrum by Fast Fourier Transform (FFT) */

for (g = 0 ; g <= N-1 ; g = g+1)
{
  x[g] = samp[g*1];
}

FFT(); /* call function FFT */

/*****

switch(j)
{
  case 0 :
    RMS_Va = True_RMS;
    Angle_Va_Funda = Angle_Funda-30*pi/180; /* Calibrate from P.T. */
    RMS_Va_Funda = RMS_Funda;

    Angle_Vb_Funda = Angle_Va_Funda-120*pi/180;
    Angle_Vc_Funda = Angle_Va_Funda-240*pi/180;

    break;

  case 1 :
    RMS_Ia = True_RMS;
    Angle_Ia_Funda = Angle_Funda-Delay;
    RMS_Ia_Funda = RMS_Funda;

    DPF_Ia = cos(Angle_Ia_Funda-Angle_Va_Funda);
    DTF_Ia = RMS_Ia_Funda/RMS_Ia;
    PF_Ia = DPF_Ia*DTF_Ia;

    phi_a = acos(PF_Ia);

    if(convert_angle(Angle_Ia_Funda-Angle_Va_Funda) < 0)
    {
      phi_a = (-1)*phi_a;
    }
    Angle_Ia_refer_to_Va = 0*pi/180+phi_a;

    rms_array[0] = RMS_Ia;
    pf_array[0] = PF_Ia;

    SetCtrlVal (panel_hdl3, svcint3_rms_a, RMS_Ia);
    SetCtrlVal (panel_hdl3, svcint3_pf_a, PF_Ia);

    break;

  case 2 :
    RMS_Ib = True_RMS;
    Angle_Ib_Funda = Angle_Funda-2*Delay;
    RMS_Ib_Funda = RMS_Funda;

    DPF_Ib = cos(Angle_Ib_Funda-Angle_Vb_Funda);
    DTF_Ib = RMS_Ib_Funda/RMS_Ib;
    PF_Ib = DPF_Ib*DTF_Ib;

    phi_b = acos(PF_Ib);

    if(convert_angle(Angle_Ib_Funda-Angle_Vb_Funda) < 0)

```

```

        phi_b = (-1)*phi_b;
    }
    Angle_lb_refer_to_Va = -120*pi/180+phi_b;

    rms_array[1] = RMS_lb;
    pf_array[1] = PF_lb;

    SetCtrlVal (panel_hdl3, svcint3_rrs_b, RMS_lb);
    SetCtrlVal (panel_hdl3, svcint3_pf_b, PF_lb);

    break;

case 3 :
    RMS_lc = True_RMS;
    Angle_lc_Funda = Angle_Funda-3*Delay;
    RMS_lc_Funda = RMS_Funda;

    DPF_lc = cos(Angle_lc_Funda-Angle_Vc_Funda);
    DTF_lc = RMS_lc_Funda/RMS_lc;
    PF_lc = DPF_lc*DTF_lc;

    phi_c = acos(PF_lc);

    if(convert_angle(Angle_lc_Funda-Angle_Vc_Funda) < 0)
    {
        phi_c = (-1)*phi_c;
    }
    Angle_lc_refer_to_Va = 120*pi/180+phi_c;

    rms_array[2] = RMS_lc;
    pf_array[2] = PF_lc;

    SetCtrlVal (panel_hdl3, svcint3_rms_c, RMS_lc);
    SetCtrlVal (panel_hdl3, svcint3_pf_c, PF_lc);

    break;

} /* end of switch(j) */

} /* end of for(j=0;j<=3;++j) */

PlotStripChart(panel_hdl3,svcint3_rms_current_chart,rms_array,3,0,0,4);
PlotStripChart(panel_hdl3,svcint3_pf_chart,pf_array,3,0,0,4);

/* get user event for control program */

GetUserEvent (0, &handle, &ctrl); /* "0" no wait */
switch(ctrl)
{
    case svcint3_stop :
        pfflag = 0;
        systemflag = 0;
        break;
    case svcint3_change :
        pfflag = 0;
        systemflag = 1;
        break;
} /* end of switch(ctrl) */

} /* end of while(pfflag) */

HidePanel (panel_hdl3);

} /* end of pf_panel() */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****/
void FFT(void)
{
int NU1,N2,k,i,l,M,p,j;
double max,max_sqr_sum;
double arg,C,S,Treal,Timag;
complex W,T3;

/* INPUT DATA */
NU = (int)(log10(N)/log10(2));

/* INITIALIZATION */
l=1;
N2=N/2;
NU1=NU-1;
k=0;

/* START CALCULATION */
while(l<=NU)
{
do
{
for(i=l;i<=N2;i=i+1)
{
M = (int)(k/pow(2,(double)NU1));
p = IBR(M);

arg = 2*pi*p/N;
C = cos(arg);
S = sin(arg);
Treal = x[k+N2].re*C + x[k+N2].im*S;
Timag = x[k+N2].im*C - x[k+N2].re*S;
x[k+N2].re = x[k].re - Treal;
x[k+N2].im = x[k].im - Timag;
x[k].re = x[k].re + Treal;
x[k].im = x[k].im + Timag;

k = k+1;
}
k = k+N2; /* Skip N2 node */
} while(k < N-1);

l = l+1;
N2 = N2/2;
NU1 = NU1-1;
k = 0;
}

/* UNSCRAMBLING */
for(k=0;k<=N-1;k=k+1)
{
i = IBR(k);
if(i>k)
{
T3 = x[k];
x[k] = x[i];
x[i] = T3;
}
}

/* Correct and Display OUTPUT */

```

```

{
x[j].re = 2*x[j].re/N;
x[j].im = 2*x[j].im/N;
}

/* TRANSFER DATA 1 True RMS Value of Signal */
/*      2 Phase Angle of Fundamental of Signal for DPF Calculation */
/*      3 RMS Value of Fundamental Current for DTF Calculation */
max_sqr_sum=0;
for(j=0;j<=N/2-1;j=j+1)
{
max = c_abs(x[j]);
max_sqr_sum = max_sqr_sum + max*max;
}
True_RMS = sqrt(max_sqr_sum/2);
Angle_Funda = c_arg(x[5]);
RMS_Funda = (c_abs(x[5]))/sqrt(2);
}

/*****/

int IBR(int A)
{
int ibr,l1,J2;
ibr = 0;
for(l1=1;l1<=NU;l1=l1+1)
{
J2 = A/2;
ibr = 2*ibr+(A-2*J2);
A = J2;
}
return ibr;
} /* end of function IBR(int A) */

/*****/

double convert_angle(double angle)
{
double out;
angle=angle*180/pi;

if(angle>=0 && angle<=180) out=angle;
else if(angle>180 && angle<=360) out=angle-360;
else if(angle>360 && angle<=540) out=angle-360;
else if(angle>540 && angle<=720) out=angle-720;
else if(angle<0 && angle>=-180) out=angle;
else if(angle<-180 && angle>=-360) out=angle+360;
else if(angle<-360 && angle>=-540) out=angle+360;
else if(angle<-540 && angle>=-720) out=angle+720;

out=out*pi/180;
return out;
}

/*****/

void SUS_CAL(void)
{
complex ap1,ap2;
double W0,W1,W2;

la_load=cconst(RMS_la_Funda*cos(Angle_la_refer_to_Va),RMS_la_Funda*sin(Angle_la_refer_to_Va));
lb_load=cconst(RMS_lb_Funda*cos(Angle_lb_refer_to_Va),RMS_lb_Funda*sin(Angle_lb_refer_to_Va));
lc_load=cconst(RMS_lc_Funda*cos(Angle_lc_refer_to_Va),RMS_lc_Funda*sin(Angle_lc_refer_to_Va));

```

```

ap1=cconst(cos(120*pi/180),sin(120*pi/180)); /* ap1 = a = 1<120 */
ap2=cconst(cos(-120*pi/180),sin(-120*pi/180)); /* ap2 = a^2 = 1<240 = 1<-120 */

W0=Ia_load.im; /* imag(Ia_load) */
W1=ap1.re*Ib_load.im+ap1.im*Ib_load.re; /* imag(ap1*Ib_load) */
W2=ap2.re*Ic_load.im+ap2.im*Ic_load.re; /* imag(ap2*Ic_load) */

comp_sus_ab=-(W0+W1-W2)/(3*RMS_Va);
comp_sus_bc=-(-W0+W1+W2)/(3*RMS_Va);
comp_sus_ca=-(W0-W1+W2)/(3*RMS_Va);

comp_ab=fabs(comp_sus_ab);
comp_bc=fabs(comp_sus_bc);
comp_ca=fabs(comp_sus_ca);

} /* end of function SUS_CAL() */

/*****/

void TABLE(void)
{
int value_dig_out;
double sigma;

/* calculate "Susceptance Table" */

for(value_dig_out=128;value_dig_out<=255;value_dig_out=value_dig_out+1)
{
alpha[value_dig_out]=90+((double)value_dig_out-128)*90/127;
sigma=2*(180-alpha[value_dig_out]);
BL[value_dig_out]=(sin(sigma*pi/180)-(sigma*pi/180))/(pi*xl);
} /* end of for(value_dig_out...) */
}
/*****/

int SUS_SIGMA(double CAL_BL)
{
double min,delta;
int base,newbase,n,i;
int dig_out; /* dig_out is 0-255 (8 bit digital o/p) approximate
from SUS_DIG_OUT(CAL_BL) and transfer to
DIGITAL_OUT_PORT(phase,dig_out_port) */

/* calculate "digital output" which nearest calculate susceptance */

base=128;
for(n=1;n<=5;n=n+1)
{
newbase=base+(int)(128/pow(2,(double)n)); /* mark */
if(CAL_BL<BL[newbase])
{
base=base;
} /*end if*/
else
{
base=newbase;
} /*end else*/
} /* end of for(n=1;n<=5;n=n+1) */

min=100;
for(i=base;i<=base+3;i=i+1)

```

```

        delta=fabs(CAL_BL-BL[i]);
        if(delta<min)
        {
            min=delta;
            dig_out=i;
        } /* end if */
    } /* end of for(i=base;i<=base+7;i=i+1) */

    return dig_out;
} /*end of function "SUS_DIG_OUT(CAL_BL)"/

/*****

void INITIAL_CARD(void)
{
    param[0] = 0;          /* Board number */
    param[1] = 0x300;      /* Base I/O address */
    param[4] = 2;         /* IRQ level : IRQ2 */
    param[5] = 122;       /* Pacer rate = 10M/(122*8) = 10240 Hz */
    param[6] = 8;
    param[7] = 0;         /* Trigger mode, 0 : pacer trigger */
    param[8] = 0;         /* Non-cyclic */
    param[10] = FP_OFF(card); /* Offset of A/D data buffer A */
    param[11] = FP_SEG(card); /* Segment of A/D data buffer A */
    param[12] = 0;        /* Data buffer B address, if not used, */
    param[13] = 0;        /* must set to 0. */
    param[14] = NUMPTS*4; /* A/D conversion number */
    param[15] = 0;        /* A/D conversion start channel */
    param[16] = 3;        /* A/D conversion stop channel */
    param[17] = 8;        /* Overall gain code, 0 : +/- 5V
                               8 : +/- 10 V */

    /* param[18] = FP_OFF(gain_array);
    param[19] = FP_SEG(gain_array); */

// param[33] = FP_OFF(dat); /* Offset of digital output data buffer A */
// param[34] = FP_SEG(dat); /* Segment of digital output data buffer A */
// param[35] = 0;          /* Data buffer B address, if not used, */
// param[36] = 0;          /* must set to 0. */
// param[37] = 1;         /* Digital output number */
// param[38] = 0;         /* Digital Output port */
// param[45] : Error code
// param[46] : Return value 0
// param[47] : Return value 1

    pcl818(3, param);     /* Func 3 : Hardware initialization */
    if (param[45] != 0) {
        ConfirmPopup(" DRIVER INITIALIZATION FAILED !");
        exit(1);
    }

    pcl818(4, param);     /* Func 4 : A/D initialization */
    if (param[45] != 0)
    {
        ConfirmPopup("A/D INITIALIZATION FAILED !");
        exit(1);
    }
} /*end of INITIAL_CARD*/

/*****

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void DIGITAL_OUT_PORT(unsigned int x,unsigned int y,unsigned int z)
{ /* DIGITAL_OUT_PORT */

    BaseIO=param[1]; /*Set BaseIO = 0x300*/
    outputb(BaseIO+11,0x00);
    outputb(BaseIO+3,x);

    outputb(BaseIO+11,0x01);
    outputb(BaseIO+3,y);

    outputb(BaseIO+11,0x03);
    outputb(BaseIO+3,z);

} /* End DIGITAL_OUT_PORT */

/*****/

void initial_control(void)
{
    alpha_ab = 255; alpha_bc = 255; alpha_ca = 255;
    comp_sus_ab = 0; comp_sus_bc = 0; comp_sus_ca = 0;
    DIGITAL_OUT_PORT(alpha_ab,alpha_ca,alpha_bc);
    delay(hardware_delay);
}

/*****/

void WINDOWS(int plotnum)
{
    switch(winselect)
    {
        case 1:
            ham(samp,plotnum);
            break;
        case 2:
            han(samp,plotnum);
            break;
        case 3:
            triang(samp,plotnum);
            break;
        case 4:
            black(samp,plotnum);
            break;
        case 5:
            harris(samp,plotnum);
            break;
    } /*end of switch(selectw) */
} /* end of WINDOWS(int plotnum) */

/*****/
DFT3.C - SOURCE CODE FOR DISCRETE FOURIER TRANSFORM FUNCTIONS

ham Hamming window
han Hanning window
triang Triangle window
black Blackman window
harris 4 term Blackman-Harris window
log2 Base 2 logarithm

/*****/

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****
ham - Hamming window

```

Scales both real and imaginary parts of input array in-place.
Requires COMPLEX pointer and length of input array.

```
void ham(COMPLEX *x, int n)
/*****/
```

```
void ham(complex *x, int n)
{
    int i;
    double ham,factor;

    factor = 8.0*atan(1.0)/(n-1);
    for (i = 0 ; i < n ; i++)
    {
        ham = 0.54 - 0.46*cos(factor*i);
        x->re *= ham;
        x->im *= ham;
        x++;
    }
} /* end of ham() */
```

```

/*****
han - Hanning window

```

Scales both real and imaginary parts of input array in-place.
Requires COMPLEX pointer and length of input array.

```
void han(COMPLEX *x, int n)
/*****/
```

```
void han(complex *x, int n)
{
    int i;
    double factor,han;

    factor = 8.0*atan(1.0)/(n-1);
    for (i = 0 ; i < n ; i++)
    {
        han = 0.5 - 0.5*cos(factor*i);
        x->re *= han;
        x->im *= han;
        x++;
    }
} /* end of han() */
```

```

/*****
triang - triangle window

```

Scales both real and imaginary parts of input array in-place.
Requires COMPLEX pointer and length of input array.

```
void triang(COMPLEX *x,int n)
/*****/
```

```
void triang(complex *x,int n)
{
    int i;
    double tri,a;
    a = 2.0/(n-1);
```

```
    for (i = 0 ; i <= (n-1)/2 ; i++)
```

```

{
  tri = i*a;
  x->re *= tri;
  x->im *= tri;
  x++;
}
for (; i < n ; i++)
{
  tri = 2.0 - i*a;
  x->re *= tri;
  x->im *= tri;
  x++;
}
} /* end of triang */

```

```

/*****
black - Blackman window

```

Scales both real and imaginary parts of input array in-place.
Requires COMPLEX pointer and length of input array.

```

void black(COMPLEX *x, int n)

```

```

/*****

```

```

void black(complex *x, int n)

```

```

{
  int i;
  double black,factor;

```

```

  factor = 8.0*atan(1.0)/(n-1);
  for (i=0; i<n; ++i)
  {
    black = 0.42 - 0.5*cos(factor*i) + 0.08*cos(2*factor*i);
    x->re *= black;
    x->im *= black;
    x++;
  }
} /* end of black() */

```

```

/*****
harris - 4 term Blackman-Harris window

```

Scales both real and imaginary parts of input array in-place.
Requires COMPLEX pointer and length of input array.

```

void harris(COMPLEX *x, int n)

```

```

/*****

```

```

void harris(complex *x, int n)

```

```

{
  int i;
  double harris,factor,arg;

  factor = 8.0*atan(1.0)/n;
  for (i=0; i<n; ++i)
  {
    arg = factor * i;
    harris = 0.35875 - 0.48829*cos(arg) + 0.14128*cos(2*arg)
            - 0.01168*cos(3*arg);
    x->re *= harris;
    x->im *= harris;
    x++;
  }
} /* end of harris */

```

```

/*****/
void FEEDBACK(void)
{
    int range;

    if (comp_ab>fbck)
    {
        range = 1996;
        SetCtrlVal(panel_hdl1,svcint1_status,range);
        comp_sus_old_ab = comp_sus_old_ab + (ADD*comp_sus_ab/fabs(comp_sus_ab));
        alpha_old_ab = SUS_SIGMA(comp_sus_old_ab);
    }
    if(comp_bc>fbck)
    {
        range =1996;
        SetCtrlVal(panel_hdl1,svcint1_status,range);
        comp_sus_old_bc = comp_sus_old_bc + (ADD*comp_sus_bc/fabs(comp_sus_ab));
        alpha_old_bc = SUS_SIGMA(comp_sus_old_bc);
    }
    if(comp_ca>fbck)
    {
        range = 1996;
        SetCtrlVal(panel_hdl1,svcint1_status,range);
        comp_sus_old_ca = comp_sus_old_ca + (ADD*comp_sus_ca/fabs(comp_sus_ca));
        alpha_old_ca = SUS_SIGMA(comp_sus_old_ca);
    }
} /*End of FEEDBACK*/
/*****/

void CONTROL(void)
{
    int out_of_range;

    if(fault2==0)
    {
        out_of_range = 1000 ;
        SetCtrlVal(panel_hdl1 , svcint1_status , out_of_range);
        fault2 = 1;

        comp_sus_old_ab = comp_sus_ab;
        comp_sus_old_bc = comp_sus_bc;
        comp_sus_old_ca = comp_sus_ca;

        alpha_old_ab = SUS_SIGMA(comp_sus_old_ab);
        alpha_old_bc = SUS_SIGMA(comp_sus_old_bc);
        alpha_old_ca = SUS_SIGMA(comp_sus_old_ca);
    }
    else
    {
        if((comp_ab<errBL)&&(comp_bc<errBL)&&(comp_ca<errBL))
        { /* Feedback */
            out_of_range = 999;
            SetCtrlVal(panel_hdl1,svcint1_status,out_of_range);
            FEEDBACK();
        } /*End of feedback*/
        else
        { /* INITIAL AGAIN */
            out_of_range = 2222;
            SetCtrlVal(panel_hdl1,svcint1_status,out_of_range);
            fault2 = 0;

```

```
    } /*END OF INITIAL AGAIN */  
  }  
} /* end of CONTROL() */
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องด้วยการสนับสนุนจากหลายฝ่ายด้วยกัน ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และเพื่อนนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี และขอขอบคุณเป็นพิเศษสำหรับ

คุณศิริเดช	บุญแสง
คุณธีรศักดิ์	เบญจตาแข็ง
คุณนิมิต	ธรรมวิจิต
คุณเอกลักษณ์	คุ้มสุข
คุณอนุวัฒน์	จางวานิจเลิศ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิริยะ พิเชษฐำเจริญ และ อ.สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนช่วยเหลือไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น และให้กำลังใจในการทำโครงการจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.E.Lin , T.C.Chen , C.L.Huang. "A Real Time Calculation Method for Optimal Reactive Power Compensator." IEEE Transactions on Power Systems Vol.4 , No.2 (May,1989) : 643-652
- [2] David J. Defatta , Joseph G. Lucas and William S. Hodgkiss. Digital Signal Processing : A System Design Approach . John Wiley & Sons , United States of America : 1988.
- [3] E. Oran Brigham. The Fast Fourier Transform and Its Applications. Prentice-Hall International,Inc ; Great Britain : 1988.
- [4] Francisco Gonzalez Vazquez. "Microprocessor-Based Control of an SVC for Optimal Load Compensation." IEEE Transactions on Power Delivery Vol.7 , No.2 (April,1992) : 706-712
- [5] G. Blajszczak. "Static Var compensator with fully controlled reactors." IEE Proc.- Electr. Power Application Vol.144 , No.5 (September,1994) : 264-267
- [6] L.A.Paziuk , A.Y.Chikhani and R.Hacham. "An Expert Microprocessor Controlled Voltage Regulator for Energy Conservation and Demand Reduction in Distribution Feeders." IEEE Transactions on Power Delivery Vol.4 , No.4 (October,1989) : 2222-2228
- [7] Robert D. Strum and Donald E. Kirk . First Principles of Discrete Systems and Digital Signal Processing . Addison-Wesley Publishing Company,Inc . 1988.
- [8] T.J.E. Miller. Reactive Power Control in Electric Systems. United States of America : John Wiley & Sons , Inc . 1982.
- [9] William D. Stevenson,Jr. Elements of Power System Analysis . Forth Edition. Singapore : McGraw-Hill , Inc . 1982.
- [10] วิมลกล สุระกำพลธร, ศ.ดร. การประมวลผลสัญญาณเชิงเลข . กรุงเทพฯ : บริษัทไคนาพรีนซ์ จำกัด : 2533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้