

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต

Static VAR Compensator



โดย

นายทานทัต เนตรจำ

นายบุญฤทธิ์ ทองพูล

นายอนุจักร์ ใจมุข

นายเอกชัย เดิมสมบูรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ

ดร.วิจิตร กิณเรศ

อ.สุรินทร์ คำฝอย

เลขหน้.....
เลขทะเบียน 36981
วัน, เดือน, ปี 30 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต

นายทานทัต	เนตรขำ	
นายบุญฤทธิ์	ทองพูล	
นายอนุจักร์	ใจमुख	
นายเอกชัย	เคิมสมบูรณ์	
รศ.ดร.วิริยะ	พิเชษฐจำเริญ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.วิจิตร	กิมเรศ	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.สุรินทร์	คำฝอย	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2542		

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์นี้ศึกษาและพัฒนาตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิตของระบบไฟฟ้ากำลัง ชนิดตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไครซิสเตอร์ (TCR) ที่มีขนาดพิกัดกำลัง 3.3 kVA 220V 5A เพื่อรักษากระแสสาย 3 เฟสสมมูลย์, รักษาระดับแรงดันให้คงที่และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้ดีขึ้น ตัวชดเชยนี้สามารถควบคุมปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จะเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังโดยการปรับมุมนำกระแสของไครซิสเตอร์ ซึ่งจะเป็นการควบคุมปริมาณกระแสที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ ในการควบคุมจะใช้คอมพิวเตอร์รับค่ากระแสสายและแรงดันผ่านวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล เพื่อทำการคำนวณหามุมนำกระแสของไครซิสเตอร์ของแต่ละเฟส แล้วนำค่ามุมนำกระแสที่คำนวณได้ไปสั่งงานให้ชุดควบคุมเฟสจุกชนวนมุมนำกระแสของไครซิสเตอร์แต่ละเฟส โดยผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก และทำการแสดงผลข้อมูลของระบบกำลังไฟฟ้าผ่านจอแสดงผล อีกทั้งยังได้จำลองระบบที่สถานะโหลดต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้โปรแกรมจำลองประมวลผล เพื่อนำผลที่ได้ไปเป็นแนวทางและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

II

Static VAR Compensator

Tantad Natekham

Boonyarit Thongpool

Anujak Jaimook

Eakachai Dermsombool

Assoc.Prof.Dr.Viriya Pichetchumroen Advisor

Dr.Vijit Kinnares Advisor

Mr.Surin Khomfoi Advisor

1999

Abstract

This project concerns the development of Static VAR Compensator for power systems. The thyristor control reactor is a type of Static VAR Compensator to discuss in this project , which is rated 3.3 kVA, 220V 5A. The purpose of this project is to maintain three phase line current balancing , to improve voltage regulation and power factor. The compensator can controll quantity of reactive power flowing into power system by adjusting the firing angle of thyristor , by controlling quantity of current via reactor. Computer is used for calculation firing angle of thyristor in each phase , receiving line current and voltage through A/D , sending calculated firing angle to trig thyristor in each phase of phase control circuit through D/A and displaying the system data to the monitor. In addition , simulated system at each load condition of power system has been performed by using Pspice for verifying the current operation compared with the experimental results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	I
1.1 ความต้องการสำหรับการชดเชย	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการชดเชยโหลด	1
1.2.1 ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	1
1.2.2 ปรับปรุงโวลต์เตจเร็กกูเรชัน	4
1.2.3 ทำให้โหลดสมดุล	4
บทที่ 2 หลักการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	6
2.1 การทำสมดุลสามเฟสและการปรับปรุงค่าตัวประกอบ	6
2.1.1 วงจรความนำเชิงซ้อนของการชดเชย	6
2.1.2 การชดเชยโหลดในทอมของส่วนประกอบสมมาตร	16
บทที่ 3 หลักการของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต	21
3.1 การใช้งานตัวชดเชยกำลังไฟฟ้า	21
3.1.1 คุณสมบัติของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต	22
3.2 ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติเตอร์	24
3.2.1 หลักการทำงาน	24
3.2.2 ลักษณะแรงดัน / กระแส	27
3.2.3 ฮาร์โมนิกส์	28
3.2.4 ตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยโรติเตอร์	32
3.2.5 ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติเตอร์ที่มี ตัวเก็บประจุต่อขนาน	33
3.2.6 การควบคุม	36
3.2.7 ลักษณะอื่นๆ ของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ ควบคุมด้วยโรติเตอร์	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ระบบการควบคุมการทำงานของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้า	
รีแอกทีฟแบบสถิต	42
4.1 การทำงานของระบบควบคุม	42
4.2 วงจรวัดกระแสและแรงดันจากสายส่ง	44
4.2.1 วงจรวัดกระแส	44
4.2.2 วงจรวัดแรงดัน	45
4.3 วงจรทริกไธริสเตอร์	46
4.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุม	51
4.5 ผลการจำลองของรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไธริสเตอร์	53
บทที่ 5 ผลการทดลอง	57
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	85
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก โปรแกรมควบคุมการทำงาน	
ภาคผนวก ข การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	
ภาคผนวก ค การแปลงฟูเรียร์	
ภาคผนวก ง การแปลงส่วนประกอบสมมาตร	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ของกำลังไฟฟ้า	1
รูปที่ 2.1	(ก) โหลดสามเฟสไม่สมดุล	7
	(ข) การต่อความนำจิตภาพเพื่อแก้ค่าตัวประกอบกำลังในแต่ละเฟส	7
	(ค) โหลดลิฟท์ที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็น 1 แต่ยังไม่สมดุล	7
รูปที่ 2.2	เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงแรงดันและกระแส	8
รูปที่ 2.3	(ก) โหลด 1 เฟส ตัวประกอบกำลังเป็น 1 ก่อนที่จะทำการสมดุลลำดับเฟสบวก	12
	(ข) การทำสมดุลลำดับเฟสบวกของโหลด 1 เฟส ตัวประกอบกำลังเป็น 1	12
	(ค) วงจรสมมูลลำดับเฟสบวกของโหลด 1 เฟส ที่ถูกปรับปรุงแล้ว	12
รูปที่ 2.4	แสดงให้เห็นว่าการทำสมดุลโหลดขึ้นอยู่กับลำดับเฟส	
	(ก) ผลการตอบสนองของรูปที่ 2.3 ค. ในรูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมกรณีลำดับเฟสบวก	13
	(ข) ผลการตอบสนองของรูปที่ 2.3 ค. ในรูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมกรณีลำดับเฟสลบ	13P
รูปที่ 2.5	(ก) แสดงการต่อวงจรเพื่อปรับปรุงโหลด 3 เฟส	15
	(ข) วงจรสมมูลกรณีแรงดันลำดับเฟสบวก	15
รูปที่ 2.6	แสดงการไหลของกระแสสายและกระแสเฟส (กระแสในสาขา)	18
รูปที่ 3.1	ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอทีฟแบบสถิตในทางอุดมคติ	22
รูปที่ 3.2	วันไลน์ไดอะแกรมของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรติเตอร์	23
รูปที่ 3.3	วันไลน์ไดอะแกรมของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ	23
รูปที่ 3.4	วันไลน์ไดอะแกรมของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์อิมคั้ว	24
รูปที่ 3.5	ส่วนต่างๆ ของรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรติเตอร์	24
รูปที่ 3.6	รูปคลื่นกระแสสาย และกระแสเฟสเมื่อต่อตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรติเตอร์แบบเคลด้า	25
รูปที่ 3.7	กฎการควบคุมของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรติเตอร์แบบพื้นฐาน	26
รูปที่ 3.8	กราฟลักษณะแรงดัน / กระแสหลักมูลในตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV

	ด้วยโรตเตอร์	28
รูปที่ 3.9	ฮาร์โมนิกส์ของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรตเตอร์	29
	(ก) ส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกส์หลัก	29
	(ข) ผลรวมของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์	29
รูปที่ 3.10	ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรตเตอร์ 3 เฟส ที่มีตัวเก็บประจุ	
	ต่อขนานอยู่ และมีการแยกรีแอกเตอร์ของแต่ละเฟสออกเป็น 2 ส่วน	30
รูปที่ 3.11	ตัวชดเชยรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรตเตอร์ที่มีช่วงมุมนำกระแส	
	ในแต่ละสาขามากกว่า 180° เพื่อลดกระแสฮาร์โมนิกส์	31
รูปที่ 3.12	การจัดเรียงตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรตเตอร์เป็นแบบ	
	12 พัลส์ โดยใช้หม้อแปลงที่มีขดลวดทุกขดขดมี 2 ขด	32
รูปที่ 3.13	การเรียงสลับกันของตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยโรตเตอร์	34
	(ก) รีแอกเตอร์ที่ต่อกันแบบวายและโรตเตอร์ควบคุมที่ต่อแบบเคลด้า	34
	(ข) รีแอกเตอร์และโรตเตอร์ควบคุมที่ต่อกันแบบวาย	34
รูปที่ 3.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของตัวชดเชย	34
รูปที่ 3.15	ตัวชดเชยแบบไฮบริดที่มีการสวิตช์ตัดต่อตัวเก็บประจุและปรับรีแอกเตอร์	
	ด้วยโรตเตอร์	36
รูปที่ 3.16	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุม	36
	(ก) การควบคุมแบบเปิด	36
	(ข) การควบคุมแบบปิด	36
รูปที่ 3.17	การควบคุมตัวชดเชยแบบวงเปิด	38
รูปที่ 3.18	ลักษณะกราฟของกำลังงานสูญเสียของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุม	
	ด้วยโรตเตอร์แบบซึ่งมีตัวเก็บประจุต่อขนานและตัวกรองฮาร์โมนิกส์	40
รูปที่ 3.19	ลักษณะกราฟของกำลังงานสูญเสียของตัวชดเชยแบบโรตเตอร์ตัดต่อ	
	ตัวเก็บประจุ	41
รูปที่ 4.1	แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุม	42
รูปที่ 4.2	วงจรวัดกระแส	44
รูปที่ 4.3	วงจรวัดแรงดัน	45
รูปที่ 4.4	วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก	47
รูปที่ 4.5	แสดงสัญญาณของ TCA-785	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6	รูปแสดงวงจรควบคุมเฟส	50
รูปที่ 4.7	จอแสดงผล	52
รูปที่ 4.8	แสดงวงจรของรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์แบบ 1 เฟส	53
รูปที่ 4.9	รูปคลื่นกระแสเฟสและแรงดันเฟสที่มุม 130 องศา	54
รูปที่ 4.10	รูปคลื่นกระแสเฟสและแรงดันเฟสที่มุม 160 องศา	54
รูปที่ 4.11	แสดงวงจรของรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์แบบ 3 เฟส	55
รูปที่ 4.12	รูปคลื่นกระแสและแรงดันสายที่มุม 100 องศา	56
รูปที่ 4.13	รูปคลื่นกระแสและแรงดันสายที่มุม 130 องศา	56
รูปที่ 5.1	แสดงสัญญาณแรงดันเฟสและกระแสเฟสมีมุม 90 องศา	57
รูปที่ 5.2	แสดงสัญญาณแรงดันเฟสและกระแสเฟสมีมุม 110 องศา	57
รูปที่ 5.3	แสดงสัญญาณแรงดันเฟสและกระแสเฟสมีมุม 130 องศา	57
รูปที่ 5.4	แสดงสัญญาณแรงดันเฟสและกระแสเฟสมีมุม 160 องศา	57
รูปที่ 5.5	แสดงสัญญาณแรงดันสายและกระแสสายมีมุม 90 องศา	58
รูปที่ 5.6	แสดงสัญญาณแรงดันเฟสและกระแสเฟสมีมุม 110 องศา	58
รูปที่ 5.7	แสดงสัญญาณแรงดันเฟสและกระแสเฟสมีมุม 130 องศา	58
รูปที่ 5.8	แสดงสัญญาณแรงดันเฟสและกระแสเฟสมีมุม 160 องศา	58
รูปที่ 5.9	แสดงสัญญาณกระแสสายของระบบตัวชดเชยไฟฟ้ากำลังแบบสถิต	59
รูปที่ 5.10	แสดงฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณกระแสสายของระบบตัวชดเชยไฟฟ้ากำลังแบบสถิต	59
รูปที่ 5.11	กราฟเปรียบเทียบกระแสไลน์ของโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์สมดุล	67
รูปที่ 5.12	กราฟเปรียบเทียบแรงดันของโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์สมดุล	68
รูปที่ 5.13	กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์สมดุล	69
รูปที่ 5.14	กราฟเปรียบเทียบกระแสไลน์ของโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่สมดุล	70
รูปที่ 5.15	กราฟเปรียบเทียบแรงดันของโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่สมดุล	71
รูปที่ 5.16	กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่สมดุล	72
รูปที่ 5.17	กราฟเปรียบเทียบกระแสของโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่สมดุล	73
รูปที่ 5.18	กราฟเปรียบเทียบแรงดันของโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่สมดุล	74
รูปที่ 5.19	กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่สมดุล	75
รูปที่ 5.20	กราฟเปรียบเทียบกระแสของโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ไม่สมดุล	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ห้ามผู้ใดนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VI

รูปที่ 5.21	กราฟเปรียบเทียบแรงดันของ โหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ไม่สมดุล	77
รูปที่ 5.22	กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของ โหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ไม่สมดุล	78
รูปที่ 5.23	กราฟเปรียบเทียบกระแสของ โหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์สมดุล	79
รูปที่ 5.24	กราฟเปรียบเทียบแรงดันของ โหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์สมดุล	80
รูปที่ 5.25	กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของ โหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์สมดุล	81
รูปที่ 5.26	กราฟเปรียบเทียบกระแสของ โหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ไม่สมดุล	82
รูปที่ 5.27	กราฟเปรียบเทียบแรงดันของ โหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ไม่สมดุล	83
รูปที่ 5.28	กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของ โหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ไม่สมดุล	84



VII

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 การใช้งานในเชิงปฏิบัติของตัวชดเชยแบบสถิตในระบบไฟฟ้ากำลัง	21
ตารางที่ 3.2 ขนาดสูงสุดของกระแสอาร์โมนิกส์ในรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติเตอร์	29
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบสมดุล	60
ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ ไม่สมดุล เฟส AB	61
ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบไม่สมดุล เฟส AB และเฟส BC	62
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์แบบไม่สมดุล เฟส AB	63
ตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์แบบ ไม่สมดุล 3 เฟส	64
ตารางที่ 5.6 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์แบบ ไม่สมดุล เฟส AB และ เฟส BC	65
ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์แบบสมดุล	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความต้องการสำหรับการชดเชย

ระบบกำลังไฟฟ้ากระแสสลับในทางอุดมคติ แรงดันและความถี่ที่ทุกๆ จุดของแหล่งจ่ายควร จะคงที่ และไม่มีฮาร์โมนิกส์ และตัวประกอบกำลังไฟฟ้าควรจะเป็นหนึ่ง (Unity) พารามิเตอร์เหล่านี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดและคุณลักษณะของโหลดของผู้ใช้ ระบบในทางอุดมคติโหลดแต่ละตัวควรออก แบบให้ทำงานได้ประ โยชน์สูงสุดที่แรงดันแหล่งจ่ายที่จ่ายให้

1.2 วัตถุประสงค์ในการชดเชยโหลด

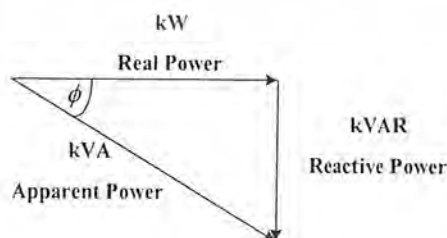
การชดเชยโหลด คือ การวัดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของแหล่ง จ่ายในระบบกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ เทอมการชดเชยโหลดที่ใช้โดยที่การจัดการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ มีผลกระทบกับโหลดเดียว (หรือกลุ่มของโหลด) อุปกรณ์ที่ใช้ในการชดเชยโดยปกติ แล้วจะติดตั้ง ใกล้ๆ กับโหลดของผู้ใช้

ในการชดเชยโหลดมีอยู่ 3 วัตถุประสงค์ คือ

1.2.1. ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

กำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่างๆ สามารถแยกเป็น 2 ส่วน คือ

- กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริง เช่น เปลี่ยนเป็นความร้อน แสงสว่าง หรือ ขับเคลื่อนเครื่องจักรกลต่างๆ มีหน่วยเป็น วัตต์ (Watt)
- กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กในอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็ก เช่น หม้อแปลง มอเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำ มี หน่วยเป็น วาร์ (Var)
- กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (Apparent Power) มีหน่วยเป็น โวลท์แอมป์ (VA) เป็นการรวม กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏเข้าด้วยกันทางเฟสเซอร์ ดังรูป



รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ (phasor diagram) ของกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตัวประกอบกำลัง (Power Factor) คำนวณได้จากสูตร

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

เนื่องจากโหลดในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีตัวประกอบกำลังตามหลัง (lagging) กล่าวคือจะรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนั้นกระแสโหลดจะมีค่ามากขึ้นกว่าที่ต้องการกำลังไฟฟ้าจริงจากแหล่งจ่ายเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้กำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้นที่ใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ส่วนกระแสโหลดเกินจะเป็นส่วนที่สูญเปล่า ซึ่งไม่เพียงแต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการใช้สายที่มีขนาดใหญ่แต่ยังเกิดความสูญเสียในรูปพลังงานความร้อนที่สายอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพิ่มเติมจากการจ่ายไฟของการไฟฟ้า ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (1.2) จะพบว่าเมื่อมีการใช้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากการไฟฟ้าลดลงจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลัง สูงขึ้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟก็คือ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ซึ่งตัวเก็บประจุ ต้องการกำลังไฟฟ้าจริง เป็นจำนวนน้อยมาก โดยจะทำการควบคุมให้ตัวเก็บประจุจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟใกล้เคียงกับที่โหลดต้องการจนทำให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง (Unity Power Factor)

ประโยชน์ของการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

1. ระบบไฟฟ้าสามารถรับโหลดได้เพิ่มขึ้น เมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบให้สูงขึ้น จะทำให้กระแสของระบบลดลง นั่นคือกำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดรวมลดลง ทำให้ระบบสามารถจ่ายโหลดได้มากขึ้น

2. แรงดันไฟฟ้าของระบบดีขึ้น จากสูตรแรงดันตกคร่อมระหว่างสาย (ΔV) ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส

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

โดยที่ $I =$ กระแสสาย (line current) [A]

$R =$ ความต้านทาน (resistance) [Ω]

$X =$ รีแอกแตนซ์ (reactance) [Ω]

$\phi =$ มุมกำลัง (power angle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปรับปรุงให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้น ทำให้กระแสลดลง และมุมกำลังลดลง ส่งผลแรงดันระหว่างสายน้อยลง

3. แรงดันตกในหม้อแปลงลดลง จากสูตร

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

เมื่อค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (%V) เพิ่มขึ้น

4. กำลังสูญเสียของระบบลดลง เนื่องจากกำลังสูญเสียในสายตัวนำไฟฟ้าของระบบเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของกระแส เมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นจะทำให้กระแสลดลง ดังนั้นกำลังสูญเสียจึงเป็นสัดส่วนกลับกับค่าตัวประกอบกำลังกำลังสอง

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

เมื่อ $P.F.1$ = ค่าตัวประกอบกำลังก่อนทำการปรับปรุง

$P.F.2$ = ค่าตัวประกอบกำลังหลังทำการปรับปรุง

$Power \text{ Loss} 1$ = กำลังไฟฟ้าสูญเสียก่อนทำการปรับปรุง

$Power \text{ Loss} 2$ = กำลังไฟฟ้าสูญเสียหลังทำการปรับปรุง

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

ดังนั้นเมื่อกระแสลดลง ทำให้กำลังสูญเสียในสายลดลงด้วย

5. กำลังสูญเสียในหม้อแปลงลดลง กำลังสูญเสียในหม้อแปลงประกอบด้วย 2 ส่วน คือกำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง ซึ่งกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงนี้จะแปรผันตามกระแสกำลังสอง เมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นแล้ว กระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงจะลดลง ทำให้กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดของทองแดงลดลง

1.2.2 ปรับปรุงโวลต์เตจเร็กกูเลชัน

โหนดทุกชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลทำให้เปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่จุดต่อกับแหล่งจ่าย (regulation) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของเครื่องจักรไฟฟ้าของผู้รับไฟของการไฟฟ้าคนอื่น เพื่อที่จะป้องกันเหตุการณ์เช่นนี้ทางการไฟฟ้าจึงออกกฎข้อบังคับให้ผู้ใช้ไฟฟ้ารักษาระดับแรงดันภายในขีดจำกัดที่กำหนด (ขีดจำกัดนี้อาจจะประมาณ $\pm 5\%$ ของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย) การเปลี่ยนแปลงโหนดอย่างรวดเร็วจะทำให้แรงดันลดลง และเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ป้องกันระบบ (protective equipment) ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีอุปกรณ์ป้องกันแก้ไขการเปลี่ยนแปลงแรงดัน เพื่อที่จะช่วยรักษาระดับแรงดันของแหล่งจ่ายให้อยู่ในขีดจำกัดที่ต้องการ

วิธีที่เห็นเด่นชัดที่สุดในการแก้ไขการเปลี่ยนแปลงแรงดันก็คือการทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพดีขึ้น โดยการเพิ่มขนาดและจำนวนหน่วยผลิตไฟฟ้า (generation unit) หรือสร้างระบบเครือข่ายที่ต่อเชื่อมกันให้หนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่วิธีดังกล่าวนี้เป็นวิธีที่ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และอาจนำไปสู่ปัญหาเกี่ยวกับระดับฟอลท์ที่รุนแรง (high fault levels) และพิกัดของสวิตช์เกียร์ (switch gear) ที่จะต้องสูงขึ้น สำหรับวิธีที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติและคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ก็คือควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังตามค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด และจัดการกับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยใช้ตัวชดเชยและอุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้รวดเร็วกว่าหน่วยผลิตไฟฟ้าและไม่ก่อให้เกิดฟอลท์

1.2.3 ทำโหนดให้สมดุล (Load Balancing)

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังกระแสสลับทั้งหมดเป็นระบบ 3 เฟส และถูกออกแบบมาสำหรับทำงานที่สมดุล 3 เฟส เนื่องจากการทำงานในขณะที่ระบบไม่สมดุลจะทำให้กระแสในลำดับเฟสอื่น (ลำดับเฟสศูนย์ และ ลำดับเฟสลบ) มีค่าสูงขึ้น และอาจก่อเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ได้เช่น

- ความสูญเสียในมอเตอร์ และหน่วยผลิต
- การแกว่งของแรงบิด (oscillating torque) ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ
- การกระเพื่อม (ripple) ที่เพิ่มขึ้นในตัวเรียงกระแส (rectifier)
- การปฏิบัติงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ต่างๆ
- การอิมิตัวของหม้อแปลง
- เกิดการไหลในสายนิวทรัล (neutral current) ที่สถานะ โหลดสมดุล
- เกิดฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ในรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันเป็นพารามิเตอร์ ที่สำคัญที่แสดงถึงคุณภาพของแหล่งจ่าย ส่วนที่สร้างปัญหาคือสเปกตรัมที่มีความถี่สูงกว่าความถี่หลักมูล (fundamental frequency) เท่านั้น นอกเหนือจากฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากโหลดไม่สมดุลแล้ว ตัวชดเชยบางแบบ เช่น ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรติสเตอร์ยังก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์เข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งจะต้องทำการกำจัดโดยใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Filter)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการของการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

2.1 การทำสมดุลสามเฟสและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของโหลดไม่สมดุล

ตัวชดเชย (compensator) ในอุดมคติที่ใช้เป็นตัวปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง หรือโวลเตจเร็กกูเลชัน (voltage regulation) นั้น มีรูปแบบเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ควบคุมได้ หรือเป็นอุปกรณ์รีแอกทีฟ (reactive device) ที่คอยควบคุมแรงดันให้คงที่ แม้ว่ารูปแบบของตัวชดเชยจะคว่ำสมดุล แต่อาจจะมีเฟสไคเฟสหนึ่งที่ย้ายกระแสสูงกว่าเฟสอื่น เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์โหลดที่ไม่สมดุล เราจะกำหนดทั้งโหลดและตัวชดเชยในเทอมชดเชยของความสามารถนำเชิงซ้อน (admittance) และความต้านทานเชิงซ้อน (impedance) และการวิเคราะห์จะต้องรวมการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไปด้วย เพื่อที่จะให้ใกล้เคียงความจริงยิ่งขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์สมดุลระหว่างเฟสและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไปพร้อมๆกัน ในเทอมของความสามารถนำเชิงซ้อนของโหลดและตัวชดเชยจะทำให้มองเห็นถึงพื้นฐานในการปรับปรุงโหลดได้ดีขึ้น

2.1.1 วงจรความสามารถนำเชิงซ้อนของการชดเชย

สมมติว่าแหล่งจ่ายแรงดัน (supply voltage) สมดุล และให้โหลดต่อกันแบบเดลต้า (Δ) ดังรูปที่ 2.1 ก. โดยมีค่าความสามารถนำเชิงซ้อนเป็น Y_1^{ab} , Y_1^{bc} และ Y_1^{ca} ซึ่งเป็นค่าเชิงซ้อนและไม่เท่ากัน และถือว่าโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หรือเป็นแบบกึ่งหยุดนิ่ง (quasi-stationary) เพื่อให้การวิเคราะห์ทางเฟสเซอร์สามารถยอมรับได้ และสามารถสมมติได้ว่า โหลดที่เป็นเชิงเส้น (linear)

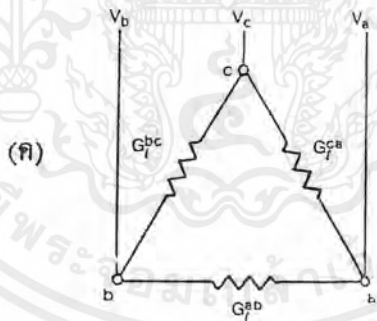
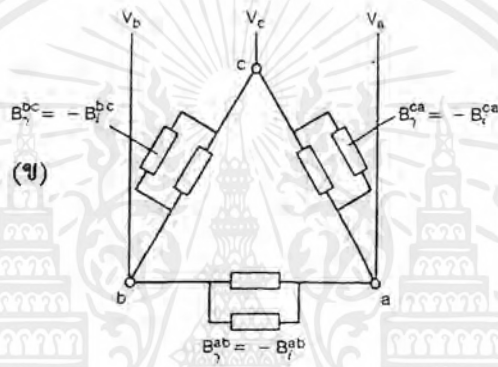
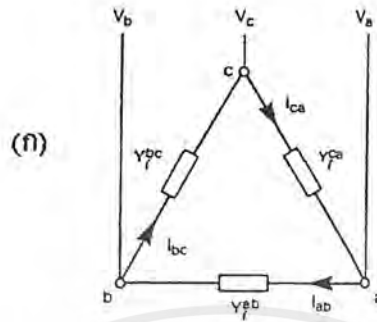
ตัวชดเชยค่าโหลดในอุดมคติจะสามารถสร้างความนำเชิงซ้อนแบบพาสซีฟ (passive) 3 เฟสที่เมื่อขนานเข้ากับโหลดและจะทำให้ได้โหลดค่าจริงและสมดุล ดังรูปที่ 2.1 ค.

เราจะเริ่มต้นด้วยการแก้ค่าตัวประกอบกำลังของความสามารถนำเชิงซ้อนของโหลดแต่ละเฟสให้มีแต่ส่วนจริง โดยการต่อความนำจินตภาพชดเชย (compensating susceptance) ที่มีค่าเท่ากับค่าลบของค่าความนำจินตภาพของโหลด (load susceptance) แบบเดลต้า (delta) ขนานเข้าไป กล่าวคือ

$$Y_1^{ab} = G_1^{ab} + jB_1^{ab} \quad \dots(2.1)$$

ดังนั้นความนำจินตภาพที่ชดเชยจะเป็น

$$B_Y^{ab} = -B_1^{ab} \quad \dots(2.2)$$



รูปที่ 2.1 (ก) โหลดสามเฟสไม่สมดุล

(ข) การต่อความนำจินตภาพเพื่อแก้ค่าตัวประกอบกำลังในแต่ละเฟส

(ค) โหลดลัพท์ที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็น 1 แต่ยังไม่สมดุล

ในการทำงานเดียวกันความนำจินตภาพที่ซดเซย $B_{\gamma}^{bc} = -B_l^{bc}$ และ $B_{\gamma}^{ca} = -B_l^{ca}$ จะถูกต่อขนานกับ $Y_l^{bc} = G_l^{bc} + jB_l^{bc}$ และ $Y_l^{ca} = G_l^{ca} + jB_l^{ca}$ ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.1 ข. และได้ความนำเชิงซ้อนของโหลด (load admittances) ในแต่ละเฟสเป็น $G_l^{ab}, G_l^{bc}, G_l^{ca}$ ดังรูปที่ 2.1 ค. ซึ่งจะเป็นค่าจริง ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังเป็น 1 (unity) แต่ยังคงไม่สมดุล (unbalanced) อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า: ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำโหนดค่าจริงที่ไม่สมดุลให้สมดุลนั้น เริ่มต้นจากการพิจารณาโหนดหนึ่งเฟส G_1^{ab} (รูปที่ 2.2 ก.) เราสามารถทำให้กระแสสาย (line) ลำดับบวกสามเฟสสมดุลได้โดยแยกพิจารณาการชดเชยค่าตัวประกอบกำลัง และกระแสสายไม่สมดุลในแต่ละเฟส โดยอาศัยทฤษฎีการทับซ้อน (super position)

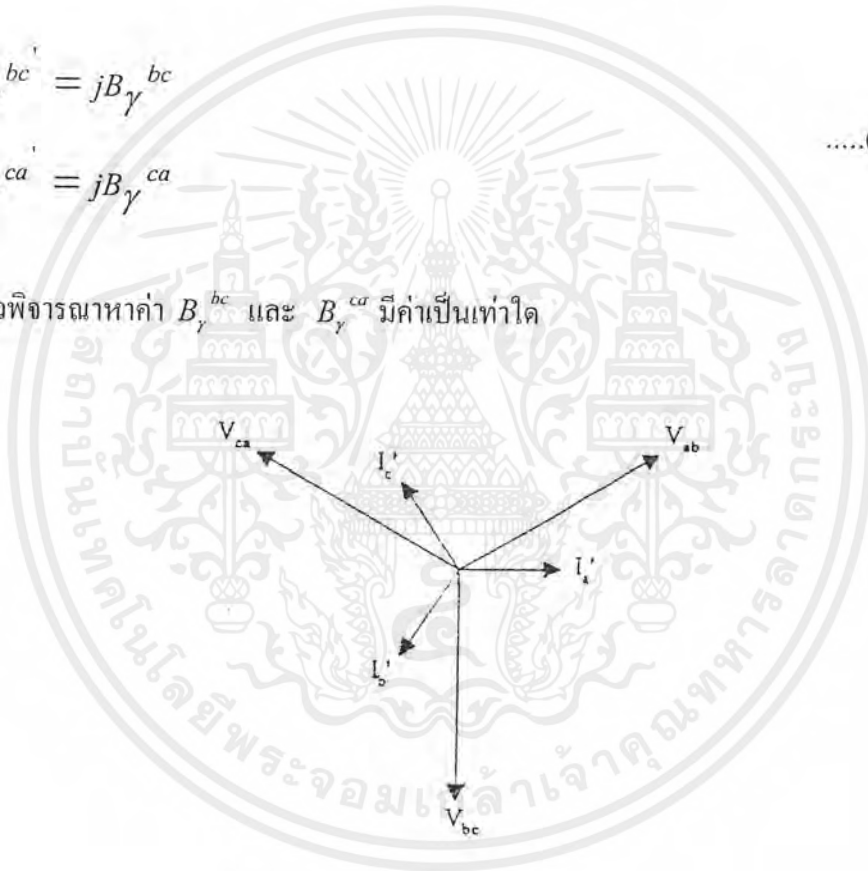
พิจารณาเฟส ab

เนื่องจากการชดเชยจะทำการชดเชยเฉพาะกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเท่านั้น ดังนั้นจึงสมมติให้ชดเชยความนำเชิงซ้อนในอีก 2 เฟสเป็น

$$Y_{\gamma}^{bc} = jB_{\gamma}^{bc}$$

$$Y_{\gamma}^{ca} = jB_{\gamma}^{ca}$$
.....(2.3)

แล้วพิจารณาค่า B_{γ}^{bc} และ B_{γ}^{ca} มีค่าเป็นเท่าใด



รูปที่ 2.2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงแรงดันและกระแส

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรม

$$V_a = V \angle 0^\circ$$

$$V_{ab} = \sqrt{3}V \angle 30^\circ$$

$$V_{bc} = \sqrt{3}V \angle -90^\circ = a^2 V_{ab}$$

$$V_{ca} = \sqrt{3}V \angle 150^\circ = a V_{ab}$$
.....(2.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ค่ากระแสก่อนการชดเชย

$$I_c = 0, I_a = -I_b \quad \dots(2.5)$$

กระแสหลังการชดเชยให้สมดุลสามเฟส จะเป็น

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

$$I_b' = I\angle -120^\circ = a^2 I_a' \quad \dots(2.6)$$

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

กระแสสายในแต่ละเส้น (Line) จะมีค่าตามสมการ

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

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

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

$$= V_{ab} (Y_{ab}' - a Y_{ca}') = V_{ab} (G_{ab} - ajB_{\gamma}^{ca})$$

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

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

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

$$= V_{ab} (a^2 Y_{bc}' - Y_{ab}') = V_{ab} (a^2 jB_{\gamma}^{bc} - G_{ab})$$

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและขอเชิญชวนให้แจ้งข้อผิดพลาดไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$V_{ab} (a^2 jB_{\gamma}^{bc} - G_l^{ab}) = a^2 V_{ab} (G_l^{ab} - ajB_{\gamma}^{ca}) \quad \dots(2.10)$$

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

$$V_{ab} \left[\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) jB_{\gamma}^{bc} - G_l^{ab} \right] = V_{ab} \left[\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) G_l^{ab} - jB_{\gamma}^{ca} \right] \quad \dots(2.11)$$

$$\left(-G_l^{ab} + \frac{\sqrt{3}}{2} B_{\gamma}^{bc} \right) + j \left(\frac{B_{\gamma}^{bc}}{2} \right) = \left(-\frac{1}{2} G_l^{ab} \right) + j \left(\frac{\sqrt{3}}{2} G_l^{ab} - jB_{\gamma}^{ca} \right)$$

จากสมการที่ (2.11) จะได้ว่า

ส่วนจริงด้านซ้าย = ส่วนจริงทางด้านขวา

$$-G_l^{ab} + \frac{\sqrt{3}}{2} B_{\gamma}^{bc} = -\frac{1}{2} G_l^{ab} \quad \dots(2.12.1)$$

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

ส่วนจินตภาพด้านซ้าย = ส่วนจินตภาพด้านขวา

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

แทนค่า B_{γ}^{bc} จากสมการที่ (2.12.1)

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

$$B_{\gamma}^{ca} = -\frac{3}{2\sqrt{3}} G_l^{ab} + \frac{G_l^{ab}}{2\sqrt{3}} = -\frac{G_l^{ab}}{\sqrt{3}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

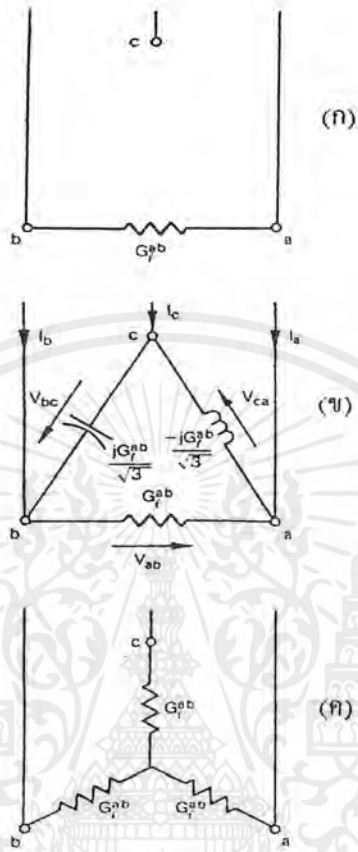
นั่นคือ จะต้องชดเชยค่าความนำเชิงซ้อนแบบตัวเก็บประจุ (Capacitive susceptance) ระหว่างเฟส b และเฟส c เป็น

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

และชดเชยค่าความนำเชิงซ้อนที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ (Inductive susceptance) เท่ากับ

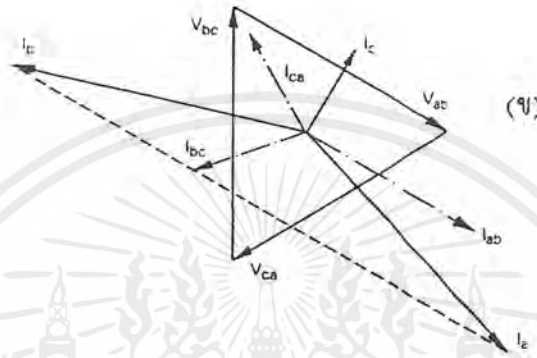
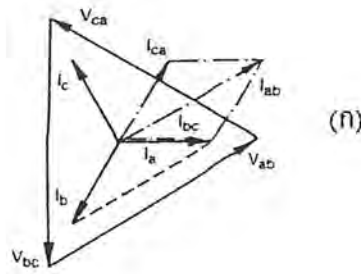
$$B_{\gamma}^{ca} = -\frac{G_I^{ab}}{\sqrt{3}}$$

ระหว่างเฟส c กับ a ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ข. และจะได้กระแสสาย I_a, I_b และ I_c กรณีแรงดันลำดับบวก (Positive sequence voltage) V_{ab}, V_{bc} และ V_{ca} ดังแสดงในรูป 2.4 ก. กระแสสายนั้นไม่เพียงแต่จะสมดุลกันเท่านั้น แต่ยังจะต้องมีเฟสตรงกัน (inphase) กับแต่ละแรงดันเฟส (phase voltage) ที่สอดคล้องกันด้วย ดังนั้นแหล่งจ่ายที่ต่อแบบวาย (Y) แต่ละเฟสจะจ่ายกำลังงานเป็น 1 ใน 3 ของกำลังงานทั้งหมด และไม่มีกำลังไฟฟ้าย้อนกลับ สำหรับกรณีแรงดันลำดับเฟสบวก (positive sequence voltage) จะได้ว่าวงจรสมมูลเป็นตัวต้านทานซึ่งมีค่าความนำ G_I^{ab} 3 ตัวต่อกันแบบวาย ดังรูปที่ 2.3 ค. และกำลังงานทั้งหมดมีค่า $3V^2G_I^{ab}$ เมื่อ V เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันสายเทียบนิวทอลจากแหล่งจ่ายที่สมมุติว่าสมดุล โดยทั้งค่าตัวประกอบกำลังทั้งหมดและตัวประกอบกำลังในแต่ละเฟสของ แหล่งจ่ายจะมีค่าเป็น 1 แม้ว่ากระแสในแต่ละสาขา (branches) ของเดลต้าจะไม่สมดุล แต่จะมีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนสมดุลภายในเดลต้า กล่าวคือกำลังไฟฟ้าย้อนกลับสร้างขึ้นจากตัวเก็บประจุระหว่างสาย b และ c มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัวเหนี่ยวนำ ระหว่างสาย c กับ a รับเข้าไป ดังนั้นจึงไม่มีการสร้างหรือรับกำลังไฟฟ้าย้อนกลับจากแหล่งจ่าย



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

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นจริงว่า การทำสมดุลโหลดขึ้นอยู่กัลำดับเฟส ในรูปที่ 2.4 ข. ได้แสดง กระแสสายที่ได้จากแหล่งจ่ายแรงดันลำดับเฟสลบ (negative sequence supply voltage) โดยที่ทั้ง กระแสสายและกระแสในแต่ละสาขาของเดลต้าจะไม่สมดุล แม้ว่ากำลังงานรวมยังคงมีค่าเหมือนเดิม ($= 3V^2 G_l^{ab}$) และไม่มีกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟถูกจ่ายจากหรือรับเข้าไปในระบบแหล่งจ่ายเลขที่ตาม อย่างไม่ก็ตามค่าตัวประกอบกำลังในทั้ง 3 เฟสของแหล่งจ่ายจะไม่เป็น 1 (unity)



รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าการทำสมมูล โหลดขึ้นอยู่กับลำดับเฟส
 (ก) ผลการตอบสนองของรูปที่ 2.3 ก. ในรูปเฟสเซอร์ไดอะแกรม กรณีลำดับเฟส
 เฟสบวก

- ค่าตัวประกอบกำลังรวมเป็น 1
- กระแสในแต่ละสาขาสมมูล

(ข) ผลการตอบสนองของรูปที่ 2.3 ข. ในรูปเฟสเซอร์ไดอะแกรม กรณีลำดับเฟสลบ
 - ค่าตัวประกอบกำลังรวมไม่เท่ากับ 1
 - กระแสไม่สมมูล

ในการทำงานเดียวกันกับกรณีเฟส ab การชดเชย G_1^{bc} และ G_1^{ca} ในเฟส bc และเฟส ca ค่า
 ความนำเชิงซ้อนดังนี้

พิจารณาเฟส bc

$$B_{\gamma}^{ab} = -\frac{G_l^{bc}}{\sqrt{3}} \tag{2.13.1}$$

$$B_{\gamma}^{ca} = \frac{G_l^{bc}}{\sqrt{3}} \tag{2.13.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเฟส ca

$$B_{\gamma}^{bc} = \frac{-G_1^{ca}}{\sqrt{3}} \quad \dots(2.14.1)$$

$$B_{\gamma}^{ab} = \frac{G_1^{ca}}{\sqrt{3}} \quad \dots(2.14.2)$$

จากทฤษฎีการทับซ้อน รวมค่าความนำเชิงซ้อนที่จะต้องชดเชยเพื่อต้องการแก้กระแสไม่สมดุลในสายทั้งสามเฟส

$$\begin{aligned} Y_{\gamma}^{ab} &= j(-G_1^{bc} + G_1^{ca})/\sqrt{3} \\ Y_{\gamma}^{bc} &= j(G_1^{ab} - G_1^{ca})/\sqrt{3} \\ Y_{\gamma}^{ca} &= j(-G_1^{ab} + G_1^{bc})/\sqrt{3} \end{aligned} \quad \dots(2.15)$$

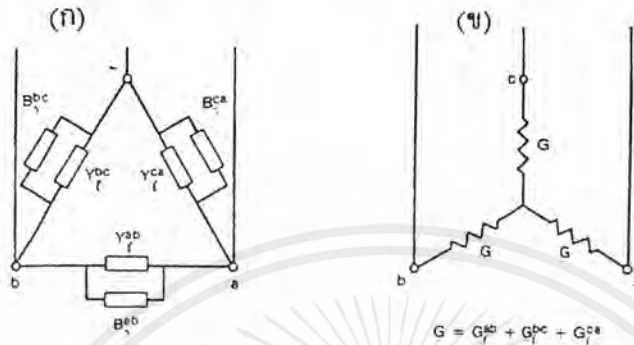
เมื่อเรารวมความนำจินตภาพที่ใช้แก้ค่าตัวประกอบกำลังเข้ากับสมการที่ (2.2) ทำให้ตอนนี้แต่ละสาขาของเดลต้ามีความนำจินตภาพที่ชดเชย (compensating susceptances) 3 ตัว ขนานกัน ซึ่งสามารถรวมกันได้เป็น “โครงข่ายชดเชยสามเฟสที่ต่อแบบเดลต้าในทางอุดมคติ (three-phase, delta-connect ideal compensating network)” ซึ่งส่วนชดเชยที่จะต้องใส่เข้าไปแต่ละเฟสจะเป็น

$$\begin{aligned} B_{\gamma}^{ab} &= -B_1^{ab} + (G_1^{ca} - G_1^{bc})/\sqrt{3} \\ B_{\gamma}^{bc} &= -B_1^{bc} + (G_1^{ab} - G_1^{ca})/\sqrt{3} \\ B_{\gamma}^{ca} &= -B_1^{ca} + (G_1^{bc} - G_1^{ab})/\sqrt{3} \end{aligned} \quad \dots(2.16)$$

ซึ่งทำให้ความนำเชิงซ้อนของโหลดที่ชดเชยเรียบร้อยแล้ว (compensated load admittance) เป็นค่าจริงและสมดุล ดังแสดงเป็นวงจรสมมูลในรูปที่ 2.5 ข. (วงจรสมมูลนี้ใช้ได้กับเฉพาะแรงดันลำดับเฟสบวกเท่านั้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ค่าความนำของโหลดสมดุล (ซึ่งเกิดจากโหลดต้องการกำลังงานเท่ากันทั้ง 3 เฟส) จะได้ว่า $G_{l^{ca}} - G_{l^{bc}} = 0$ ดังนั้นวงจรชดเชยก็ไม่ต้องทำหน้าที่สมดุลโหลด เพียงแต่ต้องไม่ไปทำลายความสมดุลของโหลดที่มีอยู่แล้ว โดยการไม่ใช้หรือจ่ายกำลังไฟฟ้ารีเอกทีฟในแต่ละสาขาของโหลด



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

เราสามารถสรุปหลักสำคัญของการชดเชยค่าโหลดได้ดังนี้

1. โหลดสามเฟส, ไม่มีกราวด์, เชิงเส้นและไม่สมดุลใดๆ สามารถทำให้เป็นโหลดสามเฟสที่เป็นค่าจริงและสมดุลได้ และไม่ทำให้กำลังไฟฟ้าจริง (real power) ที่ส่งถ่ายระหว่างแหล่งจ่าย (source) กับโหลดเปลี่ยนแปลง โดยต่อวงจรชดเชยโหลดทางอุดมคติ (ideal compensating network) ขนานเข้าไปกับโหลด

2. วงจรชดเชยโหลดทางอุดมคติจะมีเพียงส่วนเสมือนเพียงอย่างเดียว (purely reactive)

ถ้าความนำเชิงซ้อนของโหลดเปลี่ยนแปลง ค่าความนำจินตภาพของวงจรชดเชยโหลดจะต้องเปลี่ยนไปเพื่อที่จะสามารถทำให้โหลดสมดุลได้

ปัญหา

เราไม่สามารถวิเคราะห์โหลดให้ออกมาอยู่ในรูปของสมการที่ (2.1) ได้ง่ายๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่สามารถทำให้ค่าความนำจินตภาพที่ชดเชยในอุดมคติ ($B_{l^{ab}}$, $B_{l^{bc}}$, $B_{l^{ca}}$) ในรูปของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดจากระบบได้

2.1.2 การชดเชยโหลดในเทอมของส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Components)

หลักของการชดเชยโหลดตามสมการที่ (2.16) และตามทีสรุปไว้ 2 ข้อท้ายหัวข้อที่แล้ว จะเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่าเราจะควบคุมตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้ทำงานอย่างไร ซึ่งจะเป็นในทางทฤษฎี สำหรับการออกแบบตัวชดเชยใช้งานจริงนั้นถ้าใช้สมการที่ (2.16) เป็นสมการพื้นฐานในการคำนวณแล้วจะไม่สะดวกในการควบคุมระบบ เพราะว่าค่าความนำจินตภาพของตัวชดเชยที่ต้องการถูกกำหนดในเทอมของความนำเชิงซ้อนของโหลดซึ่งไม่สามารถวัดค่าได้โดยเหมือนอย่างกระแสสายและแรงดัน ด้วยเหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องทำให้สูตรหาค่าความนำเชิงซ้อนที่ต้องชดเชย (compensating susceptance) อยู่ในรูปของกระแสสายกับแรงดัน ซึ่งสูตรนี้จะแสดงให้เห็นถึงวิธีการสร้างสัญญาณทางไฟฟ้าส่งไปยังตัวชดเชยตามความต้องการค่าความนำจินตภาพแบบความจุหรือแบบความเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส โดยระบบควบคุมตัวชดเชยจะต้องสามารถปรับค่าความนำจินตภาพของตัวชดเชยให้ได้เพียงพอกับความต้องการ

การวิเคราะห์โหลดไม่สมดุลโดยการแปลงสูตรหาความนำจินตภาพที่ต้องการในเทอมกระแสสายและแรงดัน จะมีความยากในการวิเคราะห์ตรงที่ไม่มีวิธีการคณิตศาสตร์โดยเฉพาะที่รวบรัดที่ทำให้กระแสในระบบชดเชยสมดุลได้ แต่ปัญหาตรงจุดนี้สามารถขจัดออกไปได้ โดยขั้นแรกแปลงกระแสและแรงดันให้อยู่ในรูปส่วนประกอบสมมาตร ต่อจากนั้นก็ใช้การแปลงกลับ (inverse transformation) เพื่อที่จะแสดงความนำจินตภาพที่ต้องการในเทอมของการแสสายและแรงดันที่เกิดขึ้นจริง

การใช้ส่วนประกอบสมมาตรจะมีประโยชน์ในการกำหนดลักษณะของตัวชดเชยแบบต่างๆ กับ โหลดที่ไม่สมดุล และถ้าแหล่งจ่ายเป็นลำดับเฟสบวก ตัวชดเชยก็จะมีลักษณะแตกต่างออกไปอีก

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

$$V_{a1} = V$$

$$V_{b1} = a^2 V_{a1} = a^2 V \quad \dots(2.17)$$

$$V_{c1} = a V_{a1} = aV$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ค่าแรงดันระหว่างสาย (line – line) เป็น

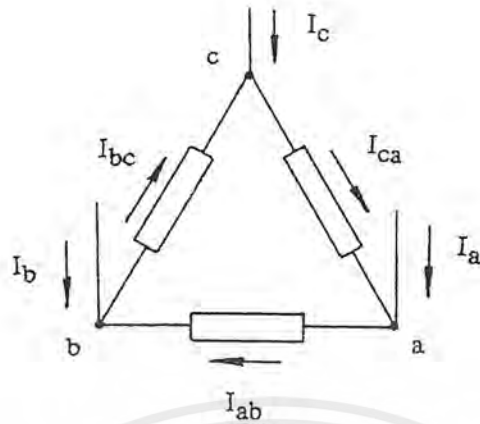
$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b = (1 - a^2)V \\ V_{bc} &= V_b - V_c = (a^2 - a)V \\ V_{ca} &= V_c - V_a = (a - 1)V \end{aligned} \quad \dots(2.19)$$

ค่ากระแสไหลคในแต่ละสาขาของเคลด้าเป็น

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

และกระแสสายเป็น

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



รูปที่ 2.6 แสดงการไหลของกระแสสายและกระแสเฟส (กระแสในสาขา)

ส่วนประกอบสมการของกระแสสายสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_0 &= (I_a + I_b + I_c) / \sqrt{3} \\ I_1 &= (I_a + aI_b + a^2I_c) / \sqrt{3} \\ I_2 &= (I_a + a^2I_b + aI_c) / \sqrt{3} \end{aligned} \quad \dots(2.22)$$

ซึ่ง I_0, I_1 และ I_2 เป็นเฟสเซอร์อ้างอิงลำดับศูนย์, ลำดับบวก, ลำดับลบ ตามลำดับ จากสมการที่ (2.21) สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} I_0 &= 0 \\ I_1 &= (Y_l^{ab} + Y_l^{bc} + Y_l^{ca}) V \sqrt{3} \\ I_2 &= -(a^2 Y_l^{ab} + Y_l^{bc} + a Y_l^{ca}) V \sqrt{3} \end{aligned} \quad \dots(2.23)$$

บรรทัดที่ 3 ของสมการ (2.23) แสดงให้เห็นว่าถ้าหากเป็นโหลดสมดุลจะไม่มีกระแสลำดับลบ $Y_l^{ab} = Y_l^{bc} = Y_l^{ca}$, $(a^2 + 1 + a)$ เป็นส่วนประกอบของ I_2 และทำให้ค่าเป็นศูนย์

ส่วนประกอบสมมาตรของกระแสสาย เมื่อต่อการชดเชยรีแอกทีฟแบบเดลต้า สามารถกำหนดได้คล้ายกันดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 I_{0(r)} &= 0 \\
 I_{1(r)} &= j(B_l^{ab} + B_l^{bc} + B_l^{ca})V\sqrt{3} \\
 I_{2(r)} &= -j(a^2 B_l^{ab} + B_l^{bc} + aB_l^{ca})V\sqrt{3}
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

การชดเชยโหลดจะสมดุลถ้ากระแสลำดับเฟสลบจะเป็นศูนย์ กล่าวคือ

$$I_{2(l)} + I_{2(r)} = 0 \tag{2.25}$$

ซึ่ง $I_{2(l)}$ คือ กระแสโหลด สมการข้างบนเกี่ยวข้องกับทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ $I_{2(l)}$ และ $I_{2(r)}$ การชดเชยค่าพาวเวอร์เฟคเตอร์ทั้งหมดจะเป็นยูนิตี (Unity) ถ้าส่วนจินตภาพของ ลำดับบวกของกระแสสาย เป็นศูนย์ดังสมการ

$$\text{Im} [I_{1(l)} + I_{1(r)}] = 0 \tag{2.26}$$

ถ้ากระแสชดเชย $I_{1(r)}$ และ $I_{2(r)}$ ถูกแทนจากสมการ (2.24) ลงในสมการ (2.25), (2.26) และสมการเหล่านี้อธิบายสำหรับ B_r^{ab}, B_r^{bc} และ B_r^{ca} และต่อไปนี้เป็นสูตรสำหรับการชดเชยค่าความนำจินตภาพในทางอุดมคติ

$$\begin{aligned}
 B_r^{ab} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} \left[\text{Im} I_{1(l)} + \text{Im} I_{2(l)} - \sqrt{3} \text{Re} I_{2(l)} \right] \\
 B_r^{bc} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} \left[\text{Im} I_{1(l)} - 2 \text{Im} I_{2(l)} \right] \\
 B_r^{ca} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} \left[\text{Im} I_{1(l)} + \text{Im} I_{2(l)} + \sqrt{3} \text{Re} I_{2(l)} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$

ด้านขวามือของสมการต้องแปลงกลับ โดยการแปลงกลับ ส่วนประกอบสมมาตร (สมการ 2.22) ถ้าหากไม่มีกระแสลำดับเฟสศูนย์ จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 B_{\mathcal{Y}}^{ab} &= -\frac{1}{3V} \left[\text{Im } I_{a(l)} + \text{Im } aI_{b(l)} - \text{Im } a^2 I_{c(l)} \right] \\
 B_{\mathcal{Y}}^{bc} &= -\frac{1}{3V} \left[-\text{Im } I_{a(l)} + \text{Im } aI_{b(l)} + \text{Im } a^2 I_{c(l)} \right] \\
 B_{\mathcal{Y}}^{ca} &= -\frac{1}{3V} \left[\text{Im } I_{a(l)} - \text{Im } aI_{b(l)} + \text{Im } a^2 I_{c(l)} \right]
 \end{aligned} \quad \dots(2.28)$$

สมการนี้แสดงค่าความนำจินตภาพที่ต้องการชดเชยในเทอมของเฟสเซอร์ของกระแสสาย $I_{a(l)}, I_{b(l)}$ และ $I_{c(l)}$ ของโหลด

ถ้าหากต้องการชดเชยค่าความนำจินตภาพในเทอมของค่ากำลังงานจริง หรือค่ากำลังไฟฟ้า สติต เมื่อ $V_a = V, V_b = a^2 V$ และ $V_c = aV$ เราสามารถแทน V_a, V_b และ V_c ลงในสมการ (2.28) จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned}
 B_{\mathcal{Y}}^{ab} &= -\frac{1}{3V^2} \left[\text{Im} \left(V_a I_{a(l)}^* \right) + \text{Im} \left(V_b I_{b(l)}^* \right) - \text{Im} \left(V_c I_{c(l)}^* \right) \right] \\
 B_{\mathcal{Y}}^{bc} &= -\frac{1}{3V^2} \left[\text{Im} \left(V_b I_{b(l)}^* \right) + \text{Im} \left(V_c I_{c(l)}^* \right) - \text{Im} \left(V_a I_{a(l)}^* \right) \right] \\
 B_{\mathcal{Y}}^{ca} &= -\frac{1}{3V^2} \left[\text{Im} \left(V_c I_{c(l)}^* \right) + \text{Im} \left(V_a I_{a(l)}^* \right) + \text{Im} \left(V_b I_{b(l)}^* \right) \right]
 \end{aligned} \quad \dots(2.29)$$

บทที่ 3

หลักการของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต

3.1 การใช้งานตัวชดเชยกำลังไฟฟ้า

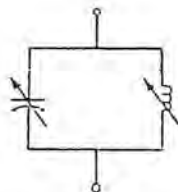
ตัวชดเชยขนานแบบสถิต (Static Shunt Compensator) จัดอยู่ในกลุ่มของตัวชดเชยชนิดแอกทีฟ (Active Compensator) คำว่า “สถิต” (Static) ความหมายไม่เหมือนกับชิงโครนัสคอนเดนเซอร์ เพราะไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ ใช้สำหรับในการชดเชยเชิงรีจ – อิมพีแดนซ์ และใช้สำหรับชดเชยเป็นช่วงๆในระบบสายส่งแรงสูงระยะทางไกลๆและก็ยังมีการชดเชยโหลดหลายรูปแบบการใช้งานเหล่านี้อาจแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 3.1 หัวข้อในตารางที่ 3.1 คือความต้องการพื้นฐานสำหรับการทำงานระบบไฟฟ้ากำลังกระแสสลับส่วนการใช้งานอื่นที่ไม่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 แต่ก็มีประโยชน์อย่างมากประกอบด้วย การควบคุมของแรงดันกระแสสลับใกล้เคียงกับแรงดันที่ขั้วของตัวแปลงกระแสตรง แรงดันสูง (HV-DC Converter) ลดการสูญเสียของสายส่งซึ่งเป็นผลมาจากหน่วยกำเนิดไฟฟ้าระยะใกล้หรือการดูดกลืนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและกำจัดเรโซแนนซ์ของลีสชิงโครนัส

ตารางที่ 3.1

การใช้งานในเชิงปฏิบัติของตัวชดเชยแบบสถิตในระบบไฟฟ้ากำลัง

รักษาระดับแรงดันให้คงที่หรือใกล้เคียง
<ul style="list-style-type: none">- ภายใต้อาณัติที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างช้าๆเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโหลด- ใช้ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่มีสาเหตุมาจากเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดว่าจะเกิดขึ้น เช่น การต่อโหลด แรงดันของเจนเนอเรเตอร์และสายส่งขาดหายไป- ลดการกระตุกของแรงดัน (Voltage Flicker) ที่มีสาเหตุมาจากการที่โหลดเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว เช่น ในเตาหลอมโลหะ
ปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้า
<ul style="list-style-type: none">- ใช้ช่วยจ่ายแรงดันเสริมเข้าไปในจุดที่สำคัญ- ช่วยในการปรับปรุงการแกว่ง (Swing dumping)
ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง
ทำให้เฟสสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิตในทางอุดมคติ

3.1.1 คุณสมบัติของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต

รูปที่ 3.1 แสดงถึงตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต (static reactive power compensator) ในทางอุดมคติ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการหน่วงเวลาการตอบสนองและยังสามารถขยายช่วงการชดเชยได้อีกด้วย (ขยายช่วงตามหลัง (lagging) และนำหน้า (leading))

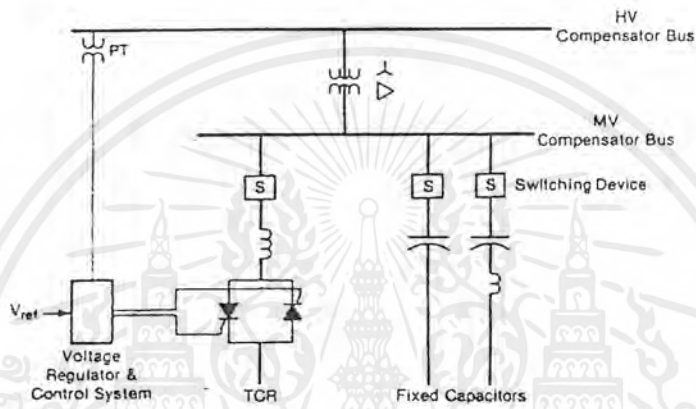
คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวชดเชยแบบสถิต คือ ความสามารถในการรักษาให้แรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) คงที่ตลอดช่วงการปรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบไฟฟ้ากำลัง คุณสมบัติในการรักษาแรงดันให้คงที่นี้เป็นความจำเป็นอันแรกของตัวชดเชยขนานแบบพลวัต (dynamic shunt compensator) และมีความสำคัญในการลดการกระตุก (flicker)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

คุณสมบัติที่สำคัญข้อที่สองคือความเร็วในการตอบสนอง ซึ่งตัวชดเชยจะต้องสามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้รวดเร็วเพียงพอเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) แม้จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยก็ตาม แต่อาจไม่จำเป็นที่จะต้องตอบสนองได้เร็วต่อทุกระบบ เช่น ในระบบสายส่งซึ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบด้วย ซึ่งไม่มีจุดที่ชี้ชัดลงไปว่าตัวชดเชยแต่ละแบบจะมีการตอบสนองที่เร็วที่สุดที่เป็นไปได้ในทางทฤษฎีเท่าใด ในการปรับปรุงค่าโหลด การกระตุก (flicker) จะลดลงได้เมื่อตัวชดเชยตอบสนองรวดเร็วที่สุดเท่านั้น

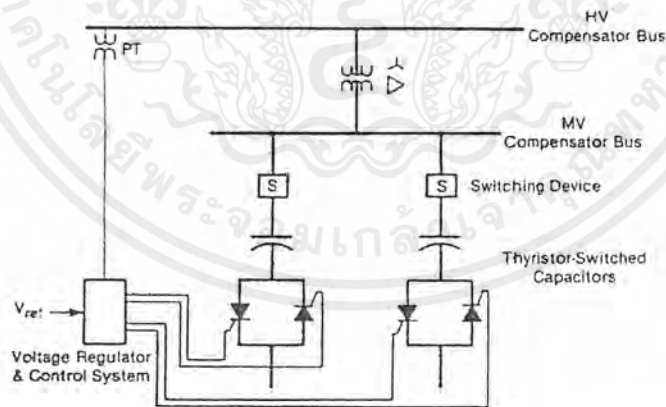
ลักษณะการควบคุมส่วนใหญ่จะมีความชันเป็นบวกเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเสถียรภาพของจุดปฏิบัติงาน กระแสแอกทีฟจะถูกจำกัดในทั้งแบบมุนำ (leading) และมุนตาม (lagging) ด้วยองค์ประกอบที่ใช้ในการออกแบบตัวชดเชย และหลักในการปฏิบัติงานของมัน แม้ว่ากราฟคุณลักษณะของมันจะเบนออกจากเส้นตรง ซึ่งทำให้ไม่ต่อเนื่อง โดยค่าความชันของกราฟจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสกับแรงดัน

ทฤษฎีหลายอย่างถูกนำมาใช้ในการออกแบบตัวชดเชยแบบสถิต ซึ่งสามารถจำแนกประเภทของตัวชดเชยได้เป็น 3 แบบใหญ่ ๆ คือ

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

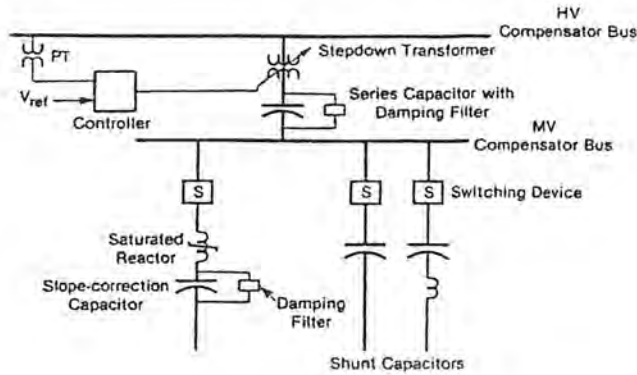


รูปที่ 3.2 วงจรโวลต์ไออะแกรมของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์



รูปที่ 3.3 วงจรโวลต์ไออะแกรมของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

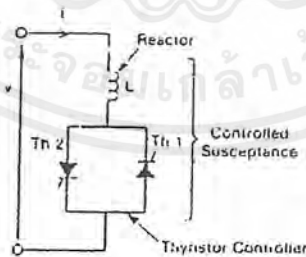


รูปที่ 3.4 วงจรโคจรของตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์อิมิตัว

3.2 ตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor – Controlled Reactor , TCR)

3.2.1 หลักการทำงาน

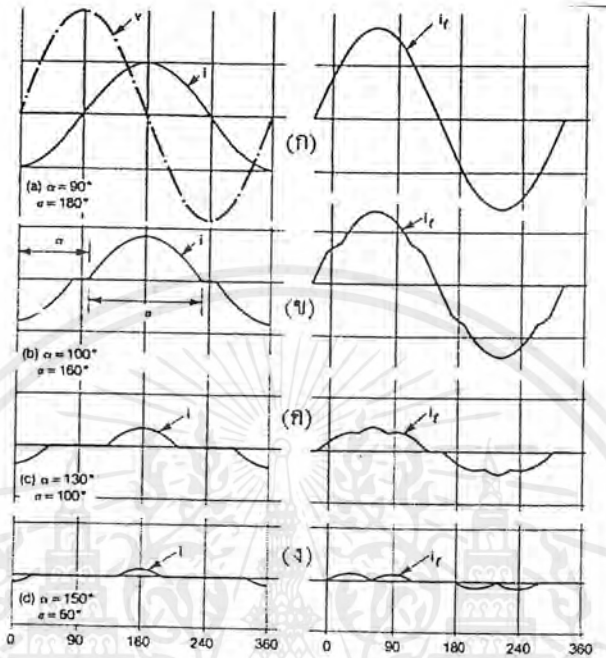
รูปแบบพื้นฐานของตัวชดเชยรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (TCR) แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยควบคุมที่ไทรสเตอร์ (Thyristor Controller) จากรูปจะเห็นเป็นไทรสเตอร์คู่ต่อขนานกลับกัน ซึ่งมันจะนำกระแสกลับไป-กลับมาในแต่ละครึ่งรอบ (cycle) ของความถี่แหล่งจ่ายไฟฟ้าไทรสเตอร์ถูกจุดชนวน (turn on) ที่จุดสูงสุด (peaks) ของคลื่นแรงดันของแหล่งจ่ายพอดี จะเกิดการนำกระแสเต็มที่ (full conduction) ทำให้ไทรสเตอร์ลัดวงจร และกระแสเป็นรีแอคทีฟและตามหลัง (lagging) แรงดันเกือบ ๆ 90° เนื่องจากมีส่วนประกอบที่เฟสตรงกับแรงดัน (in-phase) อยู่เล็กน้อยอันเกิดจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในรีแอคเตอร์ประมาณ 0.5 - 2% ของกำลัง ไฟฟ้ารีแอคทีฟรูปที่ 3.6. แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อเกิดการนำกระแสเต็มที่ (full conduction)



รูปที่ 3.5 ส่วนต่างๆ ของรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์

ถ้าเรাত্রีกาเวลาที่มุมเพิ่มมากขึ้น (delay) เท่ากันบนไทรสเตอร์ทั้งคู่ รูปคลื่นของกระแสจะเป็นดังรูปที่ 3.6 ก ถึง 3.6 ง ผลการตอบสนองเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับมุมทริก α ซึ่งวัดจากจุดที่แรงดันเป็นศูนย์ การนำกระแสจะเกิดขึ้นเต็มที่เมื่อมุมทริกเป็น 90° แต่ถ้าทริกด้วยมุม 90° ถึง 180° จะเกิดการนำกระแสบางส่วน เมื่อเพิ่มมุมทริกจะไปทำให้ส่วนประกอบหลักมูลกระแสลดลง การทำเช่นนี้เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำของรีแอคเตอร์ซึ่งเป็นการลดการใช้กำลัง ไฟฟ้ารีแอคทีฟไม่วาทกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลง นอกจากจะเกี่ยวข้องกับกระแสหลักมูลแล้วตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ยัง
เป็นความนำจินตภาพ (susceptance) ที่ควบคุมได้ และสามารถนำไปใช้ในตัวชดเชยแบบสถิต



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นกระแสสาย (line) และกระแสเฟสเมื่อต่อตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วย
ไทรสเตอร์แบบเคลด้า

กระแสขณะใด ๆ (i) เป็น

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

เมื่อ V คือ แรงดันอาร์เอ็มเอส (rms)

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

$\omega = 2\pi f$

และ α คือ มุมทริกที่ป้อนขาเกท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเริ่มต้น (origin) ของเวลา คือ จุดที่แรงดันไฟฟ้าเป็น 0 และกำลังจะเพิ่มขึ้นในทางบวก เมื่อใช้การวิเคราะห์ฟูเรียร์ จะพบว่ากระแสหลักมูล (fundamental) มีค่าเป็น

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

เมื่อ σ คือ ช่วงมุมที่นำกระแส ซึ่งสัมพันธ์กับ α ดังสมการ

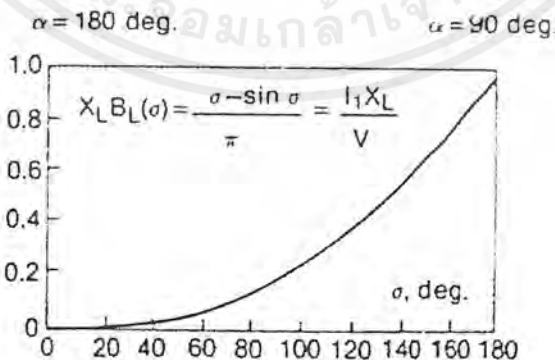
$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi \dots(3.3)$$

เราสามารถเขียนสมการที่ (3.2) ใหม่ได้เป็น

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

เมื่อ $B_L(\sigma)$ เป็นค่าความนำจินตภาพที่ความถี่หลักมูล ซึ่งสามารถปรับค่าได้โดยควบคุม ช่วงมุมที่นำกระแส (σ)

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



รูปที่ 3.7 กฎการควบคุมของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์แบบพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

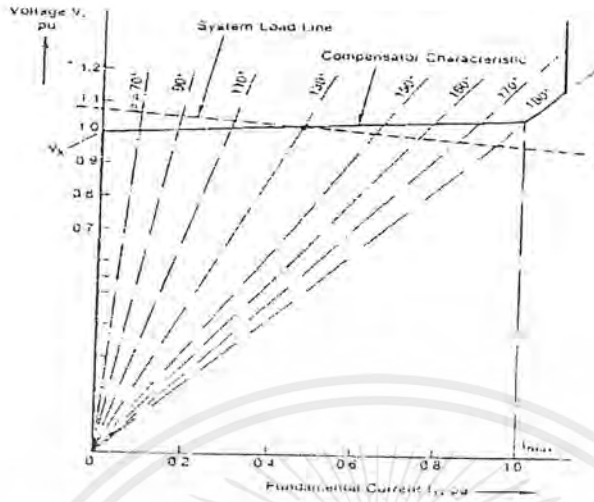
กฎการควบคุมนี้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.7 เมื่อ $\sigma = \pi$ หรือ 180° จะทำให้ได้ค่า $B_L(\max) = \frac{1}{X_L}$ ซึ่งจะทำให้ไคริสเตอร์นำกระแสเต็มที่ และค่าความนำจินตภาพที่ความถี่หลักมูลจะต่ำสุดเป็น 0 เมื่อ $\sigma = 0^\circ$ ($\alpha = 180^\circ$) หลักในการควบคุมดังกล่าวเรียกว่า “การควบคุมเฟส (phase control)”

3.2.2 ลักษณะแรงดัน / กระแส

ตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์จำเป็นต้องมีระบบควบคุมที่ใช้กำหนดในรูปของคลื่นพัลส์ไปยังขาเกตของไคริสเตอร์ ในการออกแบบระบบควบคุมนี้เราจะต้องสร้างสัญญาณป้อนขาเกตที่จะทำให้ได้ค่าความนำจินตภาพ (susceptance) B_L ตามต้องการกระบวนการในการควบคุมจะแตกต่างกันไปตามพารามิเตอร์ที่วัดได้จากระบบที่จะไปชดเชย (compensated) เช่น แรงดัน และจะสร้างสัญญาณป้อนขาเกต (gating pulses) โดยไม่ได้ใช้สัญญาณสำหรับค่าความนำจินตภาพที่แน่นอน ลักษณะของแรงดัน/กระแสในแต่ละกรณีจะเป็นดังรูปที่ 3.8 จุดตัดระหว่างเส้นโหลดของระบบ (system load) กับเส้นคุณลักษณะของตัวชดเชย (compensator characteristic) คือสถานะคงตัว (steady state) เช่น ที่มุมช่วงนำกระแส (conduction angle) 130° จะให้ค่าแรงดันประมาณ 1.0 p.u. แต่กราฟนี้เป็นแค่เพียงส่วนหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมซึ่งจะต้องพิจารณาส่วนอื่น ๆ อีก เช่น การตั้งการควบคุมและพิคคของตัวชดเชย ลักษณะการควบคุมดังรูปที่ 3.8 กำหนดโดยสมการ

$$V = V_K + jX_S I_1 \quad , 0 < I_1 < I_{\max} \quad \dots(3.6)$$

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



รูปที่ 3.8 กราฟลักษณะแรงดัน/กระแสหลักมูลในตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์

3.2.3 ฮาร์โมนิกส์

ถ้าเพิ่มมุมทริกขาเกต (α) จะทำให้มุมช่วงนำกระแส (σ) ลดลงและก่อให้เกิดผลที่สำคัญ

2 ประการ คือ

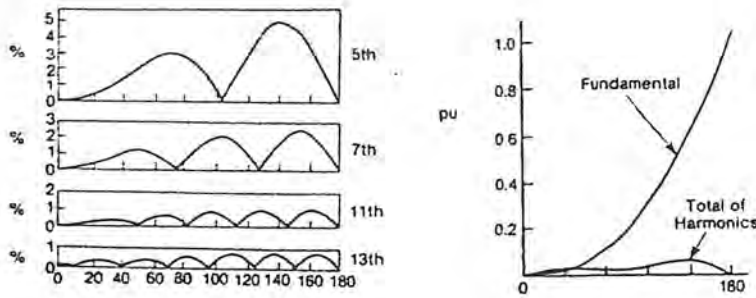
- 1) กำลังงานสูญเสียทั้งในตัวควบคุมไคริสเตอร์และรีแอกเตอร์เพิ่มขึ้น
- 2) คลื่นกระแสมีความเป็นไซน์ (sine) น้อยลง กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์สร้างกระแสที่มีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้น

ถ้ามุมทริกขาเกต (α) ของไคริสเตอร์ทั้งสองตัวเท่ากัน จะเกิดฮาร์โมนิกส์ที่ขึ้น และค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ที่ n ของกระแสจะมีค่าเป็น

$$I_n = \frac{4}{\pi} \frac{V}{X_L} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha \frac{\sin n\alpha}{n} \right] \quad \dots(3.7)$$

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

รูปที่ 3.9ก แสดงขนาด (amplitudes) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามมุมช่วงนำกระแสของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำ ๆ และรูปที่ 3.9ข แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าส่วนประกอบที่ฮาร์โมนิกส์ต่าง ๆ รวมกัน ตารางที่ 3.2 จะแสดงค่าขนาดสูงสุดของฮาร์โมนิกส์ต่าง ๆ จนถึงฮาร์โมนิกส์ที่ 37 (โดยค่าสูงสุดมิได้เกิดที่มุมช่วงนำกระแส (σ) เดียวกัน) สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ฮาร์โมนิกส์ของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์

- (ก) ส่วนประกอบของกระแสฮาร์โมนิกส์หลักของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์ แต่ละรูปแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของส่วนประกอบหลักมูลที่การนำกระแสเต็มๆ โดยค่าเปอร์เซ็นต์นี้จะเท่ากันทั้งในกระแสดสาย (line) และกระแสเฟส
- (ข) ส่วนประกอบรวมของกระแสตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของส่วนประกอบหลักมูลที่การนำกระแสเต็มๆ โดยค่าเปอร์เซ็นต์นี้จะเท่ากันทั้งในกระแสดสายและกระแสเฟส

ตารางที่ 3.2

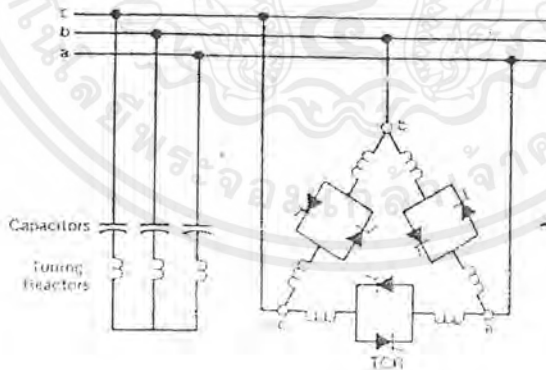
ขนาดสูงสุดของกระแสฮาร์โมนิกส์ในรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์

ลำดับของฮาร์โมนิกส์	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

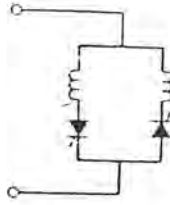
ค่าที่แสดงนี้เป็นเปอร์เซ็นต์ของขนาดองค์ประกอบหลักมูลที่การนำกระแสเต็มที่ค่าเหล่านี้จะปรากฏทั้งในกระแสเฟสและกระแสสาย ในที่นี้สมมติว่าอยู่ในสถานะสมดุล 3 เฟส

ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์สำหรับระบบ 3 เฟส จะจัดเรียงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งเสมือนเป็นตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์ 1 เฟส 3 ตัว ต่อกับแบบเคลต้า ซึ่งถ้าระบบสมดุลฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 จะไหลวนอยู่ในวงปิดเคลต้าและจะขาดหายไปจากกระแสสาย ส่วนฮาร์โมนิกส์ที่เหลือทั้งหมดจะปรากฏที่กระแสสายและ ขนาดของฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวจะมีอัตราส่วนเดียวกับที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 และตารางที่ 3.2 อย่างไรก็ตามรูปคลื่นจะแตกต่างไปจากกระแสเฟสบ้าง ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.6

สิ่งที่สำคัญมากสำหรับตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์คือต้องมั่นใจว่ามุมช่วงนำกระแสของไคริสเตอร์คู่ต่อขนานกลับกันนั้นเท่ากัน ถ้ามุมช่วงนำกระแสไม่เท่ากันจะก่อให้เกิดส่วนฮาร์โมนิกส์ขึ้นในกระแส และทำให้เกิดความร้อนที่ขั้วตรงข้ามของไคริสเตอร์ไม่เท่ากัน ด้วยเหตุนี้มุมช่วงนำกระแส (α) จึงจำกัดแค่ 180° อย่างไรก็ตาม ถ้าแยกรีแอกเตอร์ในรูปที่ 3.5 ออกเป็น 2 ตัวดังรูปที่ 3.11 เราจะสามารถทำให้มุมนำกระแสในแต่ละข้างสูงถึง 360° ได้ นอกจากนี้การจัดเรียงแบบนี้ยังทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์น้อยกว่าในรูปที่ 3.5 แต่การสูญเสีย (power losses) จะสูงขึ้น เนื่องจากกระแสไหลวนระหว่างสองข้าง

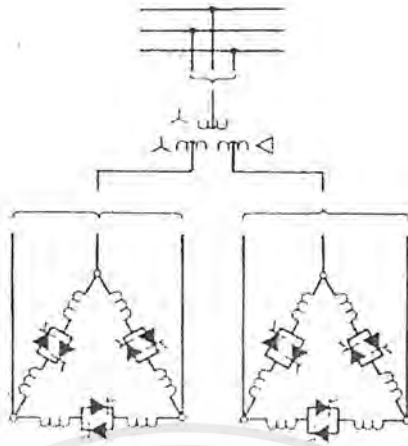


รูปที่ 3.10 ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์ 3 เฟสที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ และมีการแยกรีแอกเตอร์ของแต่ละเฟสออกเป็น 2 ส่วน เพื่อให้ตัวควบคุมแบบใช้ไคริสเตอร์ (thyristor controller) สามารถทำงานได้แม้ว่าจะเกิดฟลัทที่รีแอกเตอร์



รูปที่ 3.11 ตัวชดเชยแบบบริแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์ที่มีมุมช่วงนำกระแสใน แต่ละขามากกว่า 180° เพื่อลดกระแสฮาร์โมนิกส์

บางครั้งกระแสฮาร์โมนิกส์ของตัวชดเชยแบบบริแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์จะถูกกำจัดโดยตัวกรองฮาร์โมนิกส์ (รูปที่ 3.10) กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือในการกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่ 5 และที่ 7 ทำโดยการแยกตัวชดเชยแบบบริแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์ออกเป็น 2 ส่วน โดยป้อนจากด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงลดแรงดัน 2 ชุด ชุดหนึ่งต่อแบบสตาร์และอีกชุดหนึ่งต่อแบบเดลต้า (ดังแสดงในรูปที่ 3.12) ซึ่งจะทำให้เกิดมุมเลื่อนเฟส (phase shift) ระหว่างแรงดันและกระแสของตัวชดเชยแบบบริแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์ทั้งสองเป็น 30° และเสมือนว่าสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่ 5 และที่ 7 ออกจากกระแสสายด้านปฐมภูมิได้ การต่อแบบนี้เรียกว่า “การจัดเรียงแบบ 12-พัลส์” (12-pulse arrangement) เพราะว่ามีการทำงานของไคริสเตอร์ 12 ตัวใน 1 คาบ เทคนิคการคูณเฟส (phase-multiplication) แบบนี้จะใช้ในหม้อแปลงเรียงกระแสตรงแรงดันสูง (HVDC rectifier transformers) เพื่อกำจัดฮาร์โมนิกส์และเกี่ยวข้องกับตัวชดเชยแบบบริแอกเตอร์อิมิตัวหลายเฟส (polyphase saturated reactor compensator) ของตัวชดเชยแบบตัวคูณความถี่ (frequency-multiplier) เนื่องจากมี 12-พัลส์เกิดขึ้น ดังนั้นฮาร์โมนิกส์ที่ต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นคือฮาร์โมนิกส์ที่ 11 และที่ 13 นอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้โดยไม่ต้องมีตัวกรองฮาร์โมนิกส์ที่ 5 และที่ 7 ซึ่งมีผลดีถ้าเรโซแนนซ์ของระบบเกิดขึ้นที่ความถี่ใกล้ความถี่ค่านี้อันนี้ สำหรับฮาร์โมนิกส์ลำดับสูงๆกว่าค่านี้อาจใช้แค่ตัวเก็บประจุธรรมดาที่เพียงพอแล้ว โดยต่อเข้ากับด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงลดแรงดัน หรืออาจจะใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่าน (high-pass filter) ก็ได้ ส่วนเรื่องการก่อกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ภายได้เงื่อนไขไม่สมดุล (unbalanced conditions) จะคล้ายคลึงกับการจัดเรียงแบบ 6-พัลส์ (ดังในรูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.12 การจัดเรียงตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไครสเตอร์เป็นแบบ 12-พัลส์
โดยใช้หม้อแปลงที่มีขดลวดทุติยภูมิ 2 ชุด

ในการใช้ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไครสเตอร์แบบ 6-พัลส์ และ 12-พัลส์ จะต้องพิจารณาว่าต้องการ ตัวกรองฮาร์โมนิกส์หรือไม่ และมีการตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response) เป็นอย่างไร โดยคำนึงถึงความเป็นไปได้ของการเกิดสถานะไม่สมดุล นอกจากนี้ตัวชดเชยจะต้องสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากอิทธิพลของชุดตัวเก็บประจุ (capacitor bank) และแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าข้างเคียง โดยจะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณ และบางครั้งจะต้องครอบคลุมไปถึงส่วนต่อเชื่อมระบบไฟฟ้าใหญ่ๆ ด้วย

นอกจากที่กล่าวมาแล้วการต่อแบบ 12-พัลส์ยังมีข้อดีอีกคือถ้าครั้งอันใดเสียไปอีกอันที่เหลือสามารถทำงานต่อไปได้ตามปกติ แต่มีข้อจำกัดคือระบบควบคุมจะต้องทำให้มุมเลื่อนเฟส (phase shift) ระหว่างชุดรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไครสเตอร์ 2 ชุดเป็น 30° และจะต้องออกแบบให้มั่นใจได้ว่าจะสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นได้ บางครั้งเราอาจออกแบบให้ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไครสเตอร์แบบ 12-พัลส์ ใช้หม้อแปลงแยกกัน 2 ชุดแทนหม้อแปลง 1 ตัวที่มีขดลวดทุติยภูมิ 2 ชุดได้

3.2.4 ตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยไครสเตอร์

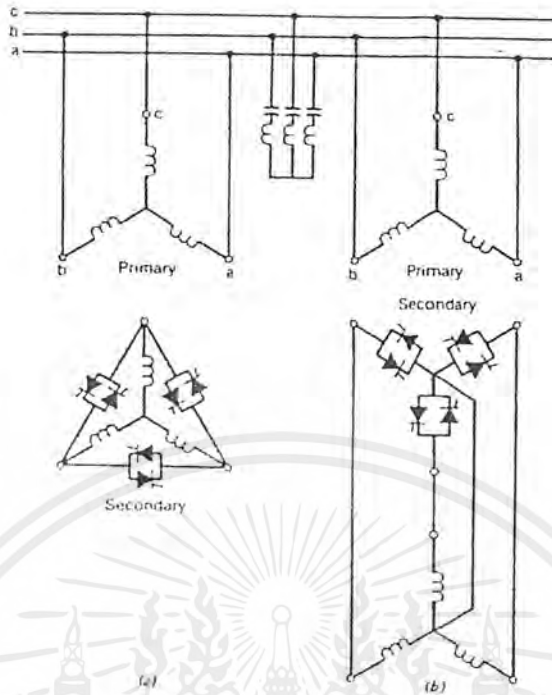
(Thyristor-Controlled Transformer)

ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไครสเตอร์สามารถปรับปรุงเป็นตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยไครสเตอร์ (TCT) ดังรูปที่ 3.13 โดยแทนหม้อแปลงลดแรงดันกันแยกกันและรีแอกเตอร์เชิงเส้นด้วย หม้อแปลงที่ออกแบบให้มี รีแอกเตอร์สูญเสีย (leakage reactance) สูงๆ โดยการใช้แกนที่มีช่องอากาศ (gapped core) และขดลวดทุติยภูมิจะถูกตัดวงจรผ่านไครสเตอร์ควบคุม และหม้อแปลงนี้จะเป็นแบบที่ใช้หม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัว มาต่อเป็นหม้อแปลง 3 เฟส ด้วยการต่อเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งแรงดันสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

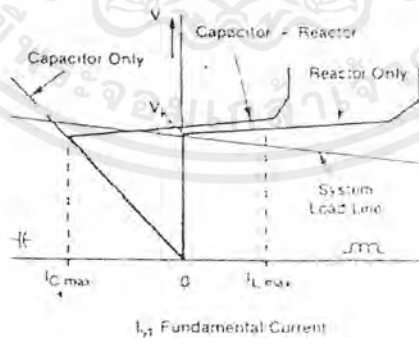
ตามรูปที่ 3.13 จะไม่มีบัสทุติยภูมิ (secondary bus) และ ตัวเก็บประจุขนานจะต้องต่อกับแรงดันปฐมภูมิ เว้นแต่จะหาหม้อแปลงลดแรงดันแยกกันมาใช้ ค่ารีแอคแตนซ์สูญเสียสูงๆนี้จะช่วยป้องกันหม้อแปลงจากการลัดวงจรขณะเกิดฟอลต์ทางด้านทุติยภูมิ เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจำนวนมากและความเป็นเชิงเส้นของตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยโรริสเตอร์ทำให้มันสามารถทนต่อระบบที่รับ (ดึง) กำลังไฟฟ้รีแอคทีฟเกินพิกัดของมัน (โหลดที่มีมุมตามเกินที่มันจะแก้ได้) ได้

3.2.5 ตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์ที่มีตัวเก็บประจุต่อขนาน (Shunt Capacitors)

สิ่งสำคัญที่ต้องทราบคือกระแสของตัวชดเชย (กระแส compensate) สามารถปรับค่าได้อย่างต่อเนื่อง (linear, ไม่เป็นขั้นๆ) จากศูนย์จนถึงค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อนำกระแสเต็มคลื่น (full conduction) และกระแสนี้จะล่าหลัง (lagging) อยู่เสมอ เนื่องจากรับกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟ อย่างไรก็ตามตัวชดเชยแบบรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์สามารถชดเชยโดยตัวเก็บประจุต่อขนาน ดังนั้นตัวประกอบกำลังรวมจึงเป็นมูมนำและจะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟให้กับระบบภายนอก ถ้าเพิ่มกระแสตัวเก็บประจุเข้าไปในกระแสของตัวชดเชยดังรูปที่ 3.8 จะทำให้กราฟลักษณะการควบคุม (control characteristic) เข้าไปสู่ควอร์รันต์ที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ในระบบ 3 เฟสส่วนใหญ่มักจะต่อตัวเก็บประจุแบบวาย (ดังรูปที่ 3.10) กระแสในรูปที่ 3.14 จะเป็นส่วนประกอบลำดับเฟสบวกหลักมูล (fundamental positive sequence component) และถ้ามันอยู่ในช่วงระหว่างกระแสตัวเก็บประจุสูงสุด (I_{Cmax}) กับกระแสตัวเหนี่ยวนำสูงสุด (I_{Lmax}) ลักษณะการควบคุมจะเป็นไปตามสมการที่ (3.8) อย่างไรก็ตามถ้าอัตราขยายของโวลท์เตจเรกูเรเตอร์ (voltage regulator gain) ไม่เปลี่ยนแปลง ความชันของรีแอคแตนซ์ X_r จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.13 การเรียงสลับกันของตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยไทรสเตอร์
 (ก) รีแอคเตอร์ที่ต่อกันแบบวายและไทรสเตอร์ควบคุม (thyristor controller) ที่ต่อแบบเคลด้า
 (ข) รีแอคเตอร์และไทรสเตอร์ควบคุมที่ต่อกันแบบวาย (ใช้ในระบบ 3 เฟส 4 สาย)



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของตัวชดเชย

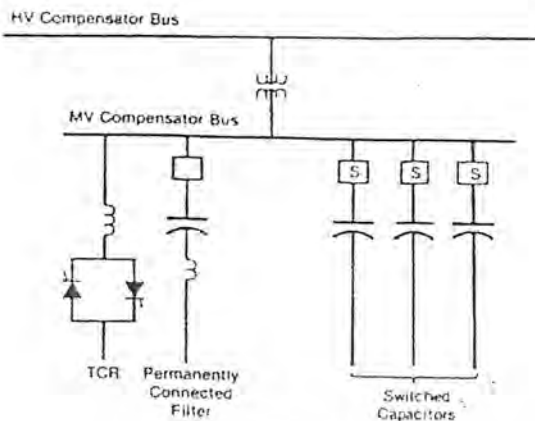
โดยทั่วไปกลุ่มตัวเก็บประจุขนาน (shunt capacitor banks) มักจะแบ่งตัวเก็บประจุออกเป็นกลุ่ม 3 เฟสมากกว่า 1 กลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มจะแบ่งแยกกันโดยใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดต่อวงจร กลุ่มตัวเก็บประจุสามารถปรับค่าความถี่โดยต่อรีแอคเตอร์เล็กๆอนุกรมเข้าในแต่ละเฟสซึ่งจะช่วยกรองกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากตัวชดเชยและป้องกันฮาร์มอนิกจากระบบอื่น ทางเลือกที่เป็นไปได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางหนึ่งคือให้มีกลุ่มที่ปรับความถี่ให้เป็นความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 และที่ 7 และจัดให้กลุ่มอื่นเป็นตัวกรองความถี่สูงผ่าน (high-pass filter) แต่การต่อตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองฮาร์โมนิกส์นั้นจะต้องพิจารณาถึงการเกิดเรโซแนนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่จุดต่อด้วย

การใช้งานตัวชดเชยจำเป็นต้องขยายการทำงานทั้งในช่วงมุดตาม (lagging) และมุดนำ (leading) ชูตรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์ที่ต่อเข้ากับตัวเก็บประจุไม่มีทางที่จะมีกระแสล้าหลัง (lagging current) นอกเสียจากกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์จะมีค่าเกินพิกัดของตัวเก็บประจุ พิกัดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ตัวชดเชยสามารถจ่ายได้จะเท่ากับผลต่างระหว่างพิกัดของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์กับตัวเก็บประจุ ในกรณีที่พิกัดความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์มากเกินไป (เช่น การนำไปใช้งานในระบบสายส่งที่ต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟหลายร้อย MVAR) ทำให้กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟรวมเป็นมุดตาม (lagging) และกระแสรีแอกทีฟปริมาณมากไหลวนอยู่ระหว่างชูตรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์กับตัวเก็บประจุ โดยไม่ได้ใช้ประโยชน์ใดๆเลยในระบบไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ตัวเก็บประจุจะถูกแบ่งเป็นกลุ่มย่อย เพื่อที่จะสามารถ ปรับองศา (degree) ของการไบแอสความจุ (capacitive bias) ในกราฟคุณลักษณะแรงดัน/กระแสได้ ซึ่งถ้าทำแล้วเราสามารถให้ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์ที่มีขนาดเล็กลงได้ แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.15 ซึ่งมีการแบ่งตัวเก็บประจุต่อขนาน (shunt capacitor) ออกเป็น 3 กลุ่ม และจะต้องมีตัวควบคุมตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโคริสเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมตามจำนวนของตัวเก็บประจุที่มาต่อ โดยต้องออกแบบให้ครอบคลุมกราฟคุณลักษณะของแรงดัน/กระแสทั้งหมดอย่างต่อเนื่อง เมื่อกลุ่มตัวเก็บประจุถูกตัดต่อ มุมช่วงนำกระแสก็จะถูกปรับพร้อมด้วยสัญญาณอ้างอิงอื่น ดังนั้นเมื่อกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นหรือลดลง ก็จะถูกทำให้สมดุลโดยการเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบเหนี่ยวนำของตัวชดเชยในปริมาณเดียวกัน ภายหลังจากนั้นมุมช่วงนำกระแสก็จะถูกปรับอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของระบบ จนกว่าจะมีการสับสวิตช์ตัวเก็บประจุอีก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

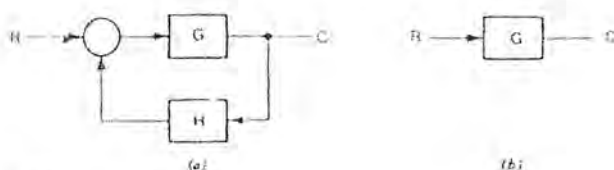


รูปที่ 3.15 ตัวชดเชยแบบไฮบริดที่มีการสวิตช์ตัวต่อตัวเก็บประจุและปรับรีแอกเตอร์ด้วย ทริสเตอร์ สวิตช์ s อาจเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบกลไกหรือเป็นทริสเตอร์

ปัญหาที่ 3.15 ถ้าเกิดกับตัวชดเชยที่ใช้ทริสเตอร์ควบคุม (thyristor controllers) การสวิตช์ตัวเก็บประจุแทนเซอร์กิตเบรกเกอร์จะไม่ส่งผลกระทบมากนัก เนื่องจากทริสเตอร์สามารถสวิตช์ตัดต่อได้อย่างไม่จำกัดและสามารถสวิตช์ได้ด้วยเวลาที่แน่นอน จึงช่วยลดความรุนแรงในการสวิตช์เมื่อเกิดปัญหานี้ขึ้น ส่วนมากจำนวนกลุ่มของตัวเก็บประจุที่ตัดต่อได้ (switched capacitor) ในระบบสายส่งมักจะไม่เกิน 4 กลุ่ม

3.2.6 การควบคุม

จุดประสงค์ขั้นต้นของตัวชดเชย คือ ลักษณะของแรงดัน/กระแสของมัน ลักษณะและชนิดของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยทริสเตอร์ถูกแสดงในรูปที่ 3.8 สักดาและกระแสของตัวชดเชยถูกหาได้โดยรีแอกเตอร์และมุมเหนี่ยวนำ (σ) ซึ่งแต่ละจุดของการเน้นจะแสดงรายละเอียดของค่าความนำจินตภาพ (B_c) ตามสมการที่ (3.6) และ (3.7) มันจะถูกแสดง(ในบทที่ 2) ว่าตัวชดเชยจะปฏิบัติในส่วนของแรงดันต่อกระแสหลักมูล (V/I_c) และระบบสายภาระ (System Load Line) การควบคุมแบบอัตโนมัติจะปรับรายละเอียดซึ่งเป็นตามเงื่อนไขที่พอใจ



รูปที่ 3.16 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุม

(ก) การควบคุมแบบวงปิด, $C=RG/(I+GH)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (ข) การควบคุมแบบวงเปิด, $C=RG$ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย H = ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันป้อนกลับ

G = ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเดินหน้า

R = ตัวอ้างอิง

C = ตัวแปรที่ถูกควบคุม

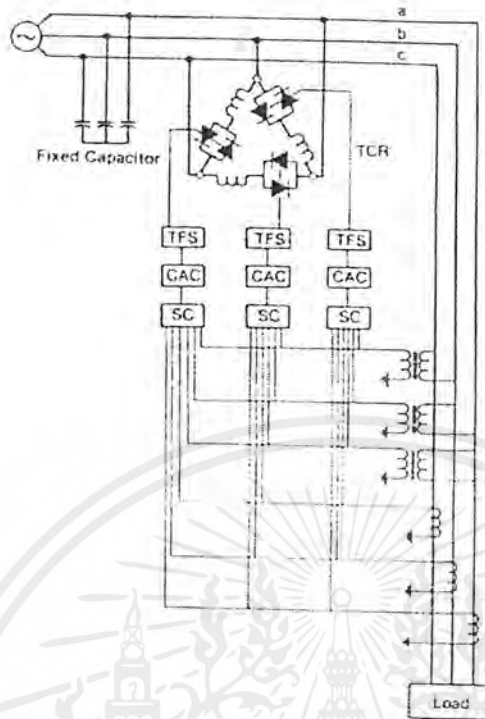
การควบคุมนั้นแบ่งเป็นพื้นฐานได้ 2 ชนิด ซึ่งจะใช้การควบคุมแบบวงปิด (closed-loop) หรือแบบวงเปิด (open-loop) ในการควบคุม โดยที่การควบคุมแบบวงปิดจะเป็นแบบป้อนกลับดังรูปที่ 3.16ก ส่วนการควบคุมแบบวงเปิดเป็นแบบที่ไม่มีการป้อนกลับดังรูปที่ 3.16ข ซึ่งทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการป้อนไปข้างหน้าคือ G ซึ่งจะถูกโปรแกรมไว้ล่วงหน้าให้ผลออกมาเป็นค่าของ C เมื่อป้อนค่า R เข้าไป และไม่มีผลการนำผลของค่า C มาเปรียบเทียบและตรวจสอบโดยเงื่อนไขการคำนวณจะรวมอยู่ในฟังก์ชัน G แต่ถ้าเกิดเหตุการณ์ในการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้ล่วงหน้าของระบบ C ที่ได้จะไม่เป็นตามแผนที่วางไว้ การพัฒนาระบบการควบคุมแบบวงปิดจะให้ผลที่ถูกต้องกว่า แต่ระบบการควบคุมแบบวงเปิดจะมีข้อดีตรงได้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว

การควบคุมแบบวงเปิด

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

$$B_Y = B_L(\sigma) - B_C \quad \dots (3.8)$$

เมื่อ $B_L(\sigma)$ คือค่าที่ได้จากสมการ (3.5) และรูปที่ (3.7) ในผลการแก้สมการหาค่าของ σ ในสมการที่ (3.5) จะไม่เป็นเชิงเส้น จะมี 1 วิธี คือ สร้างวงจรโดยมีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $K_2 \pi / (\sigma - \sin \sigma)$ เมื่อใส่ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันนี้ลงไปในตัวชดเชย สมการที่ (3.5) ซึ่งผลออกมาความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการสัญญาณที่มีความรู้สึกไวกับการชดเชยที่ถูกต้องต่อความรู้สึกไวเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.17 การควบคุมตัวชดเชยแบบวงเปิด

TFS = ระบบป้อนมุมทริกไทรสเตอร์ (Thyristor Firing (gating) System)

CAC = การคำนวณมุมนำกระแส (Conduction Angle Calculator)

SC = การคำนวณค่าความนำจินตภาพ (Susceptance Calculator)

การควบคุมแบบวงเปิดสำหรับการชดเชยภาระ ซึ่งต้องการผลตอบแทนของตัวชดเชยที่รวดเร็ว โดยใส่ค่าของความนำเชิงซ้อน (admittance) ลงในคอมพิวเตอร์ โดยได้รายละเอียดจากศักดาและกระแสของภาระ ซึ่งโวลต์เตจเร็กกูเลตติ้ง (voltage-regulating) ในฟังก์ชันในการควบคุมนี้จะไม่แน่นอน

3.2.7 ลักษณะอื่นๆของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์

ความเร็วในการตอบสนอง

ในหัวข้อ 3.2.1 แสดงถึงมุมของการเหนี่ยวนำในเฟสใดๆของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์สามารถที่จะเปลี่ยนได้โดยระหว่างครึ่งรอบของความถี่ที่ป้อนเข้าไปซึ่งกำหนดว่ามุมช่วงนำกระแส (σ) จะเหลือน้อยกว่า 180° สุดทำผลตอบแทนที่รวดเร็วจะถูกต้องการประยุกต์ระบบแรงดันสูง เมื่อเสถียรภาพและความถูกต้องของระบบควบคุมมีความสำคัญมากกว่า ดังนั้นเวลาในการตอบสนองของตัวชดเชยซึ่งใส่ตัวเก็บประจุสามารถจะเป็น 2รอบเล็กกว่าความถี่กำลัง สำหรับ การจ่ายศักดาสูงสุดในการอาร์คเตาเผา จะใช้ผลตอบแทนที่รวดเร็วเป็นสิ่งสำคัญ และผลตอบแทนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางธรรมชาติของตัวชดเชยทั้งแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์ และ แบบโรริสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ

การควบคุมเฟสที่เป็นอิสระ

มันเป็นลักษณะประจำตัวของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์ที่สำคัญซึ่งสามารถถูกควบคุม 3 เฟส ที่อิสระต่อกันและตัวชดเชยสามารถทำให้เฟสสมดุลได้ดังในบทที่ 2 ความถูกต้องของเฟสสมดุลจะไม่ดีทีเดียว ตัวเก็บประจุนาน ซึ่งใช้ซุรีแอกเตอร์จะไม่จำกัดความสามารถในการสมดุลเฟส ในโครงข่ายชดเชยอาจมีความต้องการทั่วไปทั้งการเหนี่ยวนำและการเก็บประจุ นอกจากนี้ความนำเชิงซ้อนในแต่ละเฟสและความไม่สมดุลของซุรีแอกเตอร์อาจจะก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่มากกว่าภายในเงื่อนไขที่สมดุล การเพิ่มตัวกรองฮาร์โมนิกส์ (Filter) เป็นสิ่งที่จำเป็นโดยฮาร์โมนิกส์จะปรากฏในกระแสสาย (line)

ผลตอบสนองของศักดาเกินและศักดาต่ำ

สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งของตัวชดเชยแบบสถิต (Static Compensator) คือการแสดงพฤติกรรมภายใต้เงื่อนไขของศักดาที่สูงเกินไปและต่ำเกินไป การอ้างอิงสถานะคงตัวแรงดันต่อกระแสหลักมูล (V/I_1) ในรูปที่ 3.8 ถ้าศักดาของระบบเพิ่มขึ้น มุมเหนี่ยวนำจะขึ้นสู่ค่าสูงสุดตามกันการควบคุมจะถูกจำกัดและกระแสหลักมูลจะสัมพันธ์กับซุรีแอกเตอร์ ซึ่งปกติพฤติกรรมของรีแอกเตอร์เป็นเชิงเส้น รีแอกแตนซ์ของซุรีแอกเตอร์จะมากขึ้นไปที่จะจำกัดเพิ่มศักดาของระบบภายใต้เงื่อนไขสำคัญสุดท้ายนี้และมีความจำเป็นในการที่จะเริ่มลดเหนี่ยวนำเพื่อป้องกันโรริสเตอร์จากความร้อนที่รอยต่อ (junction) ซึ่งสาเหตุมาจากกระแสที่สูงเข้ามาเกี่ยวข้อง

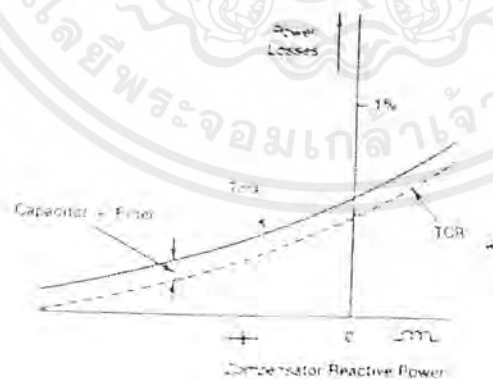
การควบคุมโรริสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีผลจากอุณหภูมิ วงจรไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะทำให้เกิดอุณหภูมิที่รอยต่อที่สูงซึ่งเกิดจากศักดาที่สูง การกำจัดกระแสของการควบคุมถูกแสดงในรูปที่ 3.8 หม้อแปลงแปลงลงจะเริ่มอิ่มตัวและกระแสสร้างแม่เหล็ก (magnetizing) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ศักดาสูงๆ แต่มันจะมีตำแหน่งซึ่งเป็นผลในการช่วยยึดศักดาให้ลดลงเหมือนกับการประยุกต์ในตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยโรริสเตอร์ ศักดาในการอิ่มตัวของหม้อแปลงจะไม่ถูกตั้งให้ต่ำเกินไป มันจะมีปัญหาเกี่ยวกับแกนเหล็กเกิดขึ้น ในระดับแรงดันที่สูงการวัดและการป้องกันในการที่จะใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์และอุปกรณ์ป้องกันเสร็จในการเกิดโหลดเกินในช่วงการควบคุมปกติของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์จะเป็นไปได้

เมื่อศักดาของระบบตกลงในช่วงของการควบคุมของตัวชดเชย มันมีพฤติกรรมเหมือนกับการใส่ตัวเก็บประจุ โรริสเตอร์จะปิดมุมเฟส (phased off) ถ้าตัวเก็บประจุแบบขนานขาดไปหรือปิดสวิตช์ ตัวชดเชยแบบหม้อแปลงควบคุมด้วยโรริสเตอร์จะไม่มีผล มันเป็นพฤติกรรมซึ่งศักดาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดเห็นใจหรือยืนยันการดำเนินการใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

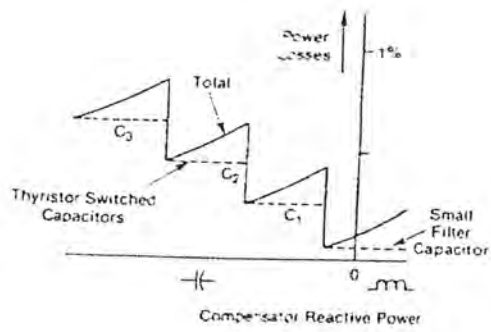
สามารถกลับคืนหลังจากเคลียร์ฟอลท์ (clear fault) ไปสู่ค่าเริ่มต้น และในกรณีของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์จะเป็นตำแหน่งในการจำกัดค่าเกิน มันจะถูกติดตั้งเพื่อใช้ชดเชยทั้งมูมนำและมูมตาม และแก้ปัญหาการแกว่งของกำลัง (damping power swings) และตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์จะถูกควบคุมโดยการป้อนกลับสัญญาณ

กำลังสูญเสีย

การสูญเสียกำลังโดยตัวชดเชยเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา เพราะว่าพลังงานมีราคาสูงค่าหลักของการสูญเสียสามารถถูกเปรียบเทียบกับราคาเมื่อมีตัวชดเชย ตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์ซึ่งต่อขนานกับตัวเก็บประจุจะมีความสูญเสียเพิ่มขึ้นกับการเหนี่ยวนำในตัวชดเชย ซึ่งแสดงใน รูปที่ 3.18 เหมือนเป็นเปอร์เซ็นต์ของอัตรากำลังไฟฟารีแอกทีฟ แบบตัวเก็บประจุ่มันรวมไปถึงความสูญเสียกับความต้านทานในรีแอกเตอร์ การเหนี่ยวนำสวิตซ์ และความสูญเสียอื่นในระบบควบคุมโรริสเตอร์ (หม้อแปลงและความสูญเสียในอุปกรณ์เสริมไม่ถูกนำมารวมใน รูปที่ 3.18 ความสูญเสียจะลดลงเมื่อเป็นกำลังรีแอกทีฟนำหน้า และความสูญเสียจะเพิ่มขึ้นเมื่อเป็นกำลังรีแอกทีฟตามหลังแนวทางซึ่งตรงกันข้ามถูกทำได้โดยตัวชดเชยไฮบริด เมื่อตัวเก็บประจุเป็นกลุ่มของสวิตซ์และขนาดเล็กกว่าชดเชยรีแอกเตอร์ ความสูญเสียสำหรับชนิดของตัวชดเชยเป็นไปตาม รูปที่ 3.19 ตัวอย่างคือ ตัวเก็บประจุที่ใช้ตัวเก็บประจุตัดต่อซึ่งตัวเก็บประจุใช้สวิตซ์ทางกล ลักษณะเหมือนแบบตัวอย่างทั่วไป แต่ความสูญเสียในตัวเก็บประจุ (leading) จะลดลงมาก



รูปที่ 3.18 ลักษณะกราฟของกำลังงานสูญเสียของตัวชดเชยแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยโรริสเตอร์ซึ่งมีตัวเก็บประจุต่อขนานและมีตัวกรองฮาร์โมนิกส์

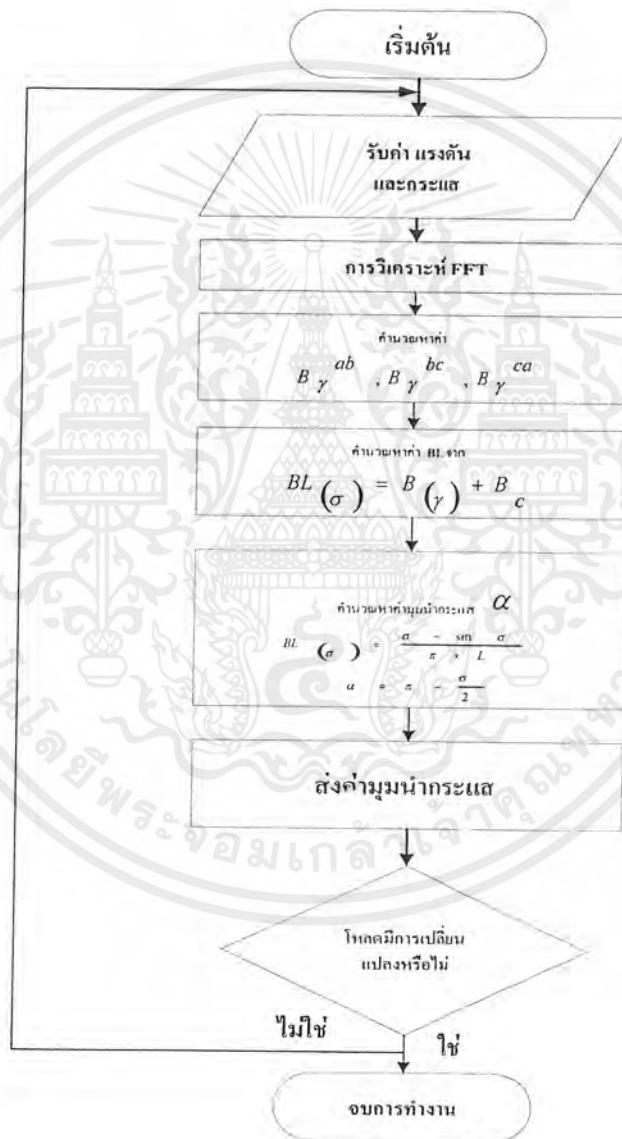


รูปที่ 3.19 ลักษณะกราฟของกำลังงานสูญเสียของตัวชดเชยแบบ ทริสเตอร์ตัดต่อตัวเก็บประจุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลของคาปาซิเตอร์ที่ต่อไว้ถาวร (Fixed Capacitor) จะถูกปรับลดโดยผลของอินดักเตอร์ ตามที่ระบบต้องการ การชดเชย
5. ตัวกรองฮาร์โมนิกส์ ที่ต่อไว้กับระบบ มีหน้าที่ในการกรองฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบ โดยเฉพาะฮาร์โมนิกส์ที่ 3,5,7



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วงจรวัดกระแสและแรงดันจากสายส่ง

ในการทำงานของระบบจะต้องทราบรูปคลื่นของแรงดัน และกระแสในสายส่งที่ป้อนให้กับภาระ เพื่อเป็นข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลหาขนาดมมทริกโคริสเตอร์ ที่ใช้ควบคุมปริมาณการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การออกแบบวงจรส่วนนี้แบ่งการทำงานออกเป็นสองส่วนคือ

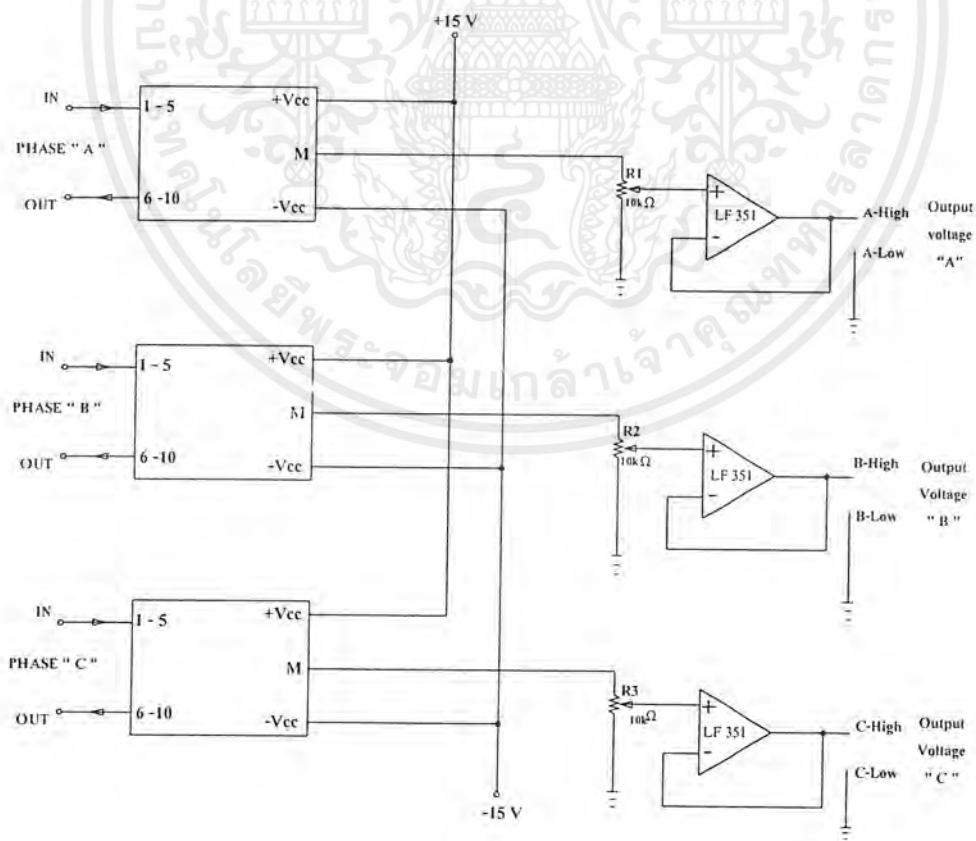
1. วงจรวัดแรงดัน
2. วงจรวัดกระแส

4.2.1 วงจรวัดกระแส

การวัดกระแสใช้ตัวตรวจจับกระแส (LEM) โดยเลือกอัตราการแปลงที่ 1000/1 สัญญาณกระแสที่ได้เป็นกระแสในช่วง 0-25 mA จึงแปลงกระแสนี้เป็นแรงดัน

$$Output = (I_m R_m) \quad (4.1)$$

$$Output = \left(\frac{I_{in}}{1000} R_m \right) \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.2 วงจรวัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

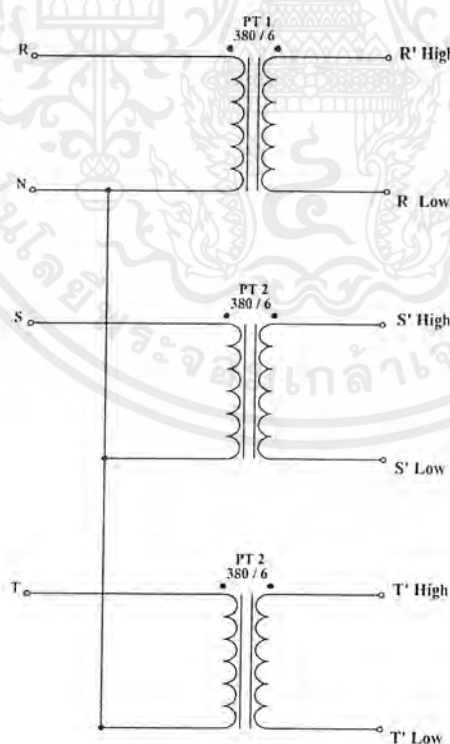
4.2.2 วงจรวัดแรงดัน

การวัดแรงดันใช้หม้อแปลงต่อแบบเดลต้า-สตาร์ เพื่อวัดแรงดันจากสายส่งทั้งแบบ 3 เฟส-3 สาย และ 3 เฟส - 4 สาย และให้แรงดันที่ได้มีระดับอ้างอิงที่นิพทอลเทียบกับกราวด์ของระบบไฟ ตรงกับของวงจรควบคุมระบบ แรงดันที่วัดเป็นแรงดันต่อเฟส สัญญาณที่วัดได้จึงมีเฟสตรงกัน

$$V_{R'} = \frac{|V_R|}{Ratio} \angle 0^\circ \quad (4.3)$$

$$V_{S'} = \frac{|V_S|}{Ratio} \angle -120^\circ \quad (4.4)$$

$$V_{T'} = \frac{|V_T|}{Ratio} \angle -240^\circ \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.3 วงจรวัดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 วงจรทริกโคริสเตอร์

หลังจากการประมวลผลข้อมูลของคอมพิวเตอร์เรียบร้อยแล้ว ขนาดของมุมทริกจะถูกส่งออกทางเอาต์พุทของการ์ด PCL-818 เป็นเลขฐานสองขนาด 10 บิต โดยบิต D0...D7 เป็นข้อมูลขนาดของมุมทริกซึ่งมีช่วง 0 องศาถึง 180 องศา ดังนั้นจะมีความละเอียด 0.705 องศาต่อบิตใช้เลือกของชุดโคริสเตอร์ที่ต้องการควบคุม

โครงสร้างวงจรแบ่งเป็น 2 ส่วน

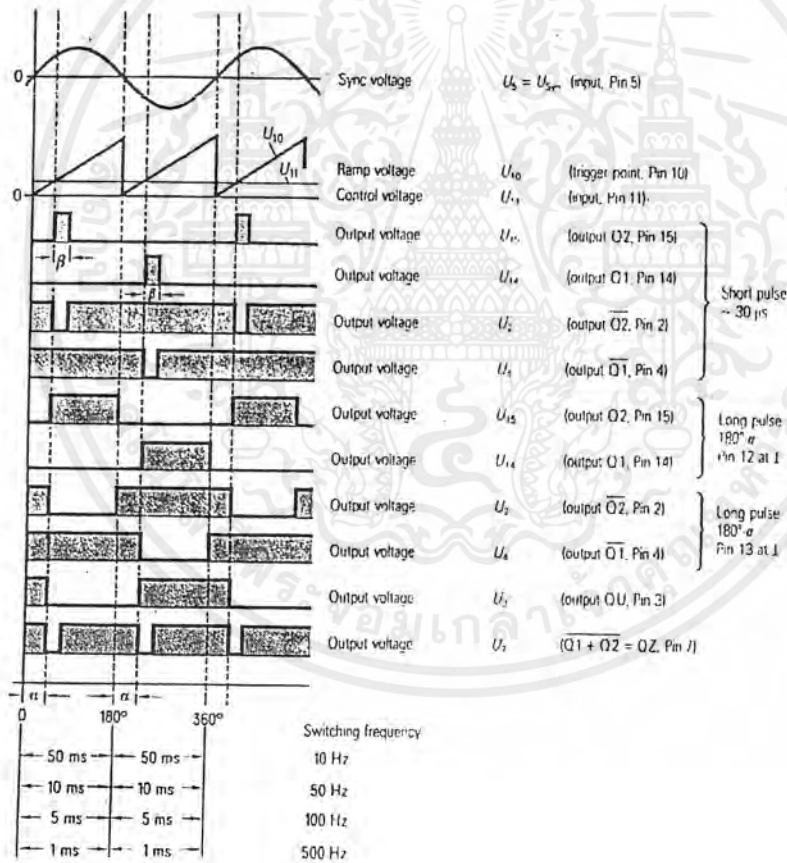
1. วงจรมองแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นอนาลอก เพื่อการแปลงข้อมูลขนาดมุมทริกเป็นแรงดันอ้างอิง การทำงานของวงจรส่วนนี้จะต้องสามารถเลือกเฟสการควบคุมได้ตามต้องการ สามารถแปลงข้อมูลดิจิทัล 8 บิตเป็นแรงดันอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว รักษาข้อมูลระดับแรงดันอ้างอิงของแต่ละเฟสได้ขณะที่มีการส่งงานควบคุมการทำงานที่เฟสอื่น และข้อสำคัญการทำงานจะต้องมีความต่อเนื่องจากข้อมูลเป็นขนาดมุมทริกที่ใช้ควบคุมปริมาณพลังงาน



การทำงานของวงจร

ขนาดของมูมทริก (D0...D7) จะถูกส่งเข้า 8-bit latched (74373) กำหนด เฟสที่จะรักษา (latch) ข้อมูล โดย D9,D8 ข้อมูลมูมทริกของแต่ละเฟสจะถูกส่งเข้า DAC800 เพื่อแปลงเป็นสัญญาณอนาลอกกระแสเอาท์พุทจาก (DAC800) จะถูกส่งเข้าวงจรขยาย (UA 741) เพื่อสร้างแรงดันอ้างอิง (0~10V) ที่มีค่าคงที่

2. วงจรควบคุมเฟส หลักการคือทำงานสร้างสัญญาณลาดเอียง (Ramp) ที่มีความถี่และเฟสตรงกับไฟฟ้ากระแสสลับที่จะใช้ ทรานซิสเตอร์ควบคุม แล้วใช้แรงดันอ้างอิง (แปรผันตรงกับมูม ทริก) มาทำการเปรียบเทียบจะได้คลื่นพัลส์สำหรับการทริก ทรานซิสเตอร์ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณของ TCA 785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

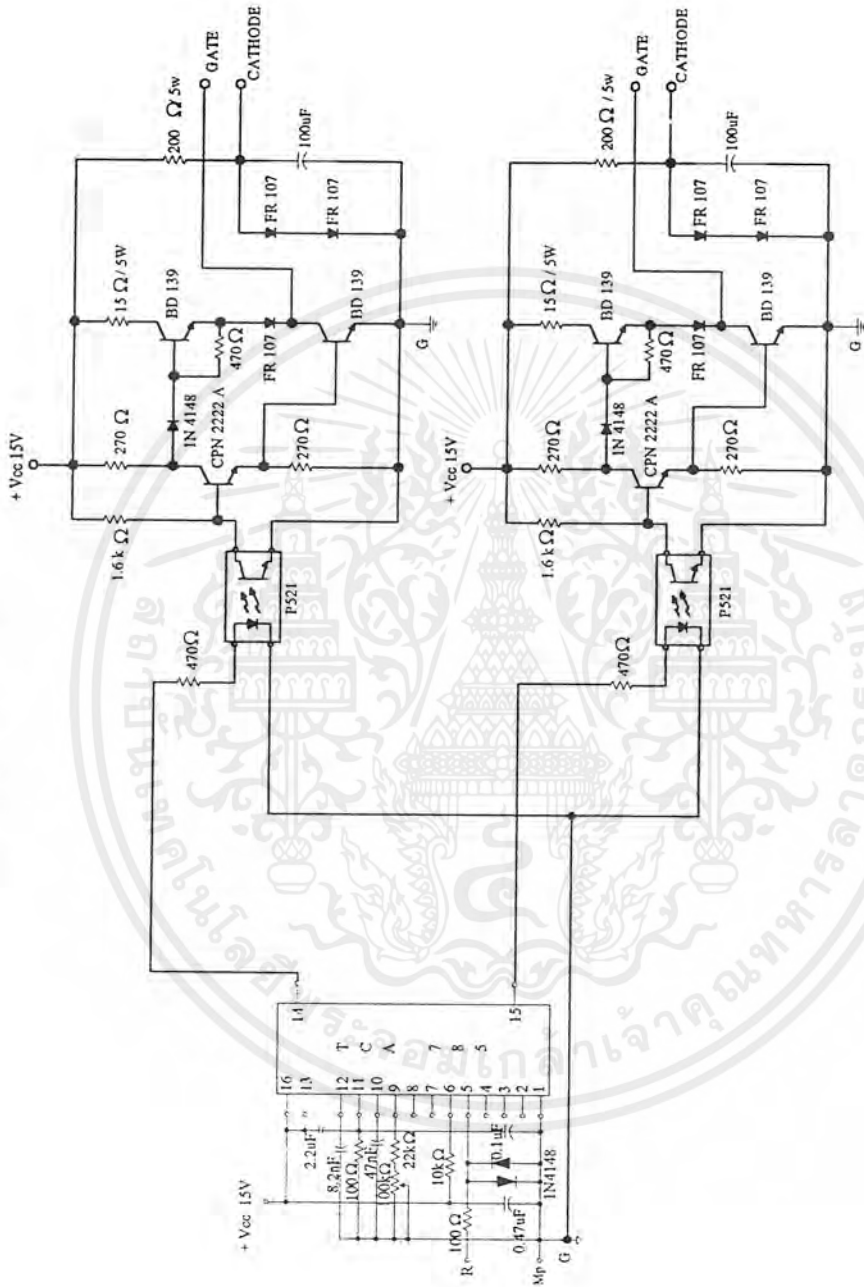
ระดับแรงดันอ้างอิงที่ใช้มีค่า 0~10V คือสามารถที่จะปรับมุมทริก 18 องศาต่อแรงดัน 1V โดยแรงดันอ้างอิงจะได้จากวงจรแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอกของข้อมูลขนาดมุมทริกที่ส่งมาจากการ์ด การออกแบบวงจรส่วนนี้เลือกใช้ IC TCA 785 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวงจรควบคุมเฟส ด้วยแรงดันโครงสร้างภายในของ TCA 785 จะประกอบด้วย

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

การใช้งานจะใช้หม้อแปลงแปลงแรงดันระหว่างสายแล้วป้อนเข้าส่วนตัวตรวจจับศูนย์ (ขา 5) เพื่อทำการสร้างคลื่นรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณลาดเอียงตามลำดับแรงดันอ้างอิงที่ใช้กำหนดมุมทริกได้จากวงจรแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอก โดยป้อนเข้าที่ขา 11 (แรงดันควบคุม) เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณลาดเอียงผ่านตัวเปรียบเทียบ (Comparator) และวงจรตรรก (Logic) จะได้สัญญาณทริก A1 สำหรับสัญญาณซีกกลับ และ A2 สำหรับสัญญาณซีกบวก (จ่ายกระแสได้สูงสุด 55 mA จาก Emitter follower)

ซึ่งจากสัญญาณทริกที่ขา 14 และ 15 นั้นได้กระแสสัญญาณทริกต่ำเกินไป จึงใช้ทรานซิสเตอร์ช่วยจ่ายกระแส และได้มีการแยกกราวด์ระหว่างระบบควบคุมเฟสกับระบบกำลังโดยใช้ Opto-Isolate(P521)

วงจรการควบคุมเฟส



รูปที่ 4.6 รูปแสดงวงจรการควบคุมเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุม

1. รับค่าสัญญาณแรงดันเฟส (V_a, V_b, V_c) และสัญญาณกระแสสาย (I_a, I_b, I_c) จากช่องสัญญาณอนาล็อก / ดิจิตอล
2. ทำการ สุ่มสัญญาณ (Sampling) สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง แล้วทำการวิเคราะห์ฟูรีเยร์ เพื่อหาขนาดและมุมเฟสของสัญญาณ
3. คำนวณหาค่าความนำจินตภาพที่ต้องการชดเชย $B_r^{ab}, B_r^{bc}, B_r^{ca}$ จากสูตร
4. คำนวณหาค่าความนำจินตภาพของอินคักแตนซ์ในแต่ละเฟส จากสูตร

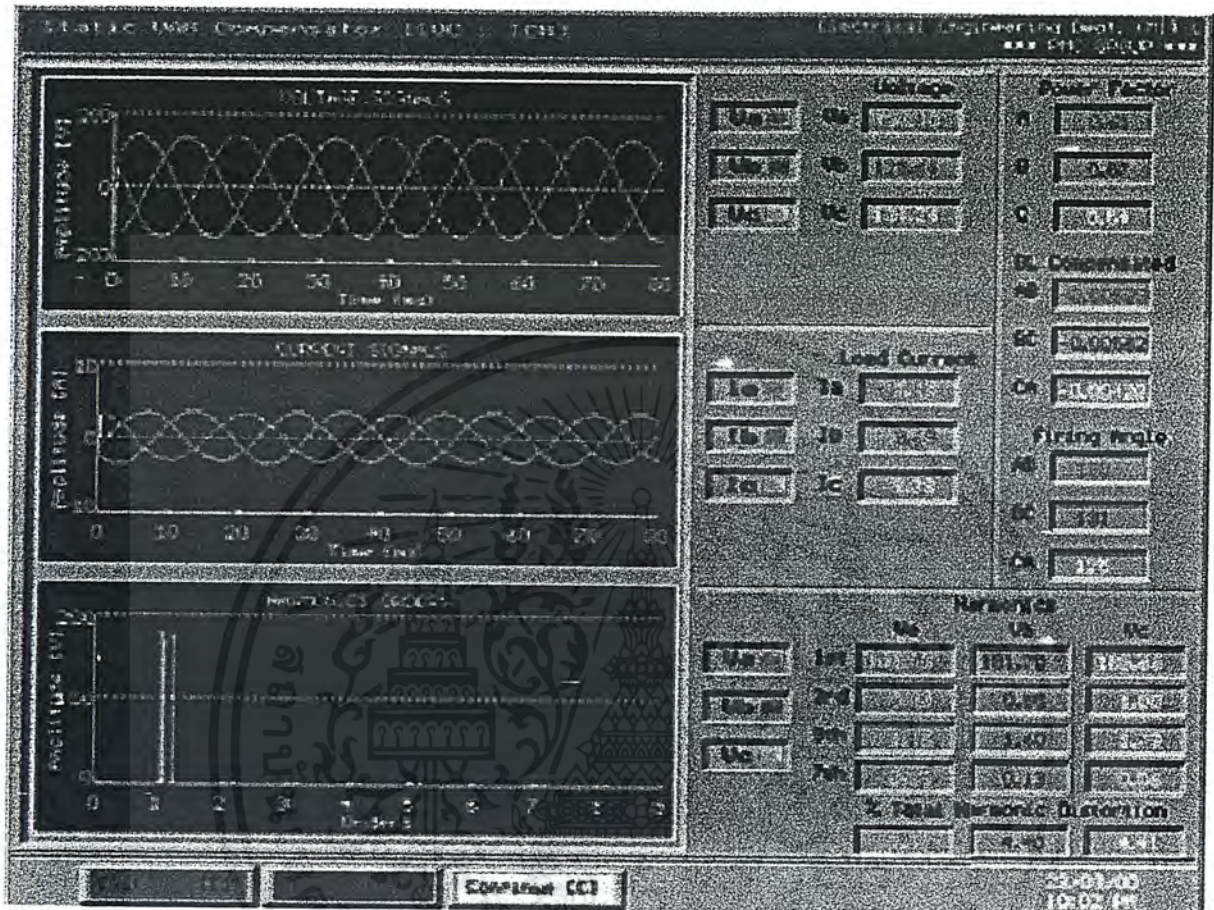
$$B_L(\sigma) = B_r + B_c$$

5. คำนวณหาช่วงนำกระแสของไทรริสเตอร์ และมุมนำกระแสของไทรริสเตอร์ ตามลำดับจากสูตร

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

$$\alpha = 180 - (\sigma/2)$$

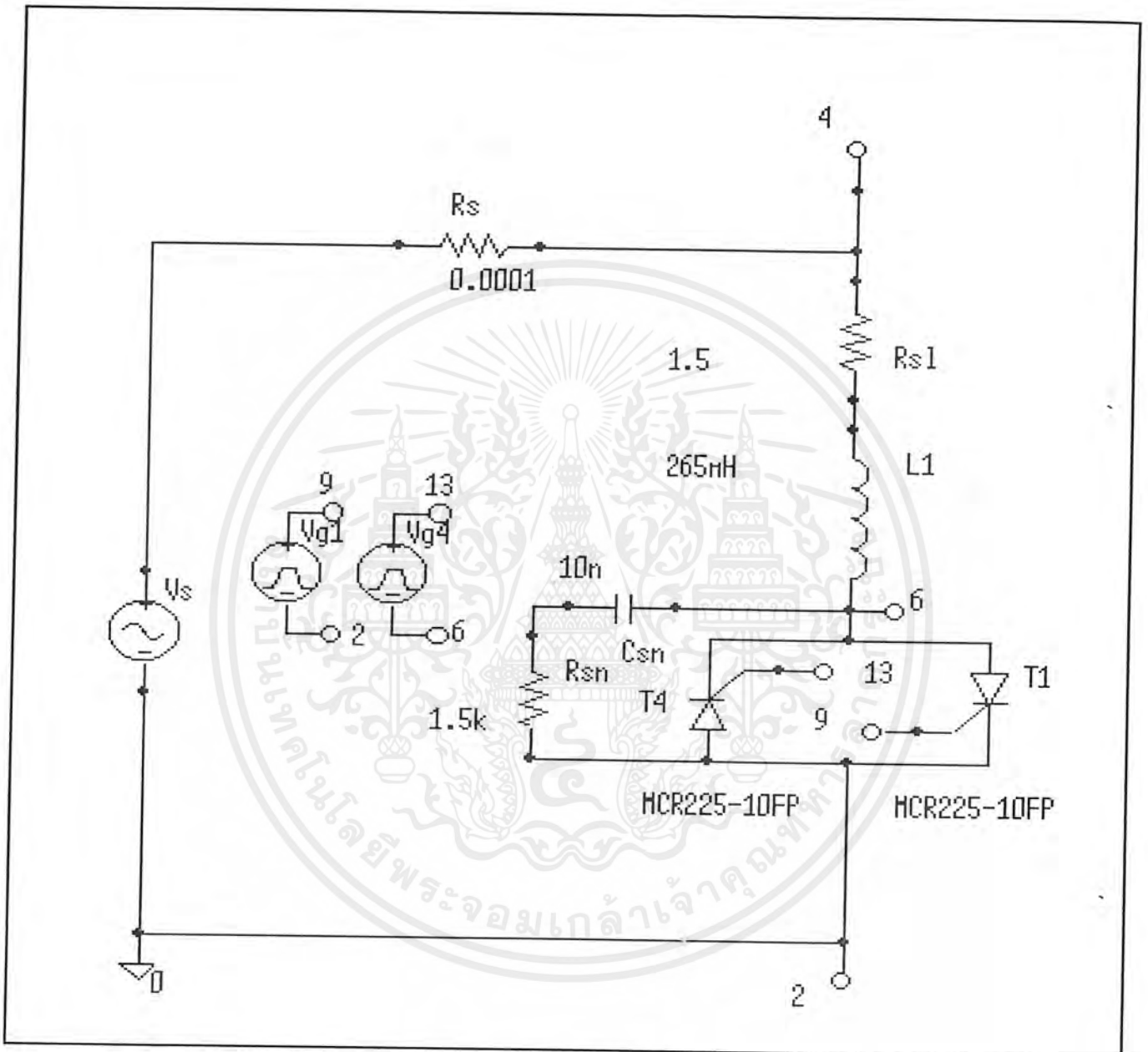
6. ส่งค่ามุมนำกระแสออก โดยผ่านช่องสัญญาณดิจิตอลเอาท์พุท
7. ทำการตรวจสอบว่าโหลดมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงก็กลับไปปรับค่า แล้วทำการคำนวณมุมนำกระแสใหม่ ถ้าหากโหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลง โปรแกรมก็จบการทำงาน



รูปที่ 4.7 จอแสดงผล

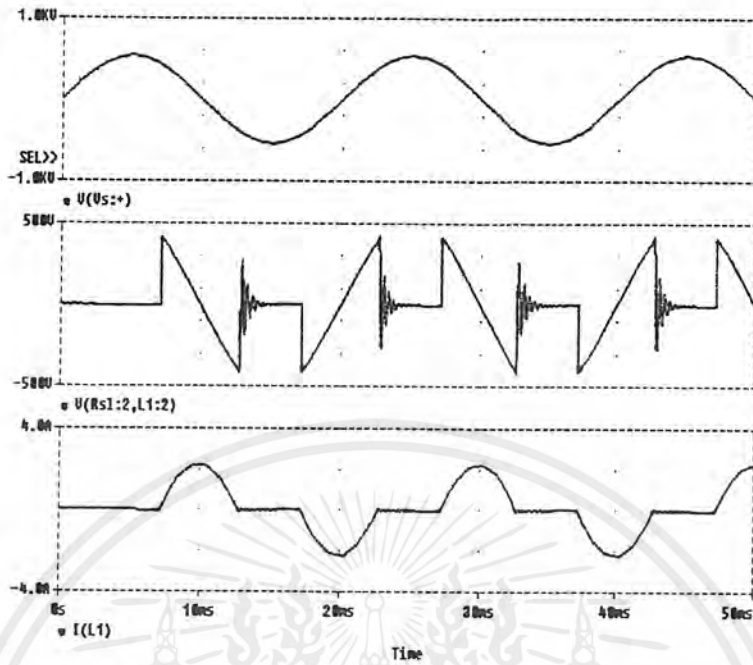
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการจำลองของรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์ (TCR)

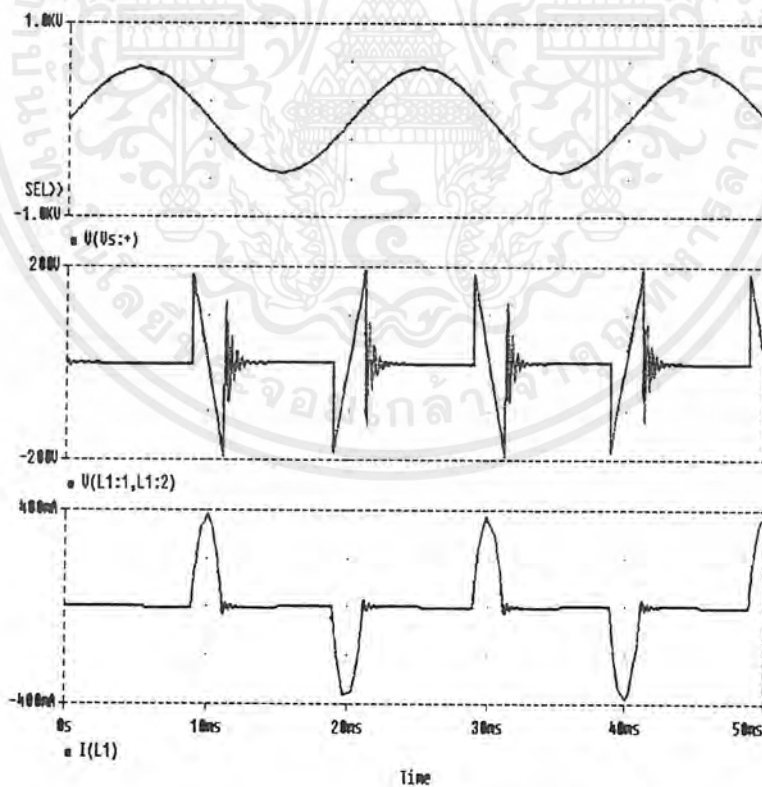


รูปที่ 4.8 แสดงวงจรของรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไคริสเตอร์แบบ 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

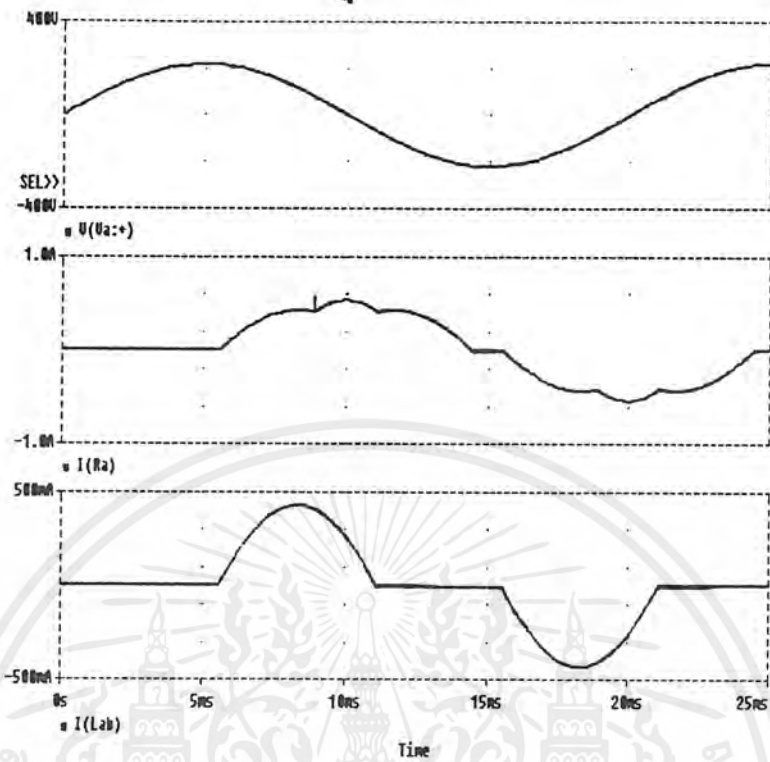


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นกระแสเฟสและแรงดันเฟสที่มุม 130 องศา

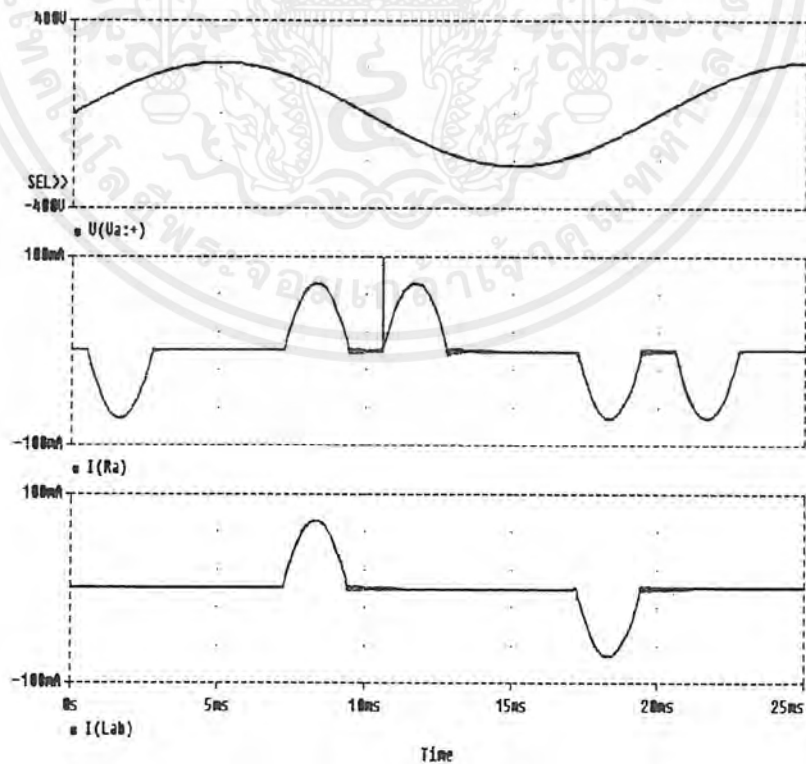


รูปที่ 4.10 รูปคลื่นกระแสเฟสและแรงดันเฟสที่มุม 160 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 รูปคลื่นกระแสสายและแรงดันสายที่มุม 100 องศา



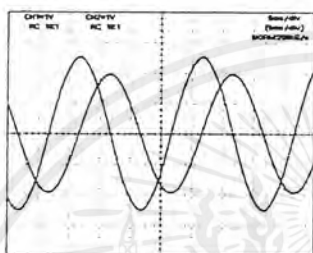
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นกระแสสายและแรงดันสายที่มุม 130 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

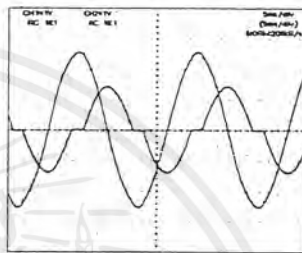
บทที่ 5

ผลการทดลอง

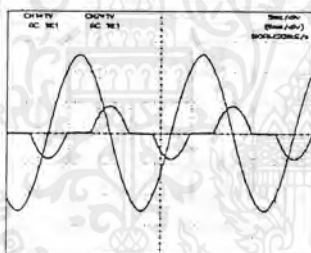
การทดสอบตัวเหนี่ยวนำโดยการทดลองที่มุมนำกระแสต่างๆ โดยต่ออนุกรมกับไครสเตอร์ที่
ต่อกันแบบแบค-ทู-แบค (Back-to Back) ดังแสดงดังรูป



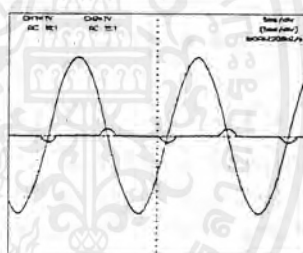
(5.1)



(5.2)



(5.3)



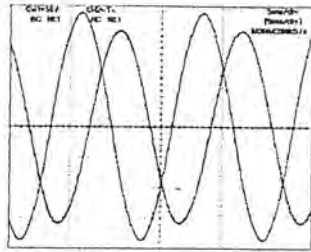
(5.4)

รูปที่ (5.1) แสดงสัญญาณแรงดันเฟสและกระแสเฟสที่มุม $\alpha = 90$ องศา

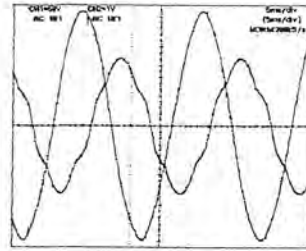
(5.2) แสดงสัญญาณแรงดันเฟสและกระแสเฟสที่มุม $\alpha = 110$ องศา

(5.3) แสดงสัญญาณแรงดันเฟสและกระแสเฟสที่มุม $\alpha = 130$ องศา

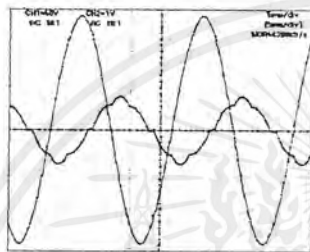
(5.4) แสดงสัญญาณแรงดันเฟสและกระแสเฟสที่มุม $\alpha = 160$ องศา



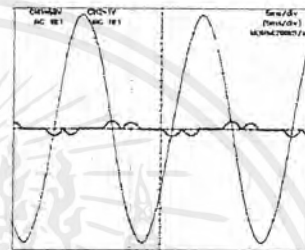
(5.5)



(5.6)



(5.7)



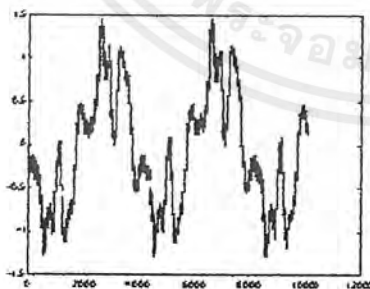
(5.8)

รูปที่ (5.5) แสดงสัญญาณแรงดันสายและกระแสสายที่มุม $\alpha = 90$ องศา

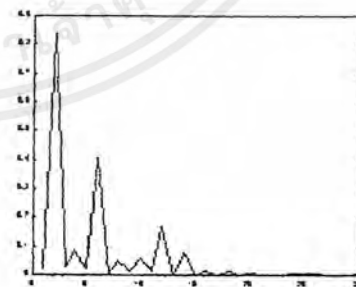
(5.6) แสดงสัญญาณแรงดันสายและกระแสสายที่มุม $\alpha = 110$ องศา

(5.7) แสดงสัญญาณแรงดันสายและกระแสสายที่มุม $\alpha = 130$ องศา

(5.8) แสดงสัญญาณแรงดันสายและกระแสสายที่มุม $\alpha = 160$ องศา



(5.9)



(5.10)

รูปที่ (5.9) แสดงสัญญาณกระแสสาย ของระบบตัวชดเชยไฟฟ้ากำลังแบบสถิต

(5.10) แสดงฮาร์โมนิกซ์ของสัญญาณกระแสสาย ของระบบตัวชดเชยไฟฟ้า
กำลังแบบสถิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองระบบของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบรีแอกทีฟนั้น แบ่งเป็นการทดลองโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำโดยใช้ หลอดฟลูออเรสเซนต์ ส่วน โหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังสูงนั้นใช้ หลอดอินแคนเดสเซนต์ ซึ่งโหลดแต่ละอย่างทดสอบทั้งในสภาวะที่สมดุลและไม่สมดุล ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตาราง 5.1 ถึง 5.7



Load Fluorescent Lamp

Balance Load (Watts)		Experiment data															
		System						Load									
AB	BC	CA	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	PF.a	PF.b	PF.c	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
Uncompensate																	
36	36	36	232.3	225.1	229.8	0.5	0.6	0.5	0.72 -	0.64 -	0.62 -	232.2	224.9	229.2	0.5	0.6	0.5
72	72	72	231.1	224.0	228.5	1.2	1.4	1.1	0.50 -	0.56 -	0.58 -	230.8	223.7	228.2	1.2	1.4	1.1
108	108	108	229.8	222.8	227.1	1.8	2.0	1.8	0.55 -	0.56 -	0.50 -	229.1	222.3	226.6	1.8	2.0	1.8
144	144	144	228.0	220.4	224.9	2.5	2.6	2.5	0.52 -	0.55 -	0.50 -	226.9	220.4	224.7	2.5	2.6	2.5
Static Var Compensator																	
36	36	36	233.7	226.3	230.5	0.4	0.6	0.5	0.99+	0.99+	0.99+	232.2	226.0	230.4	0.5	0.6	0.5
72	72	72	232.5	224.6	229.6	0.7	0.8	0.7	1	1	1	232.0	224.6	229.0	1.2	1.4	1.1
108	108	108	231.7	224.1	228.6	1.0	1.2	1.0	0.95 -	0.98 -	0.99 -	222.1	223.8	228.2	1.8	2.0	1.8
144	144	144	229.9	222.4	227.4	1.3	1.5	1.3	0.95 -	0.94 -	0.92 -	229.3	222.7	226.9	2.5	2.6	2.5

Note - lagging , + leading

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดฟลูออโรลูเมนแบบสามชุด

Load Fluorescent Lamp

Unbalance Load (Watts)			Experiment data															
			System						Load									
AB	BC	CA	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	PF.a	PF.b	PF.c	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	
Uncompensate																		
36	36	36	232.2	225.8	230.1	0.6	0.7	0.5	0.64	0.64	0.74	233.0	225.9	230.1	0.6	0.7	0.5	
72	36	36	233.1	226.3	230.2	0.9	0.9	0.5	0.72	0.50	0.64	232.7	226.1	230.1	0.9	0.9	0.5	
108	36	36	233.5	227.2	231.0	1.3	1.4	0.5	0.74	0.40	0.64	232.7	226.9	230.5	1.3	1.4	0.5	
144	36	36	232.9	227.3	230.9	1.7	1.8	0.5	0.76	0.40	0.64	232.2	227.0	230.4	1.7	1.8	0.5	
Static Var Compensator																		
36	36	36	233.8	227.1	230.5	0.5	0.6	0.5	1	1	1	233.3	226.6	230.6	0.6	0.7	0.5	
72	36	36	234.0	226.9	230.7	0.6	0.7	0.6	1	0.90	1	233.6	226.7	230.6	0.9	0.9	0.5	
108	36	36	234.1	227.1	231.0	0.8	0.8	0.7	1	0.99	0.99	231.5	226.9	229.3	1.3	1.4	0.5	
144	36	36	234.4	227.9	230.5	1.0	1.0	0.9	1	0.94	0.94	233.7	227.5	229.5	1.7	1.8	0.5	

Note - lagging , + leading

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบไม่สมดุล เฟส AB

Load Fluorescent Lamp

Unbalance Load (Watts)			Experiment data															
			System						Load									
AB	BC	CA	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	PF.a	PF.b	PF.c	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	
Uncompensate																		
36	36	36	235.5	227.8	232.1	0.6	0.6	0.5	0.78-	0.64-	0.64-	235.3	227.9	232.5	0.6	0.6	0.5	
72	72	36	234.4	227.7	231.6	0.9	1.4	0.9	0.72-	0.60-	0.50-	233.7	227.6	231.6	0.9	1.4	0.9	
108	108	36	232.8	226.0	230.2	1.3	2.1	1.3	0.74-	0.55-	0.50-	231.6	225.9	229.8	1.3	2.1	1.3	
144	144	36	232.3	225.9	230.6	1.7	2.8	1.7	0.78-	0.55-	0.50-	231.3	225.6	230.2	1.7	2.8	1.7	
Static Var Compensator																		
36	36	36	233.8	228.4	232.2	0.5	0.6	0.6	0.99-	0.94-	0.80-	235.3	228.2	232.5	0.6	0.6	0.5	
72	72	36	233.8	226.8	229.5	0.8	1.0	0.7	0.98-	0.90-	0.78-	233.3	226.3	229.2	0.9	1.4	0.9	
108	108	36	231.9	227.0	230.8	1.0	1.3	1.0	0.95-	0.88-	0.90-	231.2	227.1	230.6	1.3	2.1	1.3	
144	144	36	231.6	226.9	230.9	1.3	1.5	1.2	0.92-	0.88-	0.82-	232.7	226.4	230.2	1.7	2.8	1.7	

Note - lagging , + leading

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดฟลูออโรสเซนต์ แบบไม่สมดุล เฟส AB และเฟส BC

Load Incandescent Lamp

Unbalance Load (Watts)			Experiment data															
			System					Load										
AB	BC	CA	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	PF.a	PF.b	PF.c	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	
Uncompensate																		
100	100	100	220.9	214.1	218.4	0.7	0.6	0.6	1.0	1.0	1.0	225.0	213.7	218.2	0.7	0.6	0.6	
200	100	100	220.6	213.8	218.7	1.0	0.6	0.6	0.98+	0.96-	1.0	220.0	213.5	218.3	1.0	0.6	0.6	
300	100	100	219.7	213.4	218.4	1.4	1.4	0.6	0.96+	0.96-	1.0	219.2	213.1	217.9	1.4	1.4	0.6	
400	100	100	219.4	213.1	218.9	1.8	1.8	0.6	0.95+	0.95-	1.0	218.2	212.7	217.9	1.8	1.8	0.6	
.Static Var Compensator																		
100	100	100	221.3	214.7	219.0	0.8	0.9	0.8	0.99+	0.99-	1.0	220.7	214.0	218.8	0.7	0.6	0.6	
200	100	100	221.1	214.5	218.9	1.0	1.1	1.0	0.99+	0.98-	0.99-	220.7	214.3	218.5	1.0	0.6	0.6	
300	100	100	220.5	214.4	218.4	1.2	1.3	1.2	0.99+	0.99-	0.99-	220.0	213.7	217.9	1.4	1.4	0.6	
400	100	100	219.8	213.5	217.5	1.6	1.6	1.4	0.99+	0.99-	0.99-	219.0	213.2	217.2	1.8	1.8	0.6	

Note - lagging , + leadin

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ แบบสมมูล

Load Incandescent Lamp

Unbalance Load (Watts)		Experiment data															
AB	BC	CA	System						Load								
			Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	PF.a	PF.b	PF.c	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
Uncompensate																	
100	0	0	230.0	223.5	228.0	0.4	0.4	0	0.95+	1.0	1.0	229.5	223.5	228.2	0.4	0.4	0
200	100	0	229.5	222.5	227.8	0.7	1.0	0.3	0.87+	0.98-	0.99-	229.4	222.4	227.7	0.7	1.0	0.3
300	200	100	228.5	221.7	226.7	1.4	1.7	1.0	0.95+	1.0	0.98-	227.3	220.7	226.5	1.4	1.7	1.0
400	300	200	227.4	220.6	225.8	2.1	2.4	1.7	0.97+	1.0	0.99-	225.7	219.4	225.2	2.1	2.4	1.7
Static Var Compensator																	
100	0	0	229.5	223.1	227.4	0.5	0.5	0.5	0.99-	1.0	1.0	229.4	223.3	227.3	0.4	0.4	0
200	100	0	220.1	223.1	227.6	0.7	0.7	0.8	0.99+	1.0	0.99-	229.8	222.6	227.3	0.7	1.0	0.3
300	200	100	229.3	222.5	226.7	1.4	1.6	1.4	0.99+	1.0	0.99-	228.1	221.5	225.7	1.4	1.7	1.0
400	300	200	228.2	222.0	225.8	2.2	2.3	2.0	1.0	0.99-	0.99-	226.9	220.7	225.3	2.1	2.4	1.7

Note - lagging , + leading

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ แบบไม่สมดุล 3 เฟส

Load Incandescent Lamp

Unbalance Load (Watts)		Experiment data																
AB	BC	CA	System						Load									
			Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	PF.a	PF.b	PF.c	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	
Uncompensate																		
100	100	100	219.0	211.2	216.7	0.6	0.6	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	218.8	211.6	216.4	0.6	0.6	0.6
100	200	100	219.7	211.6	216.7	0.6	0.9	0.9	1.0	0.98+	0.98-	0.98-	219.1	211.0	216.6	0.6	0.9	0.9
100	300	100	219.8	211.4	216.7	0.6	1.3	1.3	1.0	0.96+	0.96-	0.96-	219.2	210.6	216.5	0.6	1.3	1.3
100	400	100	219.9	211.2	216.5	0.6	1.7	1.7	1.0	0.94+	0.94-	0.94-	219.2	210.0	216.3	0.6	1.7	1.7
Static Var Compensator																		
100	100	100	219.4	211.6	217.4	0.8	0.9	0.9	1.0	0.99-	0.98-	0.98-	219.3	211.4	217.0	0.6	0.6	0.6
100	200	100	219.5	211.6	217.2	0.9	1.1	1.1	1.0	1.0	0.98-	0.98-	219.0	211.0	216.6	0.6	0.9	0.9
100	300	100	218.2	211.1	216.1	1.4	1.4	1.4	1.0	0.96-	0.97-	0.97-	218.0	210.8	215.4	0.6	1.3	1.3
100	400	100	219.3	211.6	216.4	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	0.97-	0.97-	218.8	211.1	216.2	0.6	1.7	1.7

Note - lagging , + leading

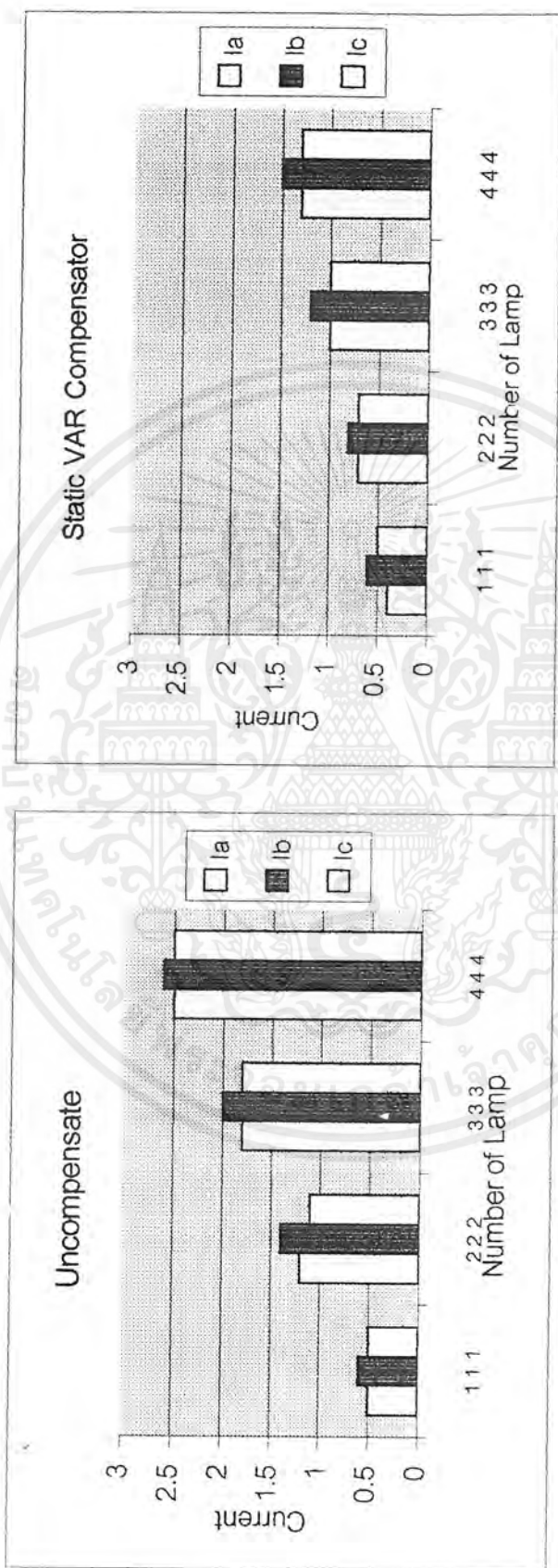
ตารางที่ 5.6 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ แบบไม่สมดุล เฟส AB และ เฟส BC

Load Incandescent Lamp

Unbalance Load (Watts)		Experiment data															
		System							Load								
AB	BC	CA	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	PF.a	PF.b	PF.c	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
Uncompensate																	
100	100	100	223.4	216.4	220.3	0.6	0.6	0.6	0.99-	0.99+	1.0	223.0	216.1	220.0	0.6	0.6	0.6
200	200	200	222.5	215.7	219.3	1.3	1.3	1.3	1.0	0.99+	1.0	221.6	214.8	218.9	1.3	1.3	1.3
300	300	300	221.4	214.3	218.5	2.0	2.0	2.0	1.0	0.99+	1.0	220.5	213.7	217.9	2.0	2.0	2.0
400	400	400	220.0	213.5	217.2	2.7	2.7	2.7	1.0	0.99+	1.0	219.0	211.9	212.6	2.7	2.7	2.7
Static Var Compensator																	
100	100	100	222.8	216.0	219.9	0.7	0.9	0.9	1.0	1.0	0.98-	222.4	215.7	220.0	0.6	0.6	0.6
200	200	200	221.1	214.4	218.3	1.3	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	220.5	214.0	218.4	1.3	1.3	1.3
300	300	300	218.4	213.5	216.1	2.1	2.2	2.2	1.0	1.0	0.99-	217.4	212.6	215.6	2.0	2.0	2.0
400	400	400	217.6	211.5	214.9	2.8	2.8	2.9	0.99-	1.0	0.99-	216.4	210.4	214.3	2.7	2.7	2.7

Note - lagging , + leading

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดลองการจ่ายโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ แบบสมดุล

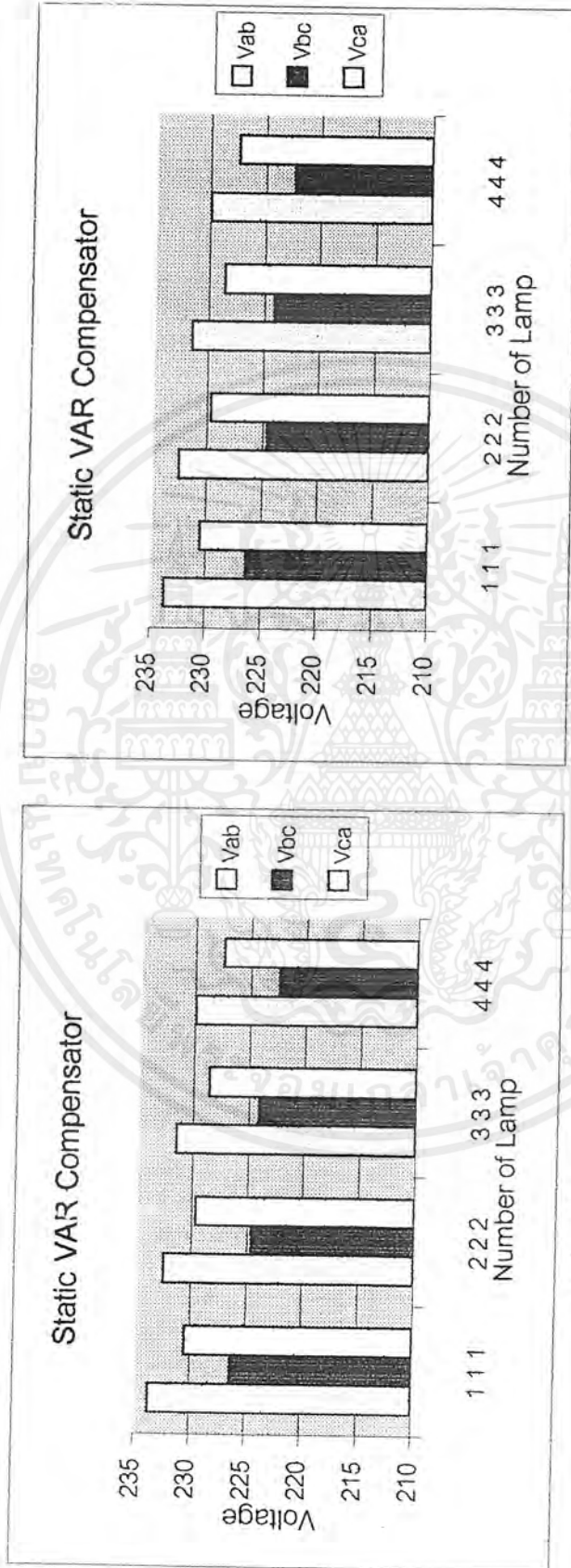


(ค) ก่อนทำการชดเชย

(ข) หลังทำการชดเชย

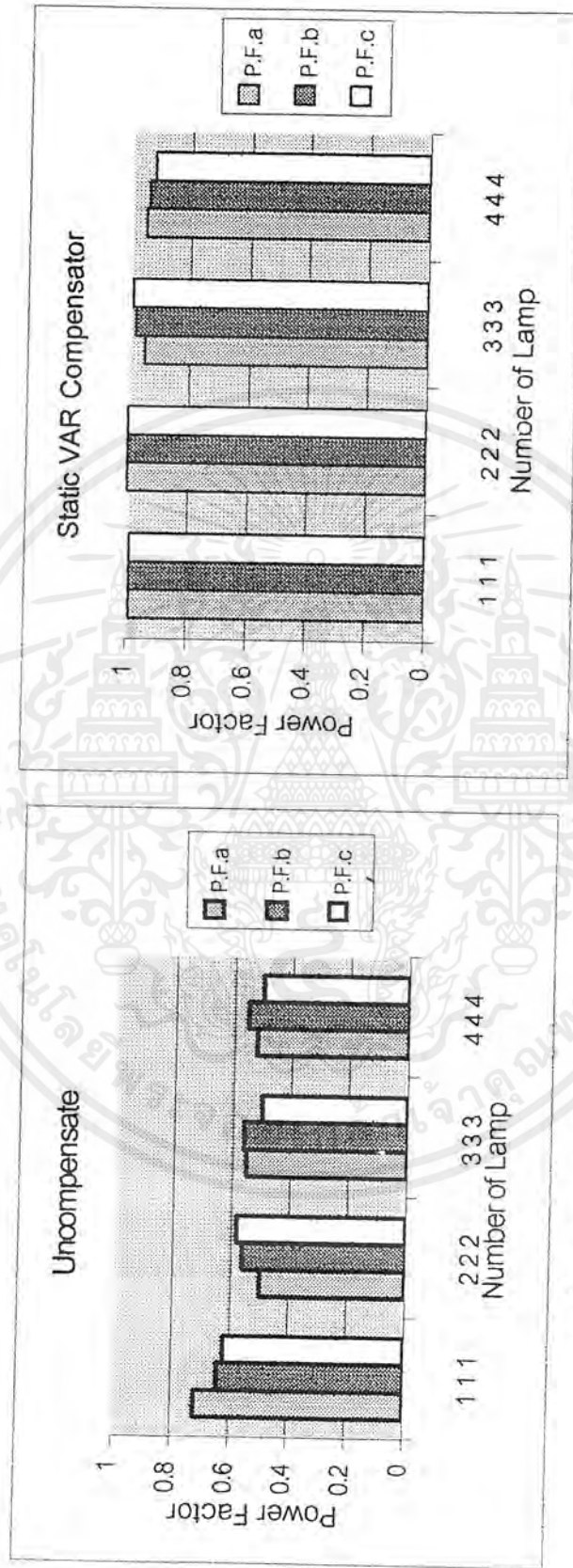
รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบกระแสเส้นของโหลดหลอดฟลูออโรสเซนส์สามดวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ก่อนทำการชดเชย
 (ข) หลังทำการชดเชย
 รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบแรงดันของโถงคอลลอคฟลูออเรสเซนต์หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

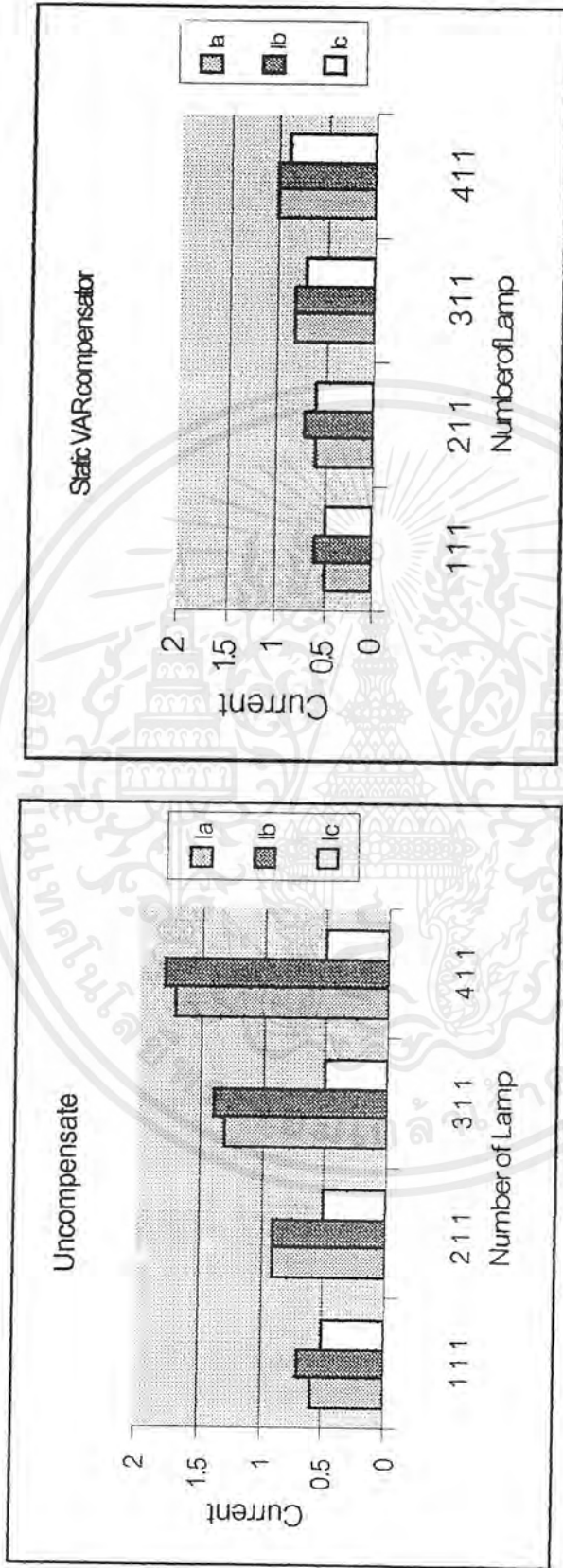


(ก) ก่อนทำการชดเชย

(ข) หลังทำการชดเชย

รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของโคมหลอดฟลูออโรเรสเซนส์ตามจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

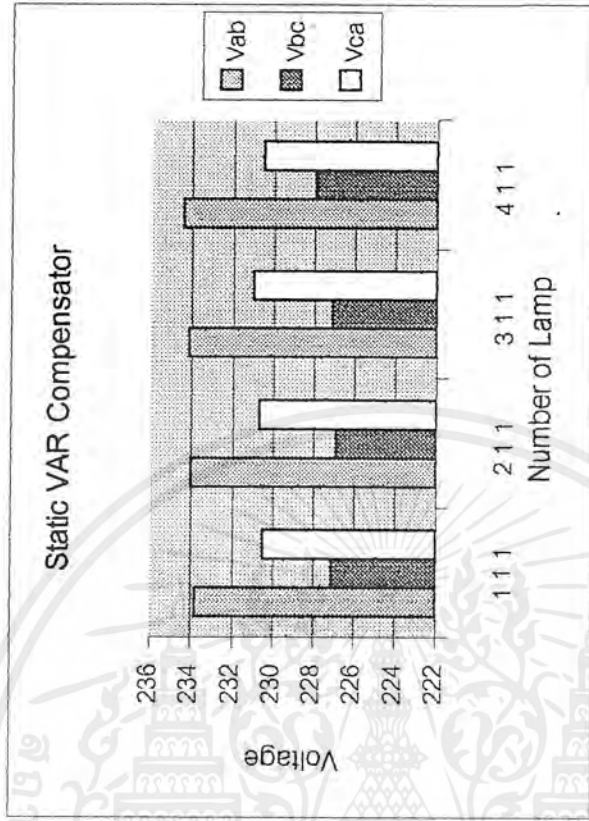


(ก) ก่อนทำการชดเชย

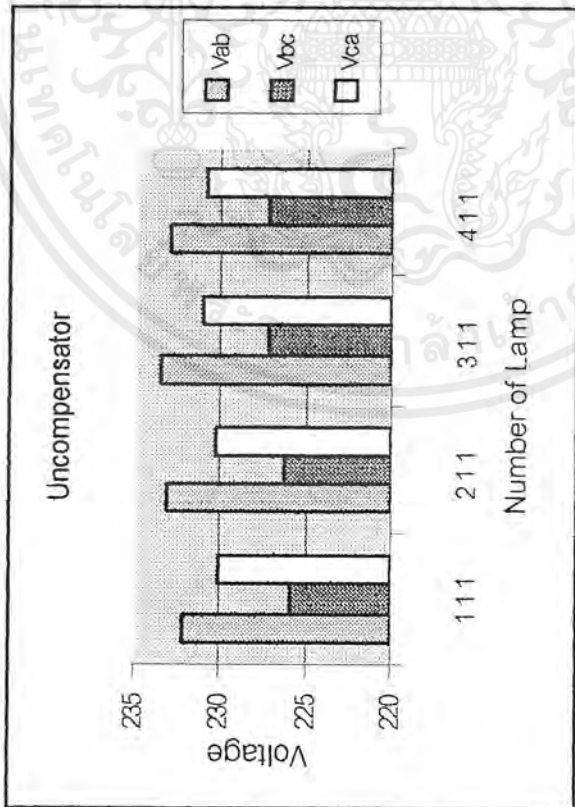
(ข) หลังทำการชดเชย

รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟของโหนดหลอดฟลูออโรเรสเซนซ์ที่ไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



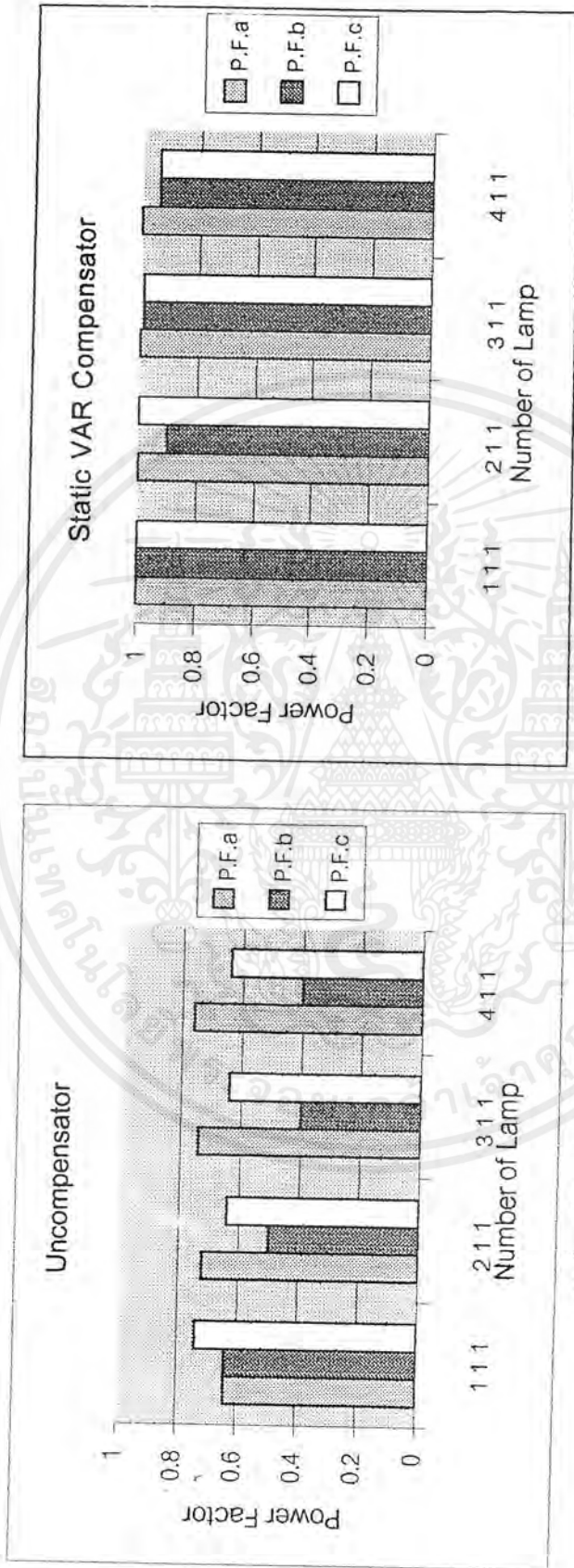
(ข) หลังทำการชดเชย



(ก) ก่อนทำการชดเชย

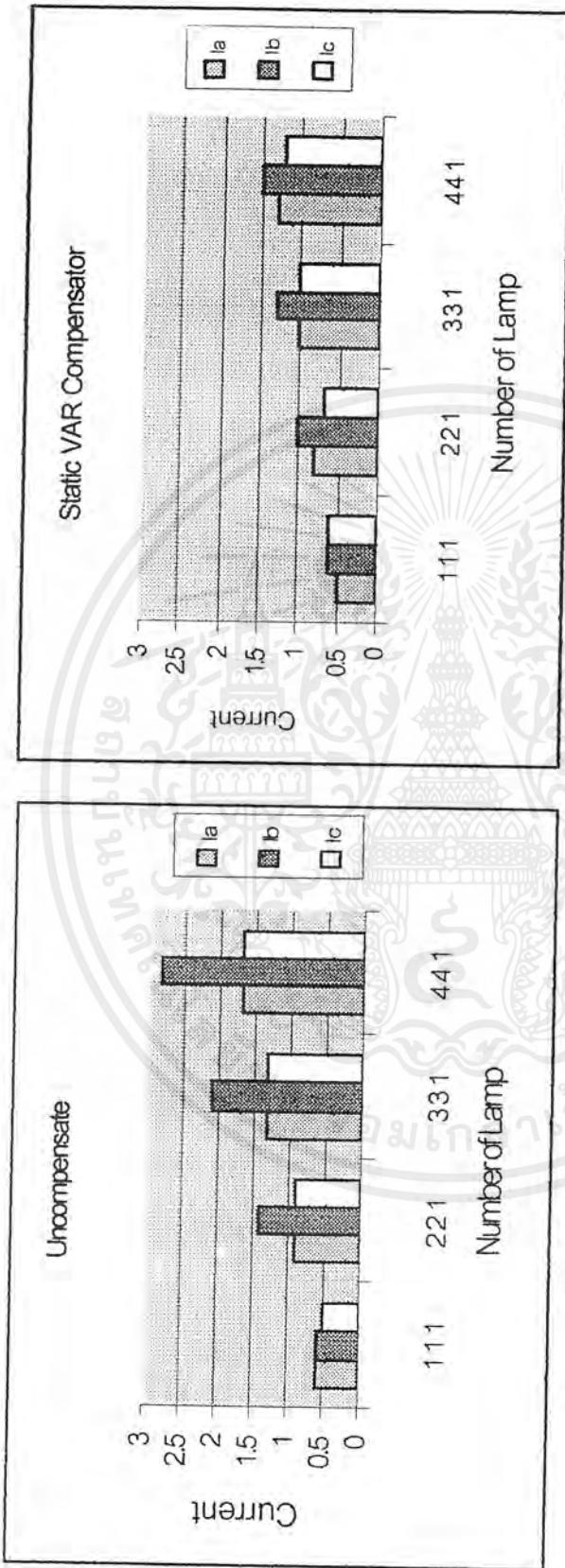
รูปที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบแรงดันของโวลต์หลอดฟลูออโรสเซนส์ไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ก่อนทำการชดเชย
 (ข) หลังทำการชดเชย
 รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของโหลดหลอดฟลูออโรสเซนส์ไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

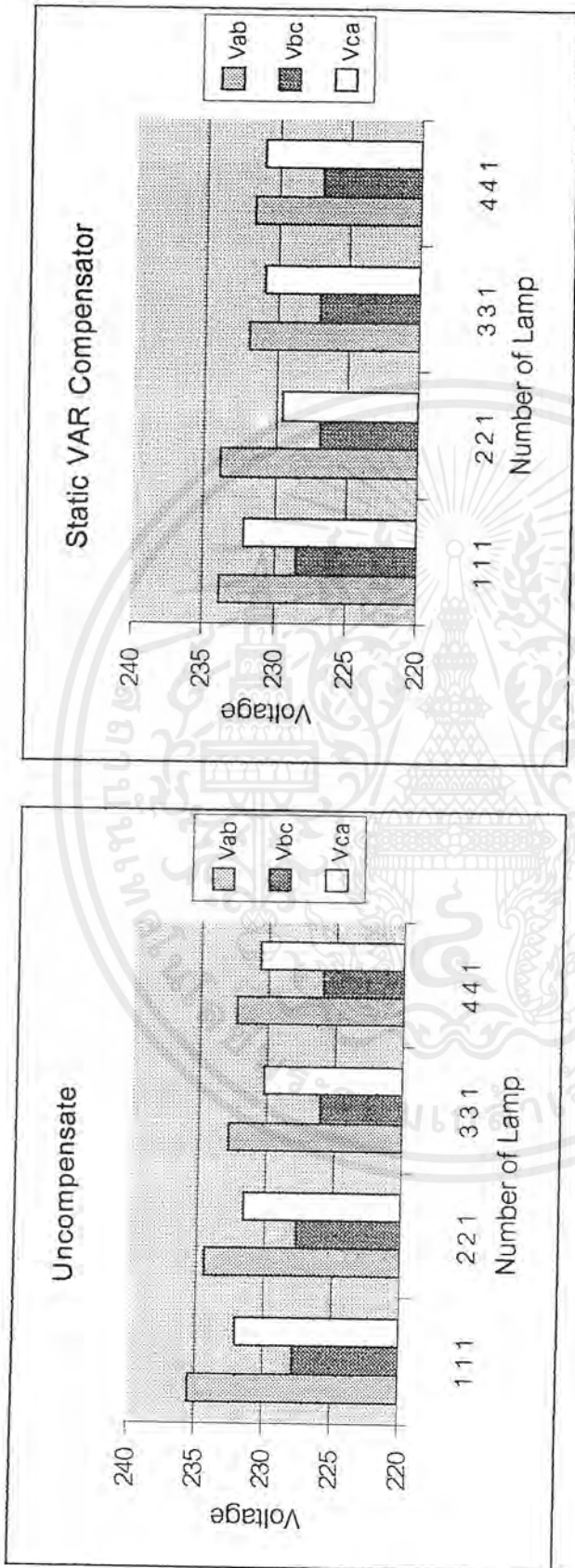


(ก) ก่อนทำการชดเชย

(ข) หลังทำการชดเชย

รูปที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบกระแสของโหนดหลอดฟลูออโรสเซนต์ไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

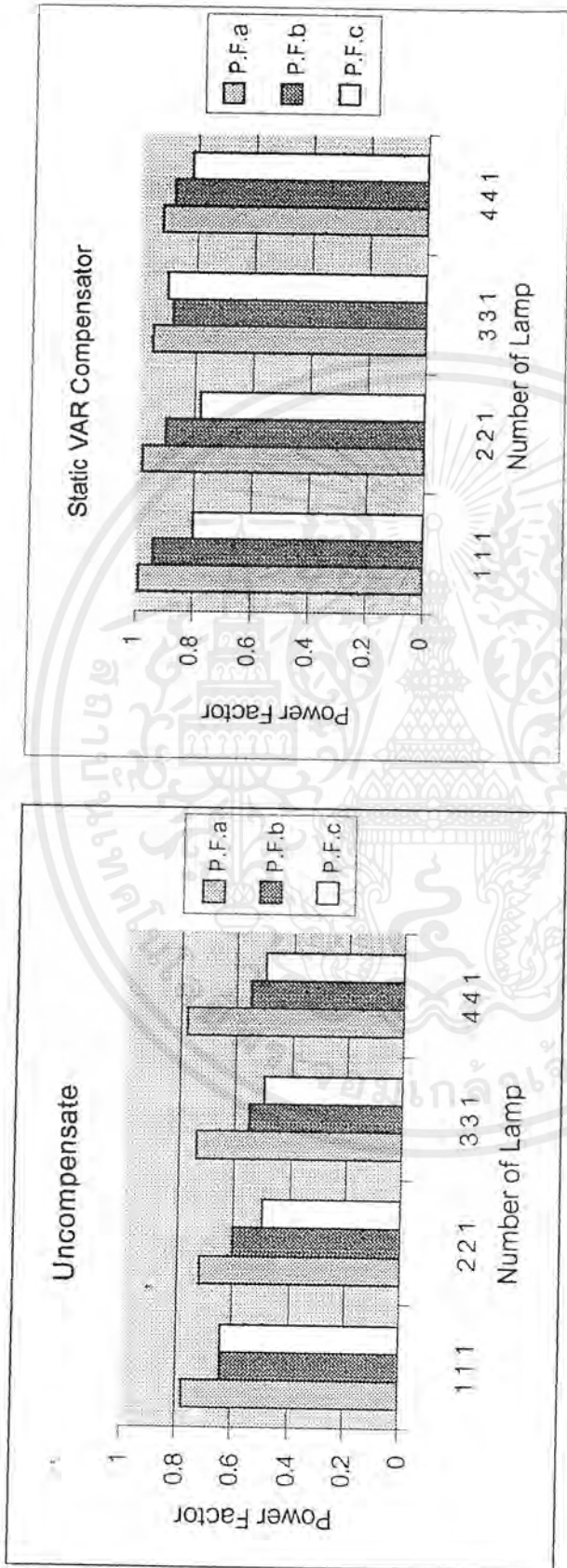


(ก) ก่อนทำการชดเชย

(ข) หลังทำการชดเชย

รูปที่ 5.18 กราฟเปรียบเทียบแรงดันของโวลต์หลอดฟลูออโรสเซนส์ไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

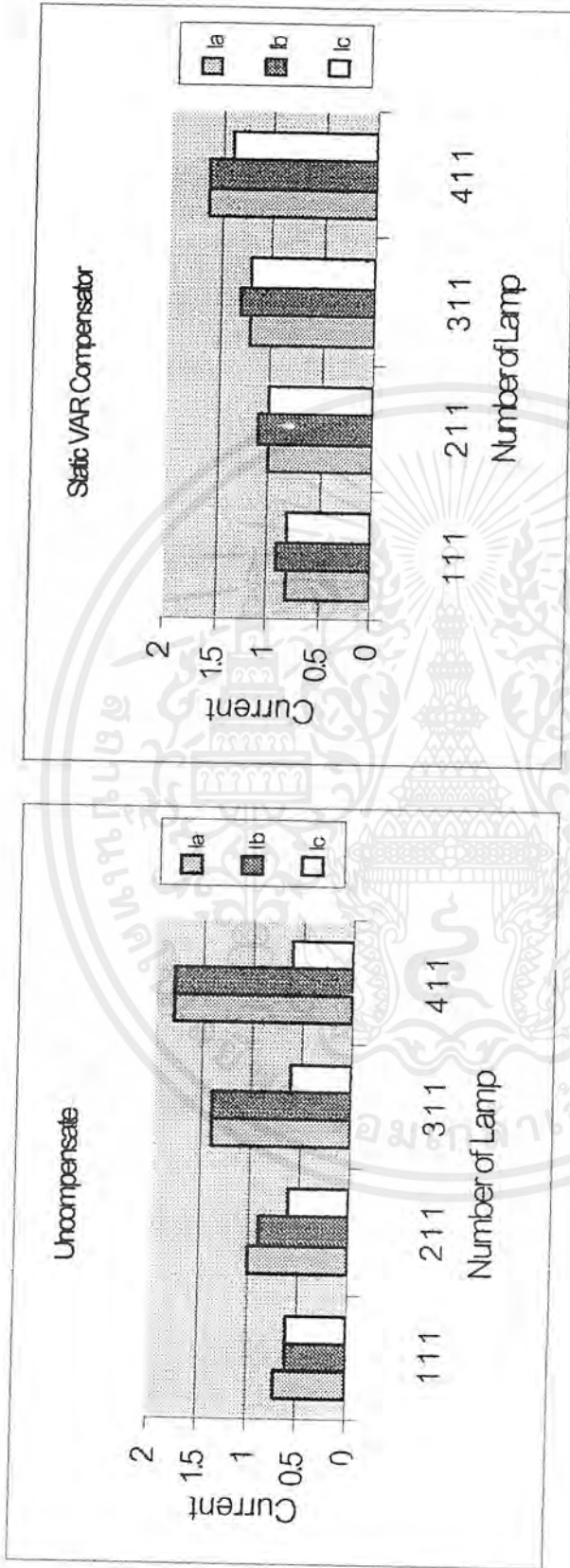


(ก) ก่อนทำการชดเชย

(ข) หลังทำการชดเชย

รูปที่ 5.19 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของโหลดหลอดฟลูออโรสเซนส์ไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

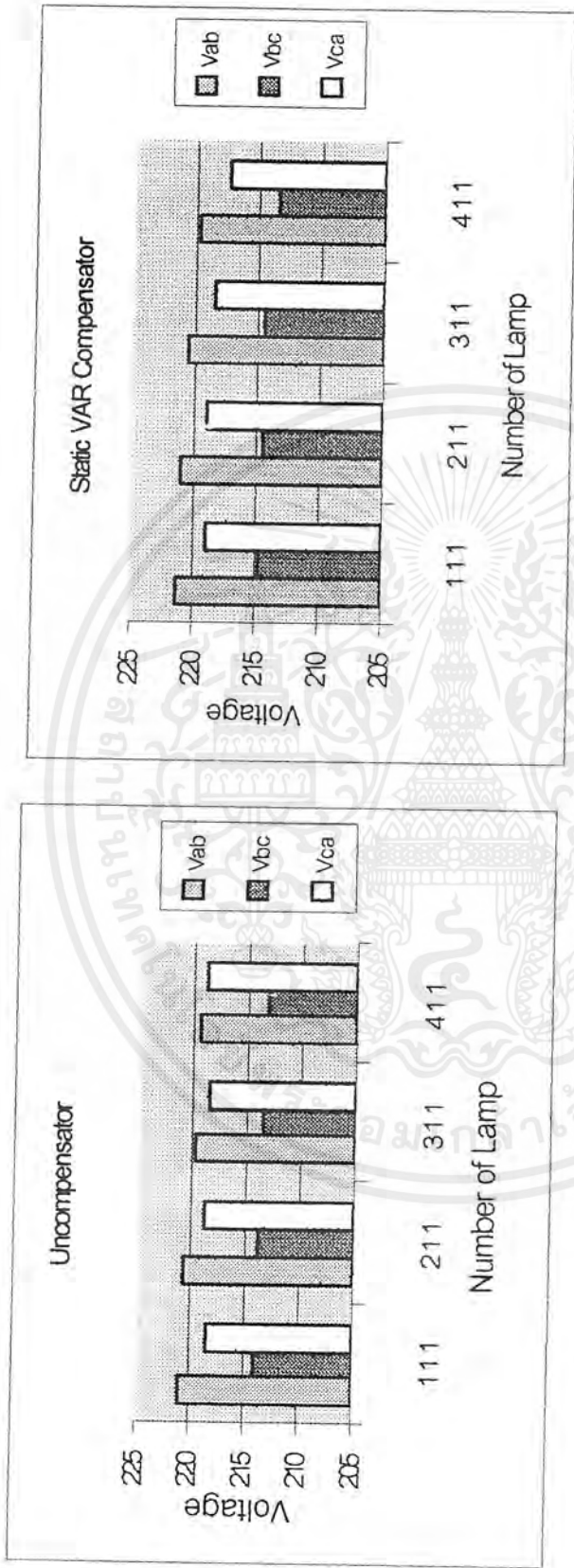


(ก) ก่อนทำการชดเชย

(ข) หลังทำการชดเชย

รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบกระแสของโหนดโหลดอินแดนเตสชนิดไม่สมดุล

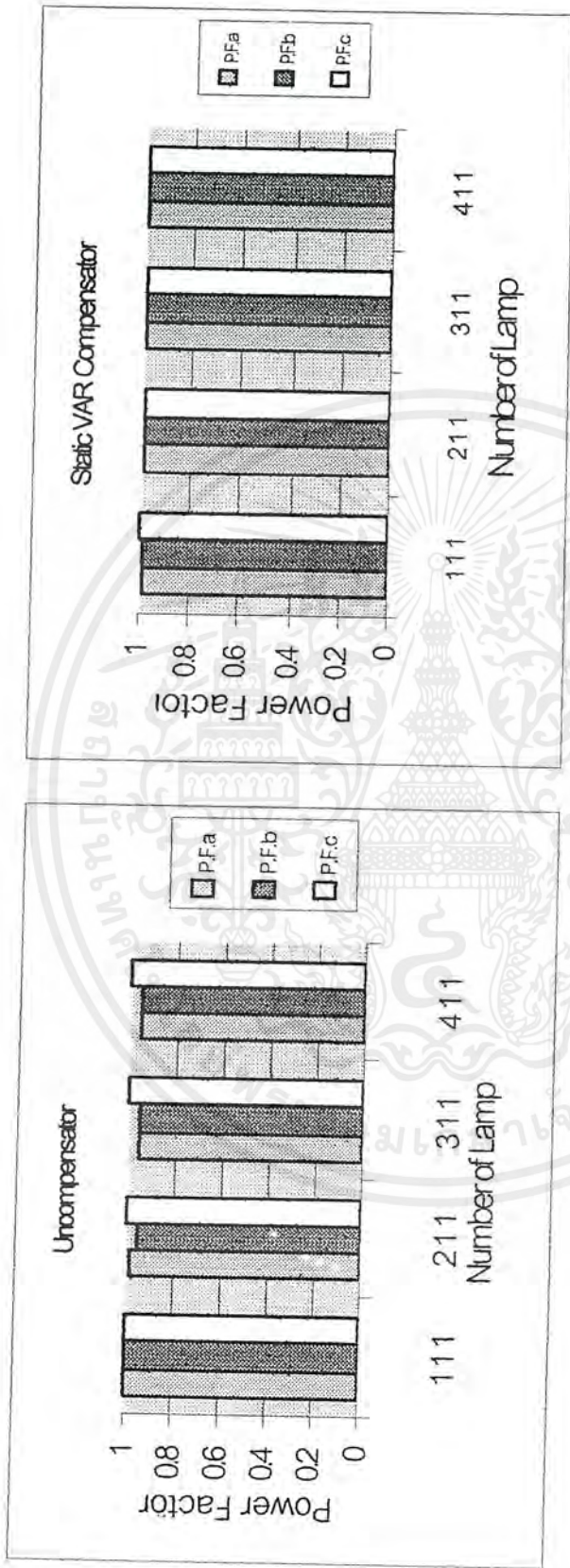
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ก่อนทำการชดเชย (ข) หลังทำการชดเชย

รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบแรงดันของโหนดโหลดอินแคนเดสเซนต์ไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

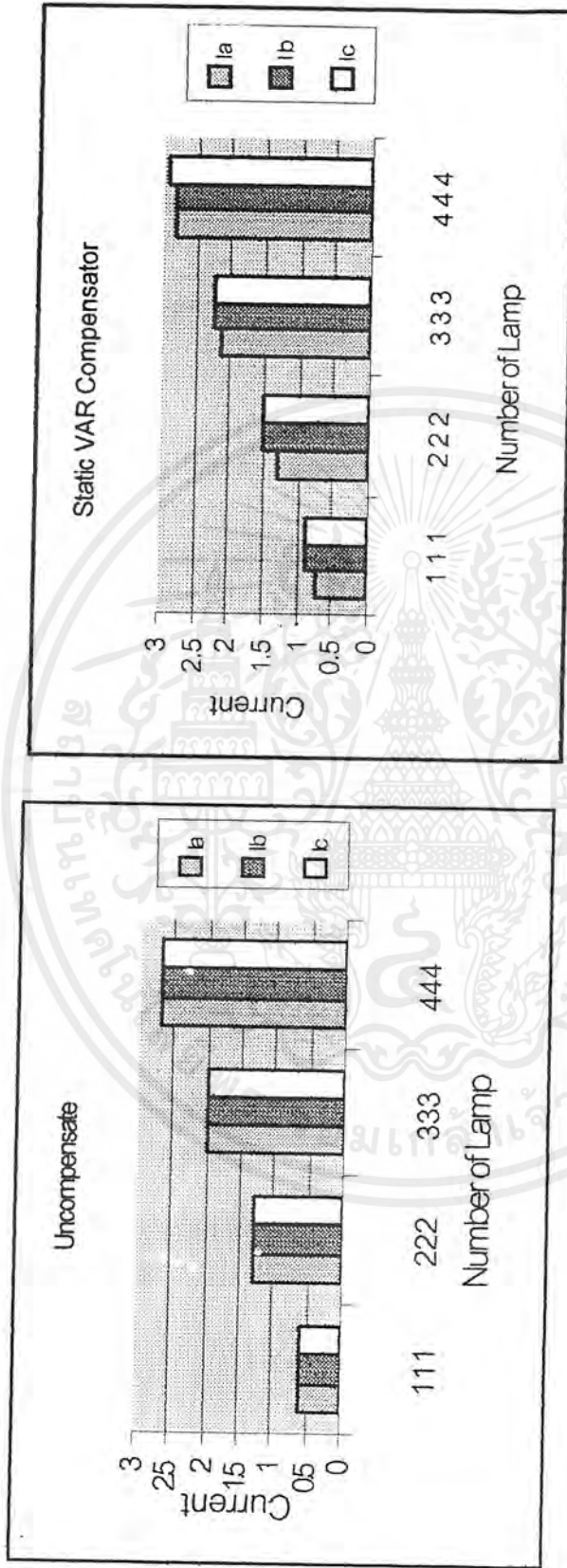


(ก) ก่อนทำการชดเชย

(ข) หลังทำการชดเชย

รูปที่ 5.22 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ที่ไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

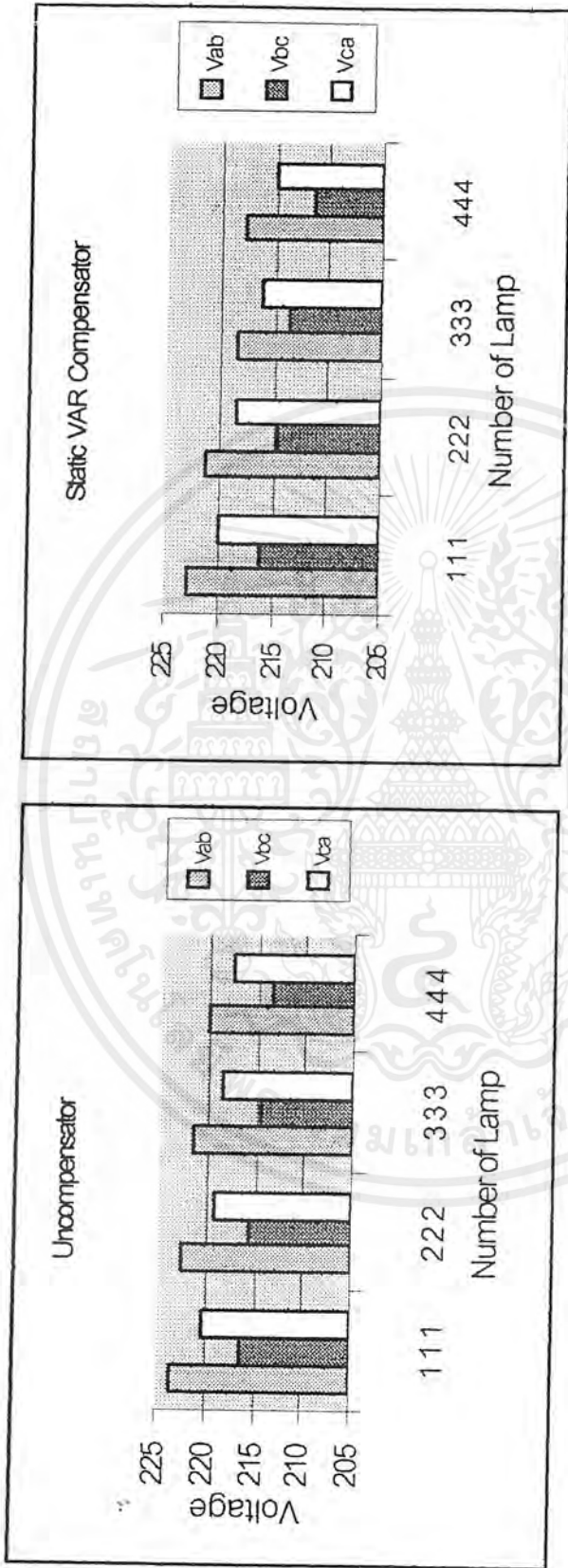


(ก) ก่อนทำการชดเชย

(ข) หลังทำการชดเชย

รูปที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบกระแสของโหนดหลอดอินแคนเดสเซนต์สามจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

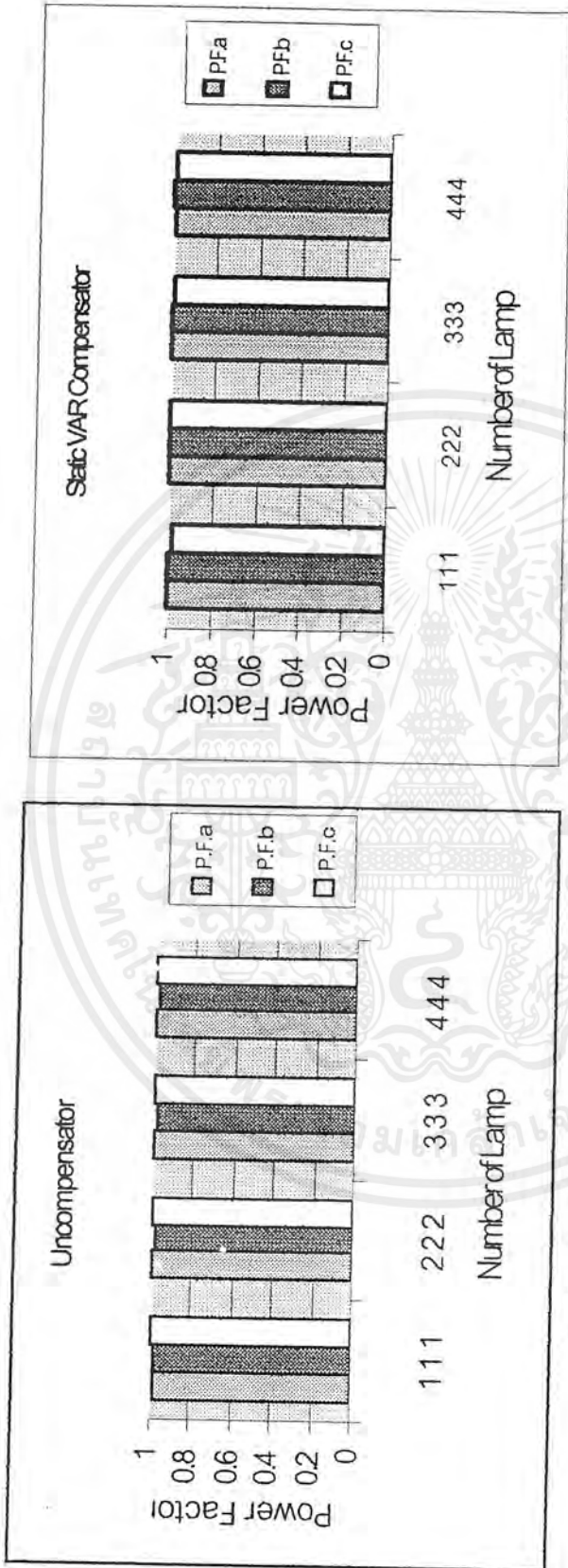


(ก) ก่อนทำการชดเชย

(ข) หลังทำการชดเชย

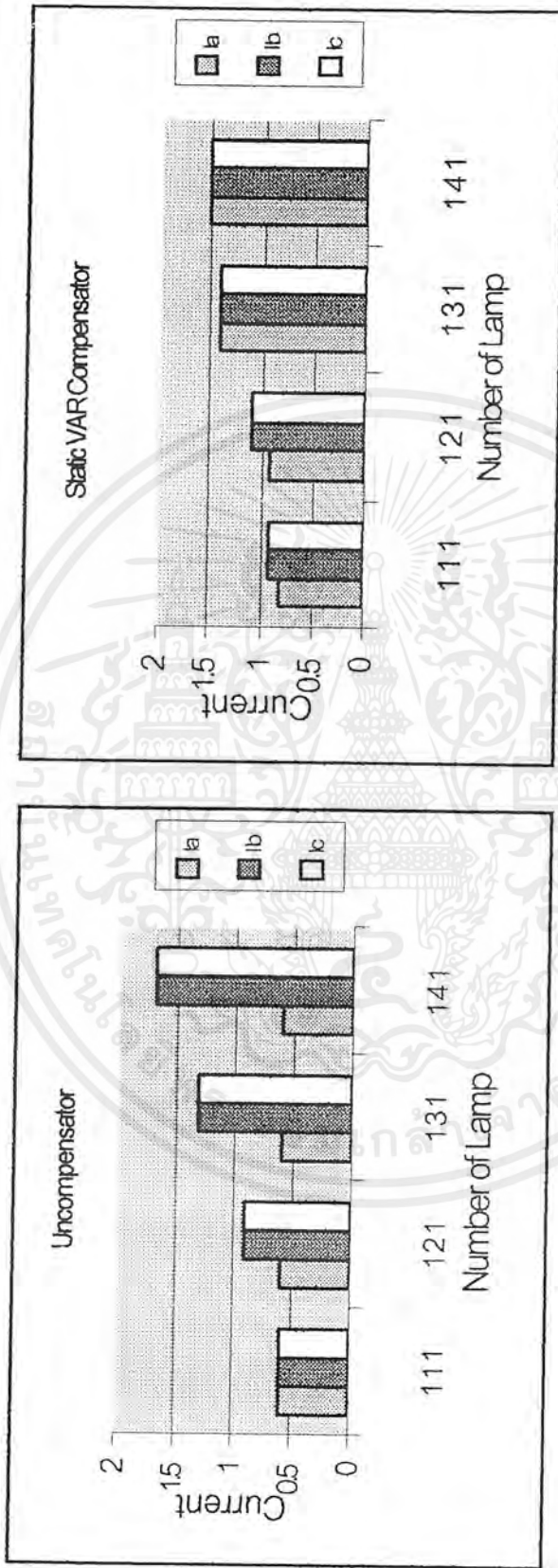
รูปที่ 5.24 กราฟเปรียบเทียบแรงดันของโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์สมดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ก่อนทำการชดเชย
รูปที่ 5.25 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของโหนดโหลดอินแดนเตสเซนส์สมมูล
(ข) หลังทำการชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

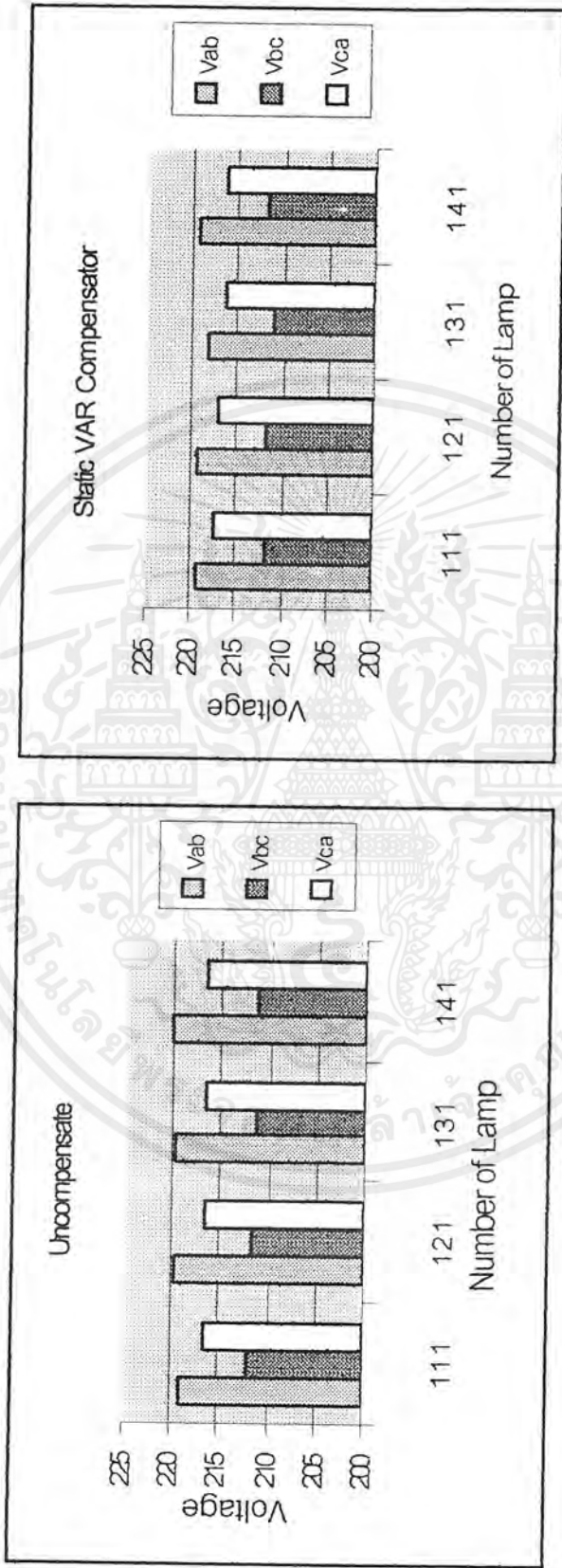


(ก) ก่อนทำการชดเชย

(ข) หลังทำการชดเชย

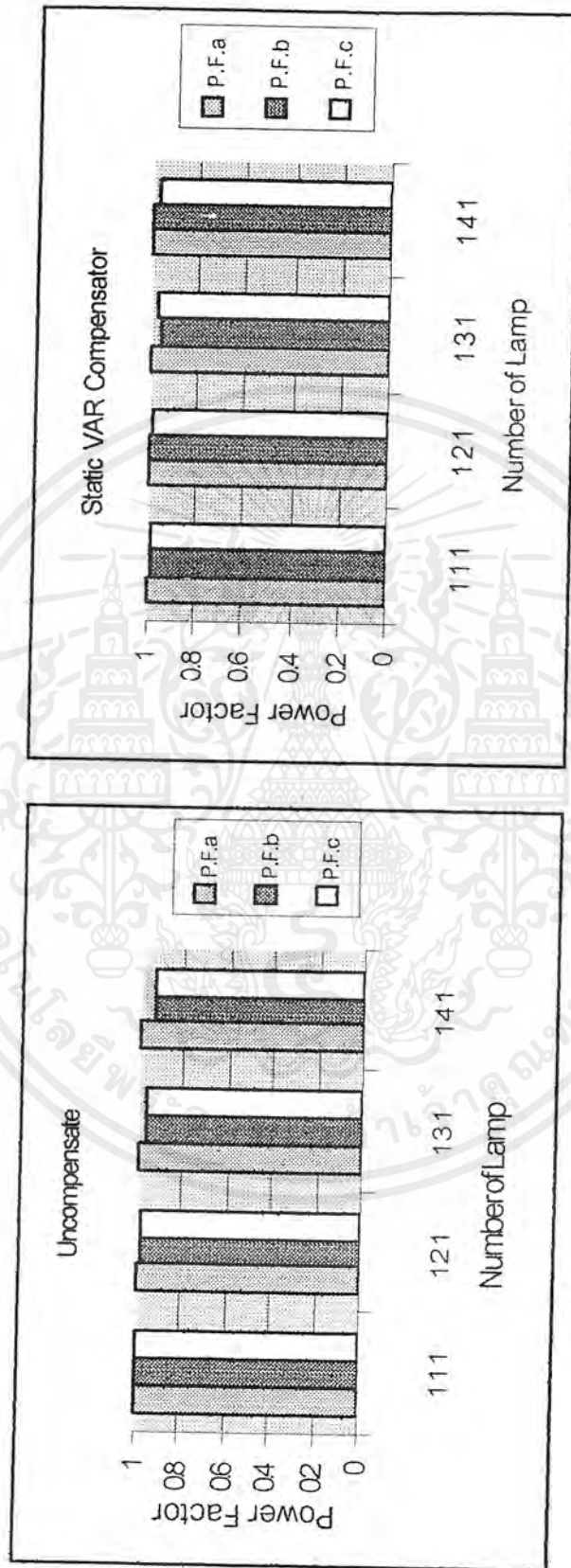
รูปที่ 5.26 กราฟเปรียบเทียบกระแสของโหนดโหลดอินแดนเตนซ์ในแต่ละเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ก่อนทำการชดเชย
 (ข) หลังทำการชดเชย
 รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบแรงดันของโหนดโหลดอินแดนเตสเซนส์ไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ก่อนทำการชดเชย

(ข) หลังทำการชดเชย

รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิตที่สภาวะโหลดต่างๆ สามารถวิเคราะห์และสรุปผลของผลการทดลอง ได้ว่าบรรลุตามวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งไว้ดังนี้

1. การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

ค่าตัวประกอบกำลังหลังจากทำการชดเชยระบบแล้ว จะมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง (Unity)

2. การปรับปรุงค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Voltage Regulation)

ผลของแรงดันที่ขั้วของโหลดหลังจากที่ทำการชดเชยแล้วจะทำให้แรงดันที่ขั้วสูงกว่าในกรณีที่ยังไม่ได้ทำการชดเชย ซึ่งทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันลดลง

3. การทำสมดุลโหลด (Load Balancing)

จากผลการทดลองที่สภาวะโหลดต่างๆ ทั้งในกรณีที่โหลดสมดุล และโหลดไม่สมดุล หลังจากทำการชดเชยแล้ว กระแสสายทั้งสามเฟสจะเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

สรุปปัญหา

1. ตัวเหนี่ยวนำไม่สามารถปรับค่ารีแอกเตอร์ให้เป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งสอดคล้องที่ 3.7
2. วงจรแปลงค่าสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก มีค่าความละเอียดเพียง 8 บิต ซึ่งมีผลทำให้การควบคุมมุมทริกของไทรสเตอร์ไม่ละเอียดพอ
3. การ์ดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล (PCL-818) มีความแม่นยำในการสุ่มสัญญาณไม่ค่อยแม่นยำเท่าที่ควรส่งผลทำให้การคำนวณหาขนาดและมุมเฟสของสัญญาณ ผิดพลาดไป เป็นเหตุให้การควบคุมการชดเชยคลาดเคลื่อนไปในบางจังหวะ
4. ผลของตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำที่ชดเชยกันภายในระบบ เป็นสาเหตุทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่ขึ้นในระบบ
5. เกิดการรบกวนจากสัญญาณความถี่สูง ที่ปนมากับระบบของการไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อระบบควบคุมของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต
6. ตัวเหนี่ยวนำแต่ละเฟสภายในระบบ ไม่สามารถปรับให้มีค่าเท่ากันทุกประการได้ จึงมีผลทำให้คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำแต่ละเฟสไม่เท่ากัน

แนวทางแก้ไขและพัฒนาระบบขดเคยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต

1. เลือกใช้วงจรแปลงค่าสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก ที่มีค่าความละเอียดสูงกว่า 8 บิต ซึ่งจะช่วยให้ได้ค่าความละเอียดในการควบคุมมุมทริกของไทรสเตอร์
2. เลือกใช้การ์ดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล ที่มีความแม่นยำในการสุ่มสัญญาณสูง
3. ออกแบบชุดกรองฮาร์โมนิกส์ เพื่อกำจัด ฮาร์โมนิกส์ที่ปนมากับการไฟฟ้า และที่เกิดขึ้นจากการชดเชยระบบ
4. ควรออกแบบตัวชชชเป็นแบบรีแอกเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ร่วมกับไทรสเตอร์สวิทซ์คาปาซิเตอร์ ซึ่งสามารถควบคุมได้ทั้งคาปาซิเตอร์และรีแอกเตอร์ โดยที่แต่ละเฟสจะมีชุดตัวเก็บประจุหลายชุด และรีแอกเตอร์หลายชุดเช่นกัน ซึ่งสามารถทำให้ชชชความนำเชิงซ้อนให้เป็นเชิงเส้นได้ การควบคุมระบบจะทำได้ง่ายและแม่นยำขึ้น





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โปรแกรมควบคุมการทำงาน

```

]
*****
* Program      : Static VAR Compensator , TCR type          *
* Description  : Program for SVC ,TCR type, Using PCL-818 pacer *
*              : trigger A/D conversion with software data  *
*              : transfer.                                  *
* Revision    : 3.50                                       *
* Date       : 31/01/00                                     *
* Developed by : 1) Mr.Tantad      Natekham      40013089   *
*              : 2) Mr.Boonyarit  Thongpool    40013095   *
*              : 3) Mr.Anujak     Jaimook       40013116   *
*              : 4) Mr.Eakachai   Dermsombool  40013160   *
*              : Electrical Engineering Department          *
*              : King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang *
*              : Bangkok Thailand                          *
*****
]

program StaticVarCompensator;
uses graph,crt,display,plotdata;
type Data = array [0..255] of real;
const Num_Samp = 256;
      pi       = 3.14159;
      base    = $300;

var

  param : array[0..60] of word;      { If two boards installed, need to
                                     declare the second parameter array }
  dat   : array[0..1535] of integer; { Conversion data buffer }
  func  : integer;
  chanel,i : integer;
  Amp_of_Va,Amp_of_Vb,Amp_of_Vc,Amp_of_Ia,Amp_of_Ib,Amp_of_Ic,
  Angle_funda_Va,Angle_funda_Vb,Angle_funda_Vc,Angle_funda_Ia,
  Angle_funda_Ib,Angle_funda_Ic,RMS_funda_Va,RMS_funda_Vb,
  RMS_funda_Vc,RMS_funda_Ia,RMS_funda_Ib,RMS_funda_Ic,
  THD_Va,THD_Vb,THD_Vc,THD_Ia,THD_Ib,THD_Ic      : real;

  Samp_Va_real,Samp_Vb_real,Samp_Vc_real,Samp_Ia_real,
  Samp_Ib_real,Samp_Ic_real,Samp_Va_Imag,Samp_Vb_Imag,Samp_Vc_Imag,
  Samp_Ia_Imag,Samp_Ib_Imag,Samp_Ic_Imag,
  Harmonic_Va,Harmonic_Vb,Harmonic_Vc,Harmonic_Ia,Harmonic_Ib,Harmonic_Ic
                                     : Data;

  PF_Phase_A,PF_Phase_b,PF_Phase_c,Angle_Ia_ref_Va,Angle_Ib_ref_Va,
  Angle_IC_ref_Va,BL_Comp_AB,BL_Comp_BC,BL_Comp_CA : real;

  Alpha_AB,Alpha_BC,Alpha_CA      : integer;

{$L 818TPF}
{$F+}
{----- pcl818 -----}

procedure pcl818(func:integer;var param:word);
  external;

{----- Check initial card -----}

procedure Check_card;
begin
  param[0] := 0;      { Board number }
  param[1] := $300;  { Base I/O address }
  param[5] := 20;    { Pacer Rate = 10M/(20*65) = 7.69 kHz }

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

param[6] := 65;
param[7] := 0;           { 0: Pacer trigger }
param[10] := ofs(dat);   { Offset of A/D data buffer A }
param[11] := seg(dat);   { 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] := 6*Num_Samp; { A/D conversion number }
param[15] := 0;         { A/D conversion start channel }
param[16] := 5;         { A/D conversion stop channel }
param[17] := 8;         { Overall gain code, 0 : +/- 10V }

{ param[45] : Error code
  param[46] : Return value 0
  param[47] : Return value 1 }

func := 3;
pcl818(func, param[0]); { Func 3 : Hardware initialization }
if (param[45] <> 0)
then
  BEGIN
    setfillstyle(1,blue);
    bar(100,200,550,300);
    setcolor(white);
    outtextxy(220,245,'*** DRIVER INITIALIZATION FAILED ***');
    repeat until keypressed;
    halt;
  END;

func := 4;
pcl818(func, param[0]); { Func 4 : A/D initialization }
if (param[45] <> 0)
then
  BEGIN
    setfillstyle(1,blue);
    bar(100,200,550,300);
    setcolor(white);
    outtextxy(220,245,'*** A/D INITIALIZATION FAILED ***');
    repeat until keypressed;
    halt;
  END;

END;

(----- A/D -----)

procedure A_D(var Samp_Va_real,Samp_Vb_real,Samp_Vc_real,Samp_Ia_real,
              Samp_Ib_real,Samp_Ic_real : data);
var
  i : integer;
  DataBuf : array[0..1535]of real;
begin
  func := 5;
  pcl818(func, param[0]); { Func 5 : "N" times of A/D trigger }
  if (param[45] <> 0)
  then
    BEGIN
      setfillstyle(1,blue);
      bar(100,200,550,300);
      setcolor(white);
      outtextxy(200,245,'*** A/D SOFTWARE DATA TRANSFER FAILED ***');
      repeat until keypressed;
      halt;
    END;

  for i := 0 to (param[14] - 1) do { Display data }
  BEGIN
    DataBuf[i] := dat[i] AND $FFF;
    DataBuf[i] := ( (10 - (-10)) * DataBuf[i] / 4096) + (-10);

    { (10 - (-10)) : A/D input range (-10V to 10V)
      4096 : Full scale 12 bit A/D data
      DataBuf[i] : A/D input data }
  END;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ส่วนไว้สำหรับ Full scale 12 bit A/D data ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

(-10)      : A/D input range "-10" V      }
END;

for i:=0 to 255 do
begin
Samp_Va_Real[i] := DataBuf[(6*i)+0]*33;      ( 36.67 is ratio of tr. )
Samp_Vb_Real[i] := DataBuf[(6*i)+1]*34.5;
Samp_Vc_Real[i] := DataBuf[(6*i)+2]*34.5;
Samp_Ia_Real[i] := DataBuf[(6*i)+3];
Samp_Ib_Real[i] := DataBuf[(6*i)+4];
Samp_Ic_Real[i] := DataBuf[(6*i)+5] ;
end;
END;

(----- FFT -----)

procedure FFT( xreal,ximag:data; n,nu:integer; var amp_of_signal,
angle_funda,RMS_funda,THD:real; var Amp_of_harmonic:data);
const twopi=6.283185;
var n2,nul,i,l,k:integer;
treal,timag,p,arg,c,s,max_sqr_sum,max_sqr,Idis : real ;

function twopower(n:integer):integer;
var i,tp : integer;
begin
tp:=1;
for i:=1 to n do
tp :=tp*2;
twopower:=tp;
end; {of twopower}

function bitrev(j,nu:integer):integer;
var i,j1,j2,k : integer;
begin
j1:=j;
k:=0;

for i:=1 to nu do
begin
j2:=j1 div 2 ;
k:=k*2+(j1-2*j2);
j1:=j2;
end;
bitrev:=k;
end; {of bitrev}

begin {fast fourier transform}
n2:=n div 2;
nul:=nu-1;
k:=0;
for l:=1 to nu do
begin
while k<n do
begin
for i:=1 to n2 do
begin
p:=bitrev(k div twopower(nul),nu);
arg:=twopi*p/n;
c:=cos(arg);
s:=sin(arg);
treal:=xreal[k+n2]*c+ximag[k+n2]*s;
timag:=ximag[k+n2]*c-xreal[k+n2]*s;
xreal[k+n2]:=xreal[k]-treal;
ximag[k+n2]:=ximag[k]-timag;
xreal[k]:=xreal[k]+treal;
ximag[k]:=ximag[k]+timag;
k:=k+1;
end;
k:=k+n2;
end;
end;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        k:=0; nul:=nul-1;
        n2:=n2 div 2;
    end;

    k:=0;
    while k<n do
    begin
        i:=bitrev(k,nu);
        if i>k then
            begin
                treal:=xreal[k];
                timag:=ximag[k];
                xreal[k]:=xreal[i];
                ximag[k]:=ximag[i];
                xreal[i]:=treal;
                ximag[i]:=timag;
            end;
        k:=k+1;
    end;

    { Correct and Display output }
    for i:=0 to (n-1) do
    begin
        xreal[i] := 2*xreal[i] / n ;
        ximag[i] := 2*ximag[i] / n ;
    end;

    max_sqr_sum := 0;
    for i:=0 to 127 do
    begin
        max_sqr      := sqr(xreal[i])+sqr(ximag[i]);
        Amp_of_harmonic[i] := sqrt(max_sqr);
        max_sqr_sum := max_sqr_sum+max_sqr;
    end;

    Amp_of_signal := sqrt(max_sqr_sum/2);
    if ximag[10] >= 0 then
    begin
        if xreal[10] >= 0 then
            begin
                Angle_funda := arctan(ximag[10]/xreal[10]);
            end
        else
            Angle_funda := pi + arctan(ximag[10]/xreal[10]);
        end;
    end;
    if ximag[10] < 0 then
    begin
        if xreal[10] >= 0 then
            begin
                Angle_funda := (2*pi) + arctan(ximag[10]/xreal[10]);
            end
        else
            Angle_funda := pi + arctan(ximag[10]/xreal[10]);
        end;
    end;

    RMS_funda := sqrt(sqr(xreal[10])+sqr(ximag[10]))/sqrt(2);
    Idis := sqrt(sqr(Amp_of_signal)-sqr(RMS_funda));
    THD := 100*(Idis/RMS_funda);

end;      { of Procedure FFT }

{----- PowerFactor -----}

Procedure PowerFactor (Angle_funda Va,Angle_funda Vb,Angle_funda Vc,
    Angle_funda Ia,Angle_funda Ib,Angle_funda Ic : real;
    Var PF_Phase A,PF_Phase b,PF_Phase c,Angle_Ia_ref Va,
    Angle_Ib_ref Va,Angle_Ic_ref Va : real);

```

begin เป็นเอกสารทศวงนเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 angle Va Ia := Angle_funda Ia - Angle_funda Va;
 ไม่วกรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่นและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

angle_Vb_Ib := Angle_funda_Ib - Angle_funda_Vb;
angle_Vc_Ic := Angle_funda_Ic - Angle_funda_Vc;

PF_Phase_A := cos(angle_Va_Ia);
PF_Phase_B := cos(angle_Vb_Ib);
PF_Phase_C := cos(angle_Vc_Ic);

Angle_Ia_ref_Va := (angle_Va_Ia);
Angle_Ib_ref_Va := (2/3*pi) + (angle_Vb_Ib);
Angle_Ic_ref_Va := (4/3*pi) + (angle_Vc_Ic);

end;          { of PowerFactor }

(----- SUS_Calculate -----)

procedure SUS_Calculate (RMS_Va,RMS_funda_Ia,RMS_funda_Ib,RMS_funda_Ic,
                        Angle_Ia_refer_to_Va,Angle_Ib_refer_to_Va,
                        Angle_Ic_refer_to_Va          : real;
                        var comp_ab,comp_bc,comp_ca    : real);
var
  Ia_load_real,Ia_load_imag,Ib_load_real,Ib_load_imag,
  Ic_load_real,Ic_load_imag                          : real;
  A0,A1,A2                                           : real;

begin
  Ia_load_real := RMS_funda_Ia * cos(- Angle_Ia_refer_to_Va);
  Ia_load_imag := RMS_funda_Ia * sin(- Angle_Ia_refer_to_Va);
  Ib_load_real := RMS_funda_Ib * cos(- Angle_Ib_refer_to_Va);
  Ib_load_imag := RMS_funda_Ib * sin(- Angle_Ib_refer_to_Va);
  Ic_load_real := RMS_funda_Ic * cos(- Angle_Ic_refer_to_Va);
  Ic_load_imag := RMS_funda_Ic * sin(- Angle_Ic_refer_to_Va);

  A0 := Ia_load_imag;
  A1 := (-0.5*Ib_load_imag)+(0.8660254*Ib_load_real);
  A2 := (-0.5*Ic_load_imag)+(-0.8660254*Ic_load_real);

  comp_ab := -(A0+A1-A2) / (3*RMS_Va);
  comp_bc := -(-A0+A1+A2)/(3*RMS_Va);
  comp_ca := -(A0-A1+A2) / (3*RMS_Va);

end;          { of SUS_Calculate }

(----- Table -----)

procedure Alpha_Calculate(Br : real; var Alpha : integer);
const XL = 62.83285;          { L = 200 mH }
      Bc = 0.009122;
var
  sigma      : integer;
  BL_sigma,BL : real;
begin
  BL_sigma := Br + Bc;
  sigma := 0;
  repeat
    BL := ((sigma*pi/180)-sin(sigma*pi/180))/(pi*XL);
    sigma := sigma+1;
  until (BL > BL_sigma);

Alpha := (180 - (sigma div 2));
end;          { of table }

(----- Dig_Out_Port -----)

procedure Dig_Out_Port(Alpha_AB,Alpha_BC,Alpha_CA : integer );

begin
  port[base+11] := 3;          {For AB}
  port[base+3] := round(Alpha_AB * 1.416);
  delay(100);

```

```

port[base+11] := 1;                               {For BC}
port[base+3]  := round(Alpha_BC * 1.416);
delay(100);

port[base+11] := 2;                               {For CA}
port[base+3]  := round(Alpha_CA * 1.416);
delay(100);

end;        { of Dig_out_Port }

{----- PlotVoltageSignal -----}

procedure PlotVoltageSignal(Samp_Va,Samp_Vb,Samp_Vc : data);
const x1 =25; Y1=50; x2=345; Y2=170;
var
  VP : ViewPortType;
  OriginX,OriginY                                     : integer;
  OldPointX_Va,OldPointY_Va,OldPointX_Vb,OldPointY_Vb,
  OldPointX_Vc,OldPointY_Vc                         : integer;
  Px_Va,Py_Va,Px_Vb,Py_Vb,Px_Vc,Py_Vc              : integer;
  i : integer;
  x,y,z : real;
begin
  GetViewSettings( VP );
  SetViewPort( x1, y1, x2, y2, true );
  setfillstyle(1,black);
  bar(38,18,328,92);

  OriginX := 38;
  OriginY := 55;
  OldPointX_Va := OriginX;
  OldPointY_Va := OriginY;
  OldPointX_Vb := OriginX;
  OldPointY_Vb := OriginY;
  OldPointX_Vc := OriginX;
  OldPointY_Vc := OriginY;
  for i:=0 to 255 do
  begin
    x := Samp_Va[i];
    Py_Va := OriginY - round(x*(28/200));
    Px_Va := OriginX + (i*3);
    setcolor(lightred);
    line(OldpointX_Va,OldPointY_Va,Px_Va,Py_Va);
    OldPointX_Va := Px_Va;
    OldPointY_Va := Py_Va;

    y := Samp_Vb[i];
    Py_Vb := OriginY - round(y*(28/200));
    Px_Vb := OriginX + (i*3);
    setcolor(lightblue);
    line(OldpointX_Vb,OldPointY_Vb,Px_Vb,Py_Vb);
    OldPointX_Vb := Px_Vb;
    OldPointY_Vb := Py_Vb;

    z := Samp_Vc[i];
    Py_Vc := OriginY - round(z*(28/200));
    Px_Vc := OriginX + (i*3);
    setcolor(yellow);
    line(OldpointX_Vc,OldPointY_Vc,Px_Vc,Py_Vc);
    OldPointX_Vc := Px_Vc;
    OldPointY_Vc := Py_Vc;
  end;
  setcolor(white);
  Plot1.DrawHGridLine(0);

  with VP do
    SetViewPort( x1, y1, x2, y2, true);
end;        { of PlotVoltageSignal }

```

```

procedure PlotCurrentSignal(Samp_Ia,Samp_Ib,Samp_Ic : data);
const x1 =25; Y1=180; x2=345; Y2=300;
var
  VP : ViewPortType;
  OriginX,OriginY                                     : integer;
  OldPointX_Ia,OldPointY_Ia,OldPointX_Ib,OldPointY_Ib,
  OldPointX_Ic,OldPointY_Ic                         : integer;
  Px_Ia,Py_Ia,Px_Ib,Py_Ib,Px_Ic,Py_Ic              : integer;
  i : integer;
  x,y,z : real;
begin
  GetViewSettings( VP );
  SetViewPort( x1, y1, x2, y2, true );
  setfillstyle(1,black);
  bar(32,18,328,92);

  OriginX := 32;
  OriginY := 55;
  OldPointX_Ia := OriginX;
  OldPointY_Ia := OriginY;
  OldPointX_Ib := OriginX;
  OldPointY_Ib := OriginY;
  OldPointX_Ic := OriginX;
  OldPointY_Ic := OriginY;
  for i:=0 to 255 do
  begin
    x := Samp_Ia[i];
    Py_Ia := OriginY - round(x*(35/10));
    Px_Ia := OriginX + (i*3);
    setcolor(lightred);
    line(OldpointX_Ia,OldPointY_Ia,Px_Ia,Py_Ia);
    OldPointX_Ia := Px_Ia;
    OldPointY_Ia := Py_Ia;

    y := Samp_Ib[i];
    Py_Ib := OriginY - round(y*(35/10));
    Px_Ib := OriginX + (i*3);
    setcolor(lightblue);
    line(OldpointX_Ib,OldPointY_Ib,Px_Ib,Py_Ib);
    OldPointX_Ib := Px_Ib;
    OldPointY_Ib := Py_Ib;

    z := Samp_Ic[i];
    Py_Ic := OriginY - round(z*(35/10));
    Px_Ic := OriginX + (i*3);
    setcolor(yellow);
    line(OldpointX_Ic,OldPointY_Ic,Px_Ic,Py_Ic);
    OldPointX_Ic := Px_Ic;
    OldPointY_Ic := Py_Ic;
  end;
  setcolor(white);
  Plot2.DrawHGridLine(0);

  with VP do
    SetViewPort( x1, y1, x2, y2, true);
end;
  { of PlotCurrentSignal }

```

```

(----- PlotHarmonic -----)

```

```

Procedure PlotHarmonic(Harmonic_Va,Harmonic_Vb,Harmonic_Vc : data);

```

```

const x1 =25; Y1=310; x2=350; Y2=440;

```

```

var

```

```

  VP : ViewPortType;
  OriginX,OriginY                                     : integer;
  OldPointX_A,OldPointY_A,OldPointX_B,OldPointY_B,
  OldPointX_C,OldPointY_C                         : integer;
  Px_A,Py_A,Px_B,Py_B,Px_C,Py_C                 : integer;
  i : integer;
  x,y,z : real;

```

```

begin

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

GetViewSettings( VP );
SetViewport( x1, y1, x2, y2, true );
setfillstyle(1,black);
bar(32,18,322,102);

OriginX := 32;
OriginY := 103;

for i:=0 to 8 do
begin
x := Harmonic_Va[i*10];
Py_A := OriginY - round(x*(80/200));
Px_A := OriginX + round(i*32);
setcolor(lightred);
line(Px_A,OriginY,Px_A,Py_A);
line(Px_A+1,OriginY,Px_A+1,Py_A);

y := Harmonic_Vb[i*10];
Py_B := OriginY - round(y*(80/200));
Px_B := OriginX + round(i*32+3);
setcolor(lightblue);
line(Px_B,OriginY,Px_B,Py_B);
line(Px_B+1,OriginY,Px_B+1,Py_B);

z := Harmonic_Vc[i*10];
Py_C := OriginY - round(z*(80/200));
Px_C := OriginX + round(i*32+6);
setcolor(yellow);
line(Px_C,OriginY,Px_C,Py_C);
line(Px_C+1,OriginY,Px_C+1,Py_C);
end;

setcolor(white);
Plot3.DrawHGridLine(100);

with VP do
SetViewport( x1, y1, x2, y2, true);
end;
{ of PlotHarmonics }

{----- Main Program -----}
BEGIN
{ **** MAIN PROGRAM **** }
detectgraph (device, mode);
initgraph (device, mode, '');
Mainwindow;
plotgraph;
setviewport(0,0,getmaxx,getmaxy,true);
Check_Card;
Repeat
begin
Drawdate;
DrawTime;
A_D(Samp_Va_real,Samp_Vb_real,Samp_Vc_real,Samp_Ia_real,
Samp_Ib_real,Samp_Ic_real);

FFT(Samp_Va_real,Samp_Va_Imag,256,8,Amp_of_Va,Angle_funda_Va,RMS_Funda_Va,THD_Va,Ha
rmonic_Va);
expressvalue(455,62,Amp_of_Va,lightred);
expressvalue(455,342,Harmonic_Va[10],lightred);
expressvalue(455,362,Harmonic_Va[30],lightred);
expressvalue(455,382,Harmonic_Va[50],lightred);
expressvalue(455,402,Harmonic_Va[70],lightred);
expressvalue(455,435,THD_Va,lightred);

```

```

FFT(Samp_Vb_real,Samp_Vb_Imag,256,8,Amp_of_Vb,Angle_funda_Vb,RMS_Funda_Vb,THD_Vb,Harmonic_Vb);
    expressvalue(455,86,Amp_of_Vb,lightblue);
    expressvalue(515,342,Harmonic_Vb[10],lightblue);
    expressvalue(515,362,Harmonic_Vb[30],lightblue);
    expressvalue(515,382,Harmonic_Vb[50],lightblue);
    expressvalue(515,402,Harmonic_Vb[70],lightblue);
    expressvalue(515,435,THD_Vb,lightblue);

```

```

FFT(Samp_Vc_real,Samp_Vc_Imag,256,8,Amp_of_Vc,Angle_funda_Vc,RMS_Funda_Vc,THD_Vc,Harmonic_Vc);
    expressvalue(455,111,Amp_of_Vc,yellow);
    expressvalue(575,342,Harmonic_Vc[10],yellow);
    expressvalue(575,362,Harmonic_Vc[30],yellow);
    expressvalue(575,382,Harmonic_Vc[50],yellow);
    expressvalue(575,402,Harmonic_Vc[70],yellow);
    expressvalue(575,435,THD_Vc,yellow);

```

```

FFT(Samp_Ia_real,Samp_Ia_Imag,256,8,Amp_of_Ia,Angle_funda_Ia,RMS_Funda_Ia,THD_Ia,Harmonic_Ia);
    expressvalue(455,201,Amp_of_Ia,lightred);

```

```

FFT(Samp_Ib_real,Samp_Ib_Imag,256,8,Amp_of_Ib,Angle_funda_Ib,RMS_Funda_Ib,THD_Ib,Harmonic_Ib);
    expressvalue(455,226,Amp_of_Ib,lightblue);

```

```

FFT(Samp_Ic_real,Samp_Ic_Imag,256,8,Amp_of_Ic,Angle_funda_Ic,RMS_Funda_Ic,THD_Ic,Harmonic_Ic);
    expressvalue(455,251,Amp_of_Ic,yellow);

```

```

if (Amp_of_Va > 120) and (Amp_of_Vb > 120) and (Amp_of_Vc > 120) then
begin

```

```

PlotVoltageSignal(Samp_Va_real,Samp_Vb_real,Samp_Vc_real);
setviewport(0,0,getmaxx,getmaxy,true);

```

```

PlotCurrentSignal(Samp_Ia_real,Samp_Ib_real,Samp_Ic_real);
setviewport(0,0,getmaxx,getmaxy,true);

```

```

PlotHarmonic(Harmonic_Va,Harmonic_Vb,Harmonic_Vc);
SetViewport(0,0,GetMaxX,GetMaxY,true);

```

```

PowerFactor (Angle_funda_Va,Angle_funda_Vb,Angle_funda_Vc,Angle_funda_Ia,
Angle_funda_Ib,Angle_funda_Ic,PF_Phase_A,PF_Phase_B,
PF_Phase_C,Angle_Ia_ref_Va,Angle_Ib_ref_Va,Angle_Ic_ref_Va);
    expressvalue(555,62,PF_Phase_A,lightred);
    expressvalue(555,87,PF_Phase_B,lightblue);
    expressvalue(555,112,PF_Phase_C,yellow);

```

```

SUS_Calculate (RMS_Funda_Va,RMS_Funda_Ia,RMS_Funda_Ib,RMS_Funda_Ic,
Angle_Ia_ref_Va,Angle_Ib_ref_Va,Angle_Ic_ref_Va,
BL_Comp_AB,BL_Comp_BC,BL_Comp_CA);
    expressBL(553,152,BL_Comp_AB,lightred);
    expressBL(553,177,BL_Comp_BC,lightblue);
    expressBL(553,202,BL_Comp_CA,yellow);

```

```

Alpha_Calculate(BL_Comp_AB,Alpha_AB);
Alpha_calculate(BL_Comp_BC,Alpha_BC);
Alpha_Calculate(BL_Comp_CA,Alpha_CA);
    expressvalue(563,242,Alpha_AB,lightred);
+ bar(580,242,595,253);
    expressvalue(563,267,Alpha_BC,lightblue);
    bar(580,267,595,278);
    expressvalue(563,292,Alpha_CA,yellow);
    bar(580,292,595,303);

```

```

Dig_Out_Port (Alpha_AB,Alpha_BC,Alpha_CA);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay(2000);
end; { if Amp_of_Va > 120 }

if keypressed=true then
begin
key := readkey;
if key = 'e' then
begin
drawbutton(50,457,90,20,false);
setfillstyle(1,red);
bar(55,460,135,473);
outtextxy(60,460,'Exit [E]');
delay(300);
{ Clear output before close program }
Dig_Out_Port(180,180,180);
halt; { exit program }
end;

if key = 'h' then
begin
drawbutton(145,457,90,20,false);
setfillstyle(1,green);
bar(150,460,230,473);
outtextxy(155,460,'Hold [H]');
delay(300);

drawbutton(145,457,90,20,true);
setfillstyle(1,green);
bar(150,460,230,473);
outtextxy(155,460,'Hold [H]');

repeat key:=readkey until key = 'c';
drawbutton(240,457,90,20,false);
setfillstyle(1,13);
bar(245,460,325,473);
outtextxy(250,460,'Continue [C]');
delay(300);

drawbutton(240,457,90,20,true);
setfillstyle(1,13);
bar(245,460,325,473);
outtextxy(250,460,'Continue [C]');
end;
end;
end;
until (Amp_of_Ia = Amp_of_Ib) and (Amp_of_Ib = Amp_of_Ic);
{ End of loop main program }
END. { of MAIN PROGRAM }

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
*****
* Unit      : display
* Description : Program for SVC ,TCR type, Using PCL-818 pacer
*            trigger A/D conversion with software data
*            transfer.
* Revision   : 3.50
* Date       : 31/01/00
* Developed by : 1) Mr.Tantad      Natekham      40013089
*              2) Mr.Boonyarit    Thongpool    40013095
*              3) Mr.Anujak       Jaimook     40013116
*              4) Mr.Eakachai     Dermsombool 40013160
*            Electrical Engineering Department
*            King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
*            Bangkok Thailand
*****
}
unit display;

interface

uses crt, graph,dos,plotdata;

var
  device, mode      : integer;
  color,wincolor    : word;
  anykey,key        : char;
  Plot1,Plot2,Plot3 : Plot;
  LB, RB, TB, BB    : integer;

procedure MainWindow;
procedure ExpressValue(x,y : integer; value : real; color : word);
procedure ExpressBL(x,y : integer; value : real; color : word);
procedure PlotGraph;
procedure DrawButton (x,y,width,height:integer;raised:boolean);
procedure DrawTime;
procedure DrawDate;

{----- DrawDate -----}

```

IMPLEMENTATION

```

procedure DrawDate;
var
  s:string[4];
  date:string[8];
  year,month,day,dayofweek:word;
begin
  getdate(year,month,day,dayofweek);
  str(day,s);
  date:=s+'/';
  str(month,s);
  if month>9

```

เอกสารนี้เป็นส่วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

then
  date:=date+s
else
  date:=date+'0'+s;
str(year,s);
date:=date+'/'+copy(s,3,2);
setfillstyle(1,lightgray);
bar(545,454,600,500);
setcolor(white);
outtextxy(550,455,date);
end;

```

```

{----- DrawTime -----}

```

```

procedure DrawTime;
var
  s:string[2];
  ampm:string[3];
  time:string[8];
  hour,minute,second,sec100:word;
begin
  gettime(hour,minute,second,sec100);
  if hour>12
  then
    begin
      ampm:=' PM';
      hour:=hour-12;
    end
  else
    ampm:=' AM';
  str(hour,s);
  if hour>9
  then
    time:=s+': '
  else
    time:='0'+s+': ';
  str(minute,s);
  if minute>9
  then
    time:=time+s
  else
    time:=time+'0'+s;
  time:=time+ampm;
  setcolor(white);
  outtextxy(550,465,time);
end;

```

```

{----- DrawWindow -----}

```

```

procedure DrawWindow(x,y,width,height:integer);
begin
  setfillstyle(solidfill,wincolor);
  bar(x,y,x+width,y+height);
  setcolor(white);
  line(x+1,y+1,x+width-2,y+1);
  line(x+1,y+1,x+1,y+height-2);
  setcolor(darkgray);
  line(x+1,y+height-1,x+width-1,y+height-1);
  line(x+width-1,y+1,x+width-1,y+height-1);
  setcolor(black);
  line(x,y+height,x+width,y+height);
  line(x+width,y,x+width,y+height);
end;

```

```

{----- DrawButton -----}

```

```

procedure DrawButton(x,y,width,height:integer;raised:boolean);
begin
  setfillstyle(solidfill,wincolor);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเพิ่มเติมเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

bar(x,y,x+width,y+height);
if raised
then
begin
setcolor (white);
line(x,y,x+width-1,y);
line(x,y,x,y+height-1);
setcolor (darkgray);
line(x+1,y+height-1,x+width-1,y+height-1); { make button look up }
line(x+width-1,y+1,x+width-1,y+height-1);
setcolor (black);
line(x,y+height,x+width,y+height);
line(x+width,y,x+width,y+height);
end
else
begin
setcolor (black);
line(x,y,x+width-1,y);
line(x,y,x,y+height-1);
setcolor (darkgray);
line(x+1,y+1,x+width-2,y+1); { make button look down }
line(x+1,y+1,x+1,y+height-2);
setcolor (white);
line(x,y+height,x+width,y+height);
line(x+width,y,x+width,y+height);
end;
end;

{----- icons -----}

procedure icons;
begin
setcolor (blue);
SetTextStyle(Defaultfont, horizdir,1 ); { help icon }
outtextxy(380,64,'Va');
outtextxy(380,89,'Vb');
outtextxy(380,114,'Vc');
outtextxy(380,204,'Ia');
outtextxy(380,229,'Ib');
outtextxy(380,254,'Ic');
outtextxy(380,344,'Va');
outtextxy(380,369,'Vb');
outtextxy(380,394,'Vc');
setfillstyle(1,lightred); { sign of signal }
bar(400,64,410,70);
bar(400,204,410,210);
bar(400,344,410,350);
setfillstyle(1,lightblue);
bar(400,89,410,95);
bar(400,229,410,235);
bar(400,369,410,375);
setfillstyle(1,yellow);
bar(400,114,410,120);
bar(400,254,410,260);
bar(400,394,410,400);

setcolor (black);
SetTextStyle(SmallFont, horizdir,4 ); { help icon }
setfillstyle(1,red);
bar(55,460,135,473);
outtextxy(60,460,'Exit [E]');
setfillstyle(1,green);
bar(150,460,230,473);
outtextxy(155,460,'Hold [H]');
setfillstyle(1,13);
bar(245,460,325,473);
outtextxy(250,460,'Continue [C]');
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 {----- DrawLine -----}
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

procedure DrawLine(x,y,width,height:integer);
begin
  setcolor(8);
  line(x,y,width,height);
  setcolor(white);
  line(x+1,y+1,width+1,height+1);
end;

{----- MainWindow -----}

Procedure MainWindow;
begin
  wincolor:=lightgray;
  DrawWindow(10,10,620,480);      { main window }
  SetFillStyle(solidfill,4);
  bar(15,15,625,35);             { top (blue) bar }
  drawline(15,39,625,39);        { line parallel horiz.}
  drawline(15,41,625,41);

  drawline(520,41,520,310);      { line verti. }
  drawline(15,450,625,450);      { line horiz. buttom }
  drawline(15,452,625,452);
  setcolor(14);
  outtextxy(25,20,'Static VAR Compensator [SVC : TCR]');
  drawbutton(20,46,340,400,false); { for area plot graph }

  drawline(365,175,515,175);     { line block }
  drawline(365,310,625,310);

  { for classify signal }
  drawbutton(370,60,45,15,false); { Va }
  drawbutton(370,85,45,15,false); { Vb }
  drawbutton(370,110,45,15,false); { Vc }
  drawbutton(370,200,45,15,false); { Ia }
  drawbutton(370,225,45,15,false); { Ib }
  drawbutton(370,250,45,15,false); { Ic }
  drawbutton(370,340,45,15,false); { Va }
  drawbutton(370,365,45,15,false); { Vb }
  drawbutton(370,390,45,15,false); { Vc }

  { for hold / continue / exit program }
  drawbutton(50,457,90,20,true);  { exit }
  drawbutton(145,457,90,20,true); { hold }
  drawbutton(240,457,90,20,true); { continue }

  { for express value of signal }
  drawbutton(450,60,50,15,false); { Va }
  drawbutton(450,85,50,15,false); { Vb }
  drawbutton(450,110,50,15,false); { Vc }
  drawbutton(450,200,50,15,false); { Ia }
  drawbutton(450,225,50,15,false); { Ib }
  drawbutton(450,250,50,15,false); { Ic }
  drawbutton(450,340,50,15,false); { Va 1st }
  drawbutton(450,360,50,15,false); { Va 3rd }
  drawbutton(450,380,50,15,false); { Va 5th }
  drawbutton(450,400,50,15,false); { Va 7th }
  drawbutton(510,340,50,15,false); { Vb 1st }
  drawbutton(510,360,50,15,false); { Vb 3rd }
  drawbutton(510,380,50,15,false); { Vb 5th }
  drawbutton(510,400,50,15,false); { Vb 7th }
  drawbutton(570,340,50,15,false); { Vc 1st }
  drawbutton(570,360,50,15,false); { Vc 3rd }
  drawbutton(570,380,50,15,false); { Vc 5th }
  drawbutton(570,400,50,15,false); { Vc 7th }
  drawbutton(450,433,50,15,false); { Va THD }
  drawbutton(510,433,50,15,false); { Vb THD }
  drawbutton(570,433,50,15,false); { Vc THD }

  { for express value of system }
  drawbutton(550,60,50,15,false); { P.F. A }
  drawbutton(550,85,50,15,false); { P.F. B }

```

```

drawbutton(550,110,50,15,false); { P.F. C }
drawbutton(550,150,50,15,false); { BL. AB }
drawbutton(550,175,50,15,false); { BL. BC }
drawbutton(550,200,50,15,false); { BL. CA }
drawbutton(550,240,50,15,false); { Angle trig AB }
drawbutton(550,265,50,15,false); { Angle trig BC }
drawbutton(550,290,50,15,false); { Angle trig CA }

```

```

setcolor(14);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,4);
OutTextXY(420,13,' Electrical Engineering Dept. KMIT L');
OutTextXY(420,23,' *** PMC GROUP *** ');
setcolor(black);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,4);
OutTextXY(536,45,' Power Factor');
OutTextXY(530,60,'A');
OutTextXY(530,85,'B');
OutTextXY(530,110,'C');
OutTextXY(530,135,'BL Compensated');
OutTextXY(530,150,'AB');
OutTextXY(530,175,'BC');
OutTextXY(530,200,'CA');
OutTextXY(535,225,' Firing Angle');
OutTextXY(530,240,'AB');
OutTextXY(530,265,'BC');
OutTextXY(530,290,'CA');

```

```

OutTextXY(450,45,' Voltage');
OutTextXY(430,60,'Va');
OutTextXY(430,85,'Vb');
OutTextXY(430,110,'Vc');
OutTextXY(440,185,'Load Current');
OutTextXY(430,200,'Ia');
OutTextXY(430,225,'Ib');
OutTextXY(430,250,'Ic');
OutTextXY(495,312,' Harmonics');
OutTextXY(470,325,'Va');
OutTextXY(530,325,'Vb');
OutTextXY(590,325,'Vc');
OutTextXY(428,340,'1st');
OutTextXY(428,360,'3rd');
OutTextXY(428,380,'5th');
OutTextXY(428,400,'7th');
OutTextXY(450,418,' % Total Harmonic Distortion');

```

```

icons;

```

```

end;

```

```

{----- ExpressValue -----}

```

```

procedure ExpressValue(x,y : integer; value : real; color : word);
var ValueText : string[6];
begin
  setfillstyle(1,lightgray);
  bar(x-3,y+1,x+35,y+10);
  setcolor(color);
  Str(Value:6:2,ValueText);
  OuttextXY(x,y,ValueText);
end;

```

```

{----- ExpressBL -----}

```

```

procedure ExpressBL(x,y : integer; value : real; color : word);
var ValueText : string[10];
begin
  setfillstyle(1,lightgray);
  bar(x-1,y+1,x+45,y+10);
  setcolor(color);
  Str(Value:7:5,ValueText);
  OuttextXY(x,y,ValueText);

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

```
end;
```

```
{----- PlotGraph -----}
```

```
procedure PlotGraph;
begin
```

```
  setcolor(white);
  {border of 50}
  LB := 25;
  RB := 355;
  TB := 50;
  BB := 170;
```

```
  Plot1.Init(-200, 200, 1, 0, 80, 1, LB, RB, TB, BB, 1, 0, 1, 0,
    'VOLTAGE SIGNALS', 'Time (ms)',
    'Amplitude [V]', false);
```

```
  {Draw the limits, label them}
```

```
  Plot1.DrawHGridLine(0);
  Plot1.DrawHGridLine(199.99);
  Plot1.DrawVGridLine(79.99);
  Plot1.PlaceXAxisValue(10);
  Plot1.PlaceXAxisValue(20);
  Plot1.PlaceXAxisValue(30);
  Plot1.PlaceXAxisValue(40);
  Plot1.PlaceXAxisValue(50);
  Plot1.PlaceXAxisValue(60);
  Plot1.PlaceXAxisValue(70);
  Plot1.PlaceXAxisValue(80);
  Plot1.PlaceYAxisValue(0);
```

```
{-----}
```

```
  LB := 25;
  RB := 355;
  TB := 180;
  BB := 300;
```

```
  Plot2.Init(-10, 10, 1, 0, 80, 1, LB, RB, TB, BB, 1, 0, 1, 0,
    'CURRENT SIGNALS', 'Time (ms)',
    'Amplitude [A]', false);
```

```
  Plot2.DrawHGridLine(0);
  Plot2.DrawHGridLine(9.99);
  Plot2.PlaceXAxisValue(10);
  Plot2.PlaceXAxisValue(20);
  Plot2.PlaceXAxisValue(30);
  Plot2.PlaceXAxisValue(40);
  Plot2.PlaceXAxisValue(50);
  Plot2.PlaceXAxisValue(60);
  Plot2.PlaceXAxisValue(70);
  Plot2.PlaceXAxisValue(80);
```

```
  Plot2.PlaceYAxisValue(0);
```

```
{-----}
```

```
  LB := 25;
  RB := 355;
  TB := 310;
  BB := 440;
```

```
  Plot3.Init(0, 200, 1, 0, 9, 1, LB, RB, TB, BB, 1, 0, 1, 0,
    'HARMONICS ORDERS', 'Orders',
    'Amplitude [V]', false);
```

```
  Plot3.DrawHGridLine(100);
  Plot3.DrawHGridLine(199.99);
  Plot3.PlaceXAxisValue(1);
  Plot3.PlaceXAxisValue(2);
  Plot3.PlaceXAxisValue(3);
```

เอกสารนี้
ไม่ผ่านการแก้ไข
ไม่ผ่านการแก้ไข

```

Plot3.PlaceXAxisValue (4);
Plot3.PlaceXAxisValue (5);
Plot3.PlaceXAxisValue (6);
Plot3.PlaceXAxisValue (7);
Plot3.PlaceXAxisValue (8);
Plot3.PlaceXAxisValue (8.99);
Plot3.PlaceYAxisValue (100);
end;

END.

```

```

(
*****
* Unit      : PlotData
* Description : Program for SVC ,TCR type, Using PCL-818 pacer
*            : trigger A/D conversion with software data
*            : transfer.
* Revision  : 3.50
* Date      : 31/01/00
* Developed by : 1) Mr.Tantad      Natekham      40013089
*              2) Mr.Boonyarit    Thongpool     40013095
*              3) Mr.Anujak       Jaimook      40013116
*              4) Mr.Eakachai     Derrmsombool 40013160
*            : Electrical Engineering Department
*            : King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
*            : Bangkok Thailand
*****
)
unit PlotData;

interface

uses Graph,Crt;

const

LBuf  = 4 ; { lift border " buffer" }
RBuf  = 4 ; { right border }
TBuf  = 4 ; { tob border }
BBuf  = 4 ; { bottom border }
left  = 3 ;
right = 1 ;
top   = 0 ;
bottom = 2 ;

type
data = array [0..255] of real;
plot = object
  x1,x2,y1,y2 : integer; { viewport left,right,top,bottom }
  Mnx,Mny,Mxx,Mxy : real; { min/max x , min/max y }
  XW,XD,YW,YD : integer;
  XSFac,YSFac : real;
  XLabel : string;
  YLabel : string;
  PlotTitle : string;
  OriginX : integer; { viewport x coord of origin }
  OriginY : integer; { viewport y coord of origin }
  MaxXAxis : integer;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานในโครงการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือวัดไฟฟ้าให้แม่นยำขึ้น
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MaxYAxis : integer;
DeltaXAxis : integer;
DeltaYAxis : integer;
DeltaX : real;
DeltaY : real;
PlotEnabled : boolean;
procedure Init (miny,maxy,ysf,minx,maxx,ksf : real;
               lft,rt,tp,btm,wx,dx,wy,dy : integer;
               ptitle,xlbl,ylbl : string;
               penbl : boolean);
procedure DrawHGridLine(y : real);
procedure DrawVGridLine(x : real);
procedure PlaceXAxisValue(r : real);
procedure PlaceYAxisValue(r : real);
procedure DrawTickMark(x,y : integer);
end;

```

implementation

```

procedure plot.Init (miny,maxy,ysf,minx,maxx,ksf : real;
                   lft,rt,tp,btm,wx,dx,wy,dy : integer;
                   ptitle,xlbl,ylbl : string;
                   penbl : boolean);
var
LBorder,THeight : integer;
VP : ViewPortType;
TST : TextSettingsType;
s : array[0..3] of string[11];
begin
  XW := wx; XD := dx;
  YW := wy; YD := dy;
  XSFac := ksf;
  YSFac := ysf;
  Xlabel := xlabel;
  Ylabel := ylabel;
  PlotTitle := ptitle;
  x1 := lft;
  x2 := rt;
  y1 := tp;
  y2 := btm;
  Mnx := minx*ksf;
  Mxx := maxx*ksf;
  Mny := miny*ysf;
  Mxy := maxy*ysf;
  DeltaX := Mxx - Mnx;
  DeltaY := Mxy - Mny;
  Str (maxx:XW:XD, s[right]);
  Str (maxy:YW:YD, s[top]);
  Str (minx:XW:XD, s[left]);
  Str (miny:YW:YD, s[bottom]);
  THeight := TextHeight (s[0]);
  if TextWidth (s[top]) < TextWidth (s[bottom]) then
    LBorder := TextWidth (s[bottom])
  else
    LBorder := TextWidth (s[top]);
  SetViewPort (lft,tp,rt,btm,true);
  if GraphResult = grError then
    OutTextXY (0,0,'Input error to SetViewPort in Plot.Init');
  GetViewSettings (VP);
  with VP do
  begin
    {next line is for color monitors}
    SetFillStyle (SolidFill,black); { color background }
    Rectangle (0,0,x2-x1,y2-y1);
    FloodFill (1,1,GetMaxColor);
    OriginY := y2-y1-2*(BBuf+THeight);
    OriginX := LBuf+LBorder+THeight;
    MaxYAxis := TBuf+(3*THeight div 2);

```

```

MaxXAxis := x2-x1-RBuf-(TextWidth(s[right]) div 2);
DeltaXAxis := MaxXAxis - OriginX;
DeltaYAxis := OriginY - MaxYAxis;

```

```

GetTextSettings( TST );

```

```

with TST do

```

```

begin

```

```

  SetTextStyle(SmallFont, HorizDir, 4);
  line( OriginX, MaxYAxis, OriginX, OriginY);
  SetTextJustify(RightText, BottomText);
  MoveTo(OriginX, OriginY);
  OutText(s[bottom]);
  MoveTo(OriginX, TBuf+(2*THeight));
  OutText(s[Top]);

```

```

  line( OriginX, OriginY, MaxXAxis, OriginY);
  SetTextJustify(CenterText, BottomText);
  MoveTo(OriginX, y2-y1-BBuf-THeight);
  OutText(s[left]);
  MoveTo(MaxXAxis, y2-y1-BBuf-THeight);
  OutText(s[right]);

```

```

  MoveTo(OriginX+DeltaXAxis div 2, y2-y1-BBuf);
  OutText(XLabel);
  SetTextStyle(SmallFont, VertDir, 4);
  MoveTo(LBuf+(THeight div 2), OriginY-(DeltaYAxis div 2));
  SetTextJustify(CenterText, CenterText);
  OutText(YLabel);
  SetColor(Yellow);
  SetTextStyle(SmallFont, Direction, 4);
  MoveTo((x2-x1) div 2, TBuf+(THeight div 2));
  OutText(PlotTitle);
  SetTextJustify(Horiz, Vert);
  SetColor(White);

```

```

end;

```

```

end;

```

```

end;

```

```

{----- Plot.DrawHGridLine -----}

```

```

procedure Plot.DrawHGridLine( y : real );

```

```

var

```

```

  VP : ViewPortType;

```

```

  LST : LineSettingsType;

```

```

  py : integer;

```

```

begin

```

```

  GetViewSettings( VP );

```

```

  SetViewPort( x1, y1, x2, y2, true);

```

```

  if (y > mny) and (y < mxy) then

```

```

  begin

```

```

    py := OriginY-Round(((y-mny)/DeltaY)*DeltaYAxis);

```

```

    GetLineSettings( LST );

```

```

    with LST do

```

```

      begin

```

```

        SetLineStyle( DottedLn, Pattern, NormWidth);

```

```

        Line( OriginX, Py, MaxXAxis, py);

```

```

        SetLineStyle( LineStyle, Pattern, Thickness );

```

```

      end;

```

```

    end;

```

```

  with VP do

```

```

    SetViewPort( x1, y1, X2, Y2, true);

```

```

end;

```

```

{----- Plot.DrawVGridLine -----}

```

```

procedure Plot.DrawVGridLine( x : real);

```

```

var

```

```

  VP : ViewPortType;

```

```

  LST : LineSettingsType;

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ จังหวัดปทุมธานี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

px : integer;
begin
  GetViewSettings( VP );
  SetViewPort( x1, y1, x2, y2 ,true );
  if (x > mnx) and (x < mxx) then
    begin
      px := OriginX+Round(((x-mnx)/DeltaX)*DeltaXAxis);
      GetLineSettings( LST );
      with LST do
        begin
          SetLineStyle( DottedLn, Pattern, NormWidth);
          Line( px, OriginY, px, MaxYAxis);
          SetLineStyle( LineStyle, Pattern, Thickness );
        end;
      end;
    with VP do
      SetViewPort( x1, y1, X2, Y2, true);
    end;
  {----- Plot.DrawTickMark -----}

procedure Plot.DrawTickMark( x,y : integer);
var
  VP : ViewPortType;
begin
  GetViewSettings( VP );
  SetViewPort( x1, y1, x2, y2,true );
  PutPixel( x, y, GetColor);
  PutPixel( x+1, y, GetColor);
  PutPixel( x, y+1, GetColor);
  PutPixel( x+1, y+1, GetColor);
  with VP do
    SetViewPort( x1, y1, x2, y2,true );
  end;
  {----- Plot.PlaceXAxisValue -----}

procedure Plot.PlaceXAxisValue ( r : real);
var
  VP : ViewPortType;
  TST : TextSettingsType;
  px : integer;
  s : string;
begin
  GetViewSettings( VP );
  SetViewPort( x1, y1, x2, y2.true );
  if (r > mnx) and (r < mxx) then
    begin
      GetTextSettings ( TST );
      Str((r/XSFac) :XW :XD, s);
      px := OriginX+ Round(((r-mnx)/DeltaX)*DeltaXAxis);
      SetTextJustify(Centertext, BottomText);
      MoveTo( px, y2-y1-BBuf-TExtHeight(s));
      OutText(s);
      with TST do
        SetTextjustify( Horiz, Vert );
        DrawTickMark( px, OriginY-1 );
      end;
    with VP do
      SetViewPort(x1, y1,x2,y2,true);
    end;
  end;
  {----- Plot.PlaceYAxisValue -----}

procedure Plot.PlaceYAxisValue ( r : real);
var
  VP : ViewPortType;
  TST : TextSettingsType;
  py : integer;
  s : string;
begin
  GetViewSettings( VP );
  SetViewPort( x1, y1, x2, y2.true );
  if (r > mny) and (r < mxy) then
    begin
      GetTextSettings ( TST );
      Str((r/YSFac) :YW :YD, s);
      py := OriginY+ Round(((r-mny)/DeltaY)*DeltaYAxis);
      SetTextJustify(LeftText, Centertext);
      MoveTo( x1, py);
      OutText(s);
      with TST do
        SetTextjustify( Horiz, Vert );
        DrawTickMark( x1, py );
      end;
    with VP do
      SetViewPort(x1, y1,x2,y2,true);
    end;
  end;
  {----- Plot.PlaceZAxisValue -----}

```

```

GetViewSettings( VP );
SetViewPort( x1, y1, x2, y2,true );
if (r > mny) and (r < mxy) then
  begin
    GetTextSettings ( TST );
    Str((r/YSFac) :YW :YD, s);
    py := OriginY - Round(((r-mny)/DeltaY)*DeltaYAxis);
    SetTextJustify(RightText, Centertext);
    MoveTo( OriginX , py );
    OutText(s);
    with TST do
      SetTextjustify( Horiz, Vert );
    DrawTickMark( OriginX+1, py-1 );
  end;
with VP do
  SetViewPort(x1, y1,x2,y2,true);
end;
END.

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

พิกัดของตัวเหนี่ยวนำ

- | | |
|------------------|---------|
| 1. กำลัง ต่อ เฟส | 1800 VA |
| 2. แรงดัน | 380 V |
| 3. ความถี่ | 50 Hz |

คำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ

$$\text{Current per phase} = \frac{1800}{380} = 4.74 \text{ A}$$

$$X_L = \frac{380}{4.74} = 80.17 \ \Omega$$

$$\begin{aligned} \therefore L &= \frac{X_L}{2\pi f} \\ &= \frac{80.17}{2\pi \times 50} \\ &= 255.2 \text{ mH} \end{aligned}$$

จากสมการ

$$V = 4.44 f N B A$$

จากกราฟคุณสมบัติของแกนเหล็กจึงพิจารณาเลือกใช้ค่า $B_{\max} = 1.2 \text{ T}$

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$380 = 4.44(50)(N)(1.2)(A) \tag{1}$$

จากสมการ

$$L = \frac{N^2(4\pi \times 10^{-7})A}{2g} \tag{2}$$

ทำการหาค่า A จากสมการเพื่อนำค่ามาเลือกขนาดของแกนเหล็ก

$$A = \frac{\sqrt{VA}}{5.58}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$A = \frac{\sqrt{1800}}{5.58} = 7.6 \text{ inch}^2$$

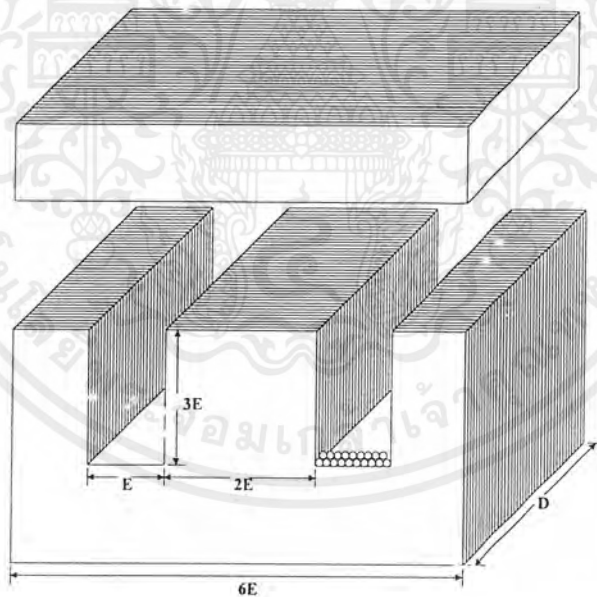
∴ เลือกขนาดแกน 2 นิ้ว

แทนค่า A ลงในสมการที่ (1) จะได้

$$N = \frac{380}{4.44(50)(1.2)(2 \times 4 \times 2.54^2 \times 10^{-7})} = 276.4 \text{ รอบ}$$

พิจารณาเลือกใช้ค่าความหนาแน่นกระแส $J = 2.5 \text{ A/mm}^2$

ที่กระแสเท่ากับ 4.72 Amp ซึ่งจะได้ขนาดของลวดทองแดงเท่ากับ $\frac{4.76}{2.5} = 1.788 \text{ mm}^2$ ต่อเส้น



รูปแสดงขนาดพื้นที่ต่างๆของแกนเหล็ก

คำนวณหาพื้นที่ว่าง (Window Area : A_w) ของแกนเหล็ก ได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ว่าง } (A_w) &= 1'' \times 3'' \times 2.54^2 \times 10^2 \\ &= 1935.48 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ค่า Factor 50 %

$$\begin{aligned} \therefore \text{พื้นที่ว่างที่จะสามารถพันขดลวดได้} &= (50 / 100) \times 1935.48 \text{ mm}^2 \\ &= 967.74 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{เลือกขดลวดขนาด SWG \# 16} = 2.112 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ที่ใช้ขดลวดทั้งหมด} &= 2.112 \times 2.77 \\ &= 585.024 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

ซึ่งจากการคำนวณหาพื้นที่การลงขดลวดข้างต้นสามารถที่ทำการพันขดลวดที่ต้องการได้จากสมการที่ (2) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} g &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 8(277)^2 (2.54 \times 10^{-2})^2}{2 \times 255.2 \times 10^{-3}} \\ &= 0.975 \text{ mm} \end{aligned}$$

พิจารณา B_{DC}

$$\begin{aligned} NI &= \frac{B2g}{\mu_0} \\ B &= \frac{277 \times 474 \times 4\pi \times 10^{-7}}{2 \times 0.975 \times 10^{-3}} \\ &= 0.846 \text{ T} \end{aligned}$$

จาก $B_{AC} = 1.2 \text{ T}$

$$\therefore B_T = 1.2 + 0.846 = 2.046 \text{ T}$$

ที่จำนวนรอบของขดลวด (N) = 277 รอบ

ซึ่งจะพบว่าค่า B จะสูงเกินไป ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องปรับเปลี่ยนค่า B ใหม่

ซึ่งพิจารณาเลือก $B_{AC} = 0.8 \text{ T}$

\therefore จะได้ว่า

$$N = \frac{380}{4.44(50)(0.8)(2 \times 4 \times 2.54^2 \times 10^{-7})} = 415 \text{ รอบ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาค่า B_{DC} ใหม่ โดย

$$NI = \frac{B2g}{\mu_0} \quad ; \quad L = \frac{N^2 \mu_0 A}{2g}$$

$$g = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(8)(415)^2(8 \times 2.54^2 \times 10^{-4})}{(2)(255.2)(10^{-3})}$$

$$= 2.1885 \text{ mm}$$

∴ จะได้ว่า

$$B = \frac{(415)(4.74)(4\pi \times 10^{-7})}{(2)(2.1885)(10^{-3})}$$

$$= 0.565 \text{ T}$$

∴ จะได้ว่าค่า

$$B_T = 0.8 + 0.565 = 1.37 \text{ T}$$

เมื่อนำค่าที่ได้มาพิจารณาถึงกราฟคุณสมบัติของแกนเหล็กแล้ว ค่า $B_{T(NEW)}$ ที่ได้นี้สามารถที่ใช้งานในย่านของค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) นี้ได้

ภาคผนวก ค

การแปลงฟูรีเยร์ (THE FOURIER TRANSFORM)

1.อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series)

1.1 อนุกรมฟูรีเยร์ (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

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

โดย n เป็นเลขจำนวนเต็ม และสัมประสิทธิ์ X_n สามารถหาได้จากสมการที่ (1) โดยการอินทิเกรตพจน์ต่อพจน์ ดังนี้

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

และเรียก f_0 ว่าความถี่หลักมูล (fundamental frequency) ของสัญญาณเป็นคาบ $x(t)$ ในขณะที่ $n f_0$ จะเรียกว่าฮาร์โมนิคส์ที่ n (n^{th} harmonic) คาบเวลาของความถี่หลักมูลคือ $T_0 = \frac{1}{f_0}$ ซึ่งจะเป็นคาบเวลาของ $x(t)$ สำหรับ X_n ในสมการที่ (ค.2) คือสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ (Fourier Coefficients) ซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อนและสามารถเขียนในเทอมของขนาดและเฟสได้เป็น

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

จากสมการที่ (ค.3) นี้เราอาจเขียนสมการที่ (ค.1) ได้เป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์จะพบว่ามีคุณสมบัติสมมาตร (symmetry) กล่าวคือ X_{-n} จะเป็น สัมยูก (complex conjugate) ของ X_n

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

ซึ่งหมายความว่า

$$|X_{-n}| = |X_n| \quad \dots(\text{ก.6})$$

และ

$$\angle X_{-n} = -\angle X_n \quad \dots(\text{ก.7})$$

จากสมการที่ (ก.2) เมื่อค่า $n=0$ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์เป็นจำนวนจริง

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

ซึ่งคือค่าเฉลี่ย (average value) ของสัญญาณเป็นคาบ $x(t)$ เพราะค่า X_0 ในสมการที่ (ก.8) นี้คือ พื้นที่ใต้กราฟของ $x(t)$ ในช่วง 1 คาบเวลาหารด้วยระยะเวลา T_0

1.2 อนุกรมโคไซน์ (Cosine Series)

จากสมการที่ (ก.4) สามารถแยกเป็น 3 ส่วน

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{-1} |X_n| e^{j\omega_n t} + X_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} |X_n| e^{j\omega_n t} \quad \dots(\text{ก.9})$$

ถ้าเรากลับเครื่องหมายของ n ในเทอมแรก จะได้

$$\sum_{n=1}^{+\infty} |X_{-n}| e^{j\omega_n t} \quad \dots(\text{ก.10})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณสมบัติสมมาตรคั่งสมการที่ (ค.6) และ (ค.7) อาจเขียนสมการที่ (ค.10) ใหม่ได้เป็น

$$\sum_{n=1}^{+\infty} |X_n| e^{-j\angle X_n} e^{-j2\pi n f_0 t} \quad \dots(\text{ค.11})$$

แทนเทอมแรกในรูปใหม่นี้ลงในสมการที่ (ค.9) จะได้

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

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler)

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

ทำให้สามารถจัดรูปสมการที่ (ค.12) ได้ใหม่เป็น

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

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

1.3 อนุกรมไซน์ – โคไซน์ (Sine – Cosine Series)

แม้ว่าอนุกรมฟูเรียร์ในรูปเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการที่ (ค.1) และในรูปโคไซน์ (Cosine) ดังสมการที่ (ค.14) จะนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางแต่บางครั้งเราอาจเขียนสัญญาณเป็นคาบ $x(t)$ ในรูปของ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอมค่าเฉลี่ยยังคงเหมือนเดิม คือ

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

สัมประสิทธิ์ของเทอมโคไซน์

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

สัมประสิทธิ์ของเทอมไซน์

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

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler)

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

ทำให้เราสามารถเขียนสมการที่ (ค.2) ใหม่ได้เป็น

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

แยกสมการที่ (ค.20) เป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพ จะได้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$X_n = \frac{1}{2} A_n - j \frac{1}{2} B_n = \frac{1}{2} (A_n - j B_n) \quad \dots(\text{ค.22})$$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$A_n = 2 \operatorname{Re}[X_n] \quad \text{และ} \quad B_n = -2 \operatorname{Im}[X_n] \quad \dots(\text{ก.23})$$

2. การแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform : DFT)

เนื่องจากผลการแปลงฟูรีเยร์เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่มีประโยชน์ โดยเฉพาะในการวิเคราะห์และศึกษาระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจำเป็นต้องมีวิธีการคำนวณที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมที่จะใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ แต่เนื่องจากนิยามการแปลงฟูรีเยร์ที่กล่าวมา การคำนวณเป็นการหาค่าอินทิกรัล ซึ่งอาจหาคำตอบได้หรือไม่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของฟังก์ชัน และการคำนวณหาค่าอินทิกรัลโดยใช้คอมพิวเตอร์จะเป็นการทำการวนรอบเพื่อหาคำตอบ ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณนาน และไม่แน่ว่าจะมีการลู่เข้าของคำตอบหรือไม่ ในทางกลับกัน ถ้าหากเราสามารถหาวิธีการแปลงแบบใหม่ที่การคำนวณใช้อนุกรมจำกัดให้ได้ค่าใกล้เคียงกับการแปลงเดิม แต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อย การแปลงวิธีใหม่นี้เราเรียกว่า “การแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย” ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในการประยุกต์ใช้งานวิเคราะห์คลื่นสัญญาณต่างๆ

นิยามของการแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย

ถ้าให้ $x_p(t)$ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องและมีคุณสมบัติเป็นคาบ โดยที่มีคาบเป็น T_p หรือเขียนได้ว่า

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

โดยที่ m เป็นจำนวนเต็มใดๆ ในเชิงคณิตศาสตร์ฟังก์ชันแบบนี้อาจเขียนแทนได้ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังนี้

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

โดยที่ $f_0 = \left(\frac{1}{T_p} \right)$ ซึ่งเป็นความถี่หลักมูล และการเขียนแทนด้วยสมการ

$$X_p(k) = \left[\frac{1}{T_p} \right] \int_0^{T_p} x_p(t) e^{-j2\pi k f_0 t} dt \quad \dots(\text{ก.26})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ต่อไปจะเป็นการพิจารณาอนุกรมฟูเรียร์เมื่อทำการสุ่มสัญญาณแบบต่อเนื่องและเป็นคาบ $x_p(t)$ โดยในการสุ่มสัญญาณได้นั้น สัญญาณต้องมีแถบความถี่ปฏิบัติงานที่แน่นอน (ถ้าหากสัญญาณนั้นๆ ไม่มีแถบความถี่ปฏิบัติงานหรือแค่ว่ากว้างมาก เราอาจทำการกำหนดแถบความถี่ปฏิบัติงานของมันได้โดยการป้อนผ่านวงจรจรวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (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 ดังแสดงในรูปที่ 1

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

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

และถ้าในหนึ่งคาบสัญญาณเราทำการสุ่ม N ช่วง ทำให้ได้ว่า $2k_1 = N$

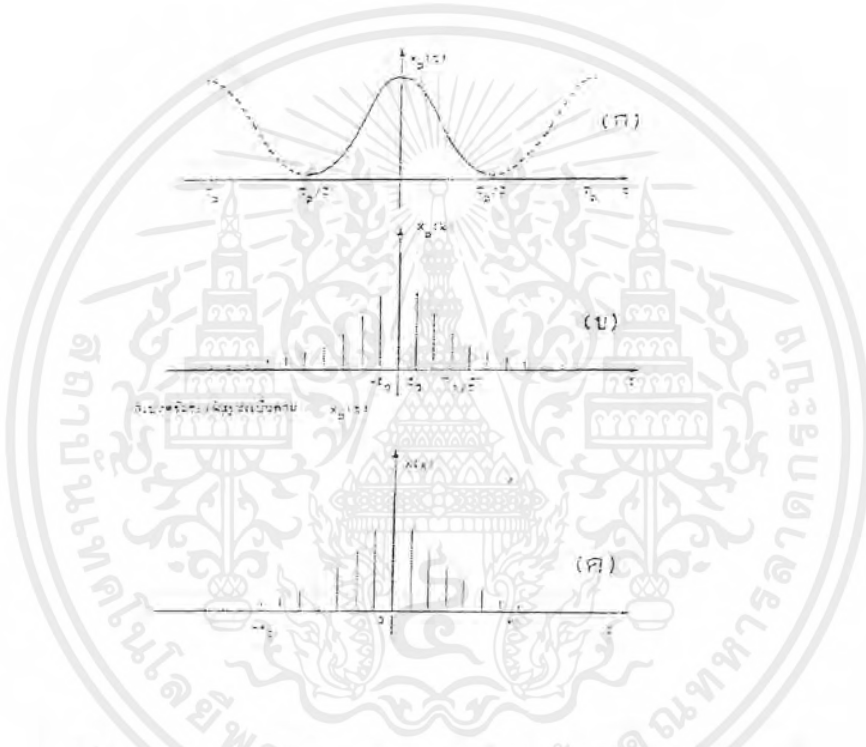
ดังนั้นสัญญาณ $x_p(t)$ ที่อยู่ในช่วง $0 < t < T_p$ เมื่อถูกสุ่มออกเป็น N ช่วงนี้ สามารถเขียนสมการแทนได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 1. แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่มีแถบความถี่ปฏิบัติงานจำกัด

- (ก) สัญญาณเป็นคาบ
- (ข) สเปกตรัมของสัญญาณในรูป (ก)
- (ค) สเปกตรัมเมื่อจำกัดแถบความถี่ปฏิบัติงาน

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากคุณสมบัติของอิมพัลส์ $\delta(t_0)$ ที่นิยามว่า

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

เพราะฉะนั้นทำให้ได้

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

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

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

แต่โดยทั่วไปจะนิยามให้

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

สมการนี้เรียกว่า การแปลงฟูเรียร์เต็มหน่วย หรือ DFT ของลำดับสัญญาณ $x(n)$ สำหรับการแปลงฟูเรียร์เต็มหน่วยผกผัน (Inverse Discrete Fourier Transform : IDFT) สามารถหาได้จากสมการที่ (ค.25) โดยการแทน $t = nT$ และ $x_p(t) = x(n)$ และจากสมการที่ (ค.32) และ(ค.33) จะได้ว่า

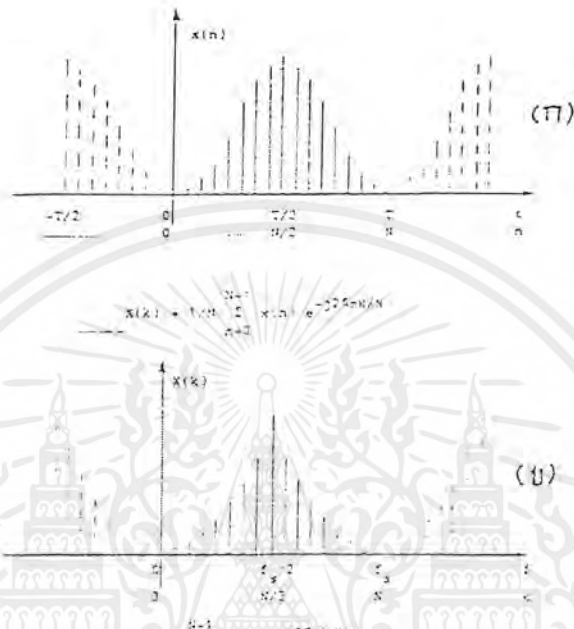
$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kn/N} \quad \dots(\text{ค.34}) \quad \#\#\#$$

โดยที่ลำดับสัญญาณและลำดับของสเปกตรัมจะต้องมีคุณสมบัติความเป็นคาบด้วยกล่าวคือ

$$\begin{aligned} x(n) &= x(n+mN) && \text{เมื่อ } N \text{ เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆ} \\ X(k) &= X(k+mN) && \text{เมื่อ } N \text{ เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆ} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติความเป็นคาบของลำดับ $x(n)$ นั้นมาจากสมมติคอนแรกที่เราทำการสุ่มสัญญาณที่เป็นคาบ ส่วนคุณสมบัติความเป็นคาบของ $X(k)$ เป็นผลมาจากสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่างมา สเปกตรัมของมันมีความเป็นคาบด้วย



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

กล่าวโดยสรุปก็คือ จากการที่ทำการสุ่มฟังก์ชันเป็นคาบและต่อเนื่อง $x_p(t)$ ออกเป็นฟังก์ชันเต็มหน่วยจำนวน N ลำดับด้วยกัน สเปกตรัมของลำดับเต็มหน่วยกับสเปกตรัมของฟังก์ชันต่อเนื่องตัวต้นแบบในช่วง $0 < k < N-1$ แล้วปรากฏว่าเท่ากันทุกประการ ต่างไปแต่ว่าสเปกตรัมของลำดับเต็มหน่วยมีคุณสมบัติความเป็นคาบด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2(ข) ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของการคำนวณสเปกตรัมโดยใช้สมการที่ (ค.33) ก็คือ สมการนี้เหมาะสมเป็นอย่างยิ่งที่จะใช้การคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการคำนวณมีค่าแน่นอน

3. การแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ (FAST FOURIER TRANSFORM ; FFT)

การแปลงฟาสต์ฟูเรียร์เป็นวิธีการง่าย ๆ ที่ใช้คำนวณการแปลงฟูเรียร์เต็มหน่วย ซึ่งทำได้รวดเร็วกว่าวิธีอื่นๆ ดังนั้นจะอธิบายแต่เพียงขั้นตอนการคำนวณเท่านั้น ส่วนผลลัพธ์ที่ออกมานั้นจะเหมือนกับการแปลงฟูเรียร์เต็มหน่วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการอธิบายจะใช้การสังเกตจากตัวอย่างการแยกตัวประกอบเมทริกซ์อย่างง่าย เมทริกซ์ที่ถูกแยกตัวประกอบแล้วอาจจะแทนด้วยกราฟการไหลของสัญญาณ (signal flow graph) ได้ ซึ่งจากกราฟนี้จะนำไปสู่การเขียนโปรแกรมคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ หัวข้อต่อไปนี้จะอธิบายทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการพัฒนากระบวนการคำนวณแบบฟาสต์ฟูเรียร์ (FFT Algorithm)

3.1 การก่อรูปเมทริกซ์ (MATRIX FORMULATION)

จากการแปลงฟูเรียร์เต็มหน่วย

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

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

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

ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (ค.35) ใหม่ได้เป็น

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

สำหรับกรณีที่ $N = 4$ กระจายสมการที่ (35) ได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (38) สามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

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

สมมติให้ตัวอักษรตัวหนาแทนเมทริกซ์จะได้ว่า

$$X(n) = W^{nk} x_0(k) \quad \dots (ค.40)$$

พิจารณาสมการที่ (ค.39) เนื่องจาก W เป็นจำนวนเชิงซ้อน และ $x(k)$ ก็อาจจะเป็นจำนวนเชิงซ้อนด้วย ดังนั้นในการคำนวณจะต้องทำการคูณด้วยจำนวนเชิงซ้อน N^2 ครั้งและบวกจำนวนเชิงซ้อนอีก $(N)(N-1)$ ครั้ง แต่เนื่องจากคอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำการคูณได้โดยตรงกล่าวคือจะใช้เวลาในการคูณมาก การแปลงฟาสต์ฟูเรียร์จะเป็นวิธีการที่ช่วยลดจำนวนครั้งในการคูณและการบวกที่ใช้ในการคำนวณสมการที่ (ค.39) ในหัวข้อต่อไปนี้จะอธิบายว่าการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์สามารถลดจำนวนครั้งในการคูณได้อย่างไร

3.2 การหาวิธีการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์

เพื่อความสะดวกในการอธิบายกระบวนการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์เราจะกำหนดจุดในการสุ่ม $N = 2^r$ โดย r เป็นจำนวนเต็ม และใช้การศึกษจากตัวอย่างกรณี $N = 4$ ซึ่งมีผลลัพธ์ดังสมการที่ (ค.39)

จากคุณสมบัติความเป็นคาบของจำนวนเชิงซ้อน

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

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

เนื่องจาก $W^{nk} = W^6 = e^{(-j \frac{2\pi}{4})(6)} = e^{-j3\pi}$

$$= e^{-j\pi} = e^{(-j \frac{2\pi}{4})(2)} = W^2 = W^{nk \bmod N} \quad \dots (ค.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณสมบัติความเป็นคาบนี้ สามารถเขียนสมการที่ (ค.39) ใหม่ได้เป็น

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

และจากคุณสมบัติความเป็นคาบนี้เองทำให้เราสามารถแยกตัวประกอบเมทริกซ์ W^{nk} ออกเป็นเมทริกซ์ย่อยหลายเมทริกซ์คูณกัน โดยทำให้สมาชิกภายในเมทริกซ์ย่อยมีค่าเป็นศูนย์มากที่สุด

วิธีการแยกตัวประกอบเมทริกซ์ (Matrix Factorization)

ในการแยกตัวประกอบจะเขียนดรรชนี k และ n ของสมการที่ (ค.37) ในรูปตัวเลขฐานสอง สำหรับกรณีตัวอย่าง $N = 4$ ดรรชนี k และ n จะมีค่าได้เพียง 0, 1, 2 และ 3 ดังนั้นจึงแทนด้วยเลขฐานสองจำนวน 2 หลัก คือ

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

โดยที่ $k_1, k_0; n_1$ และ n_0 เป็นเลขโดดที่มีค่า 0 หรือ 1 เท่านั้น ดรรชนี k และ n ในสมการที่ (ค.44) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$k = 2k_1 + k_0 \quad n = 2n_1 + n_0 \quad \dots(\text{ค.45})$$

เมื่อนำค่าดรรชนี k และ n ในสมการที่ (ค.45) ไปแทนลงในสมการที่ (ค.37) จะได้

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

จากคุณสมบัติความเป็นคาบของ W ทำให้ได้ความสัมพันธ์

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

เนื่องจากเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ $W^{4n_1k_1} = (W^4)^{n_1k_1} = \left[e^{-j\frac{2\pi}{4}} \right]^{n_1k_1} = [1]^{n_1k_1} = 1$ เราสามารถนำเงื่อนไขข้อนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณได้โดยไม่ต้องกังวลใจอีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

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

เพราะฉะนั้นสมการที่ (ค.46) จะกลายเป็น

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

สมการนี้จะใช้เป็นพื้นฐานของกระบวนการคำนวณแบบฟาสต์ฟูเรียร์ ชั้นแรกพิจารณาแต่ละผลรวมของสมการที่ (ค.48) โดยสมมติให้ $x_1(n_0, k_0)$ แทนค่าผลรวมที่อยู่ในวงเล็บปีกกา ซึ่งเป็นการคำนวณระหว่างกลาง

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

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

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

เขียนสมการที่ (ค.50) ในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลรวมภายนอกของสมการที่ (ค.48)

$$x_2(n_0, n_1) = \sum_{k_0=0}^1 x_1(n_0, k_1) W^{(2n_1+n_0)k_0} \quad \dots(\text{ค.52})$$

แทนค่า n_1, n_0, k_0 แล้วพิจารณาคำตอบได้ที่

$$\begin{array}{l} k_1 = 0 \qquad k_1 = 1 \\ n_0 = 0, n_1 = 0 \rightarrow x_2(0,0) = x_1(0,0)W^{12(0)+0(0)} + x_1(0,1)W^{12(0)+0(1)} \\ n_0 = 0, n_1 = 1 \rightarrow x_2(0,1) = x_1(0,0)W^{12(1)+0(0)} + x_1(0,1)W^{12(1)+0(1)} \quad \dots(\text{ค.53}) \\ n_0 = 1, n_1 = 0 \rightarrow x_2(1,0) = x_1(1,0)W^{12(0)+1(0)} + x_1(1,1)W^{12(0)+1(1)} \\ n_0 = 1, n_1 = 1 \rightarrow x_2(1,1) = x_1(1,0)W^{12(1)+1(0)} + x_1(1,1)W^{12(1)+1(1)} \end{array}$$

เขียนสมการที่ (ค.53) ในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

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

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

$$X(n_1, n_0) = x_2(n_0, n_1) \quad \dots(\text{ค.55})$$

นั่นคือ ผลลัพธ์ $x_2(n_0, n_1)$ ที่ได้จากผลรวมภายนอกของสมการที่ (ค.48) จะมีลำดับที่กลับบิต (bit reversed order) กับค่า $X(n_1, n_0)$ ซึ่งเป็นการสลับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยการแปลง ฟาสท์ฟูเรียร์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปสมการที่ใช้ในการคำนวณกระบวนการแปลงฟาสท์ฟูเรียร์ กรณี $N = 4$ ด้วยวิธีของ Cooley – Tukey ได้ดังนี้

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

จากวิธีการแยกตัวประกอบที่ได้แสดงมาทั้งหมดจะทำให้เราสามารถแยกตัวประกอบของเมทริกซ์จัตุรัสในสมการที่ (ก.43) ได้ดังนี้

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

ต่อไปจะเป็นการอธิบายผลที่ได้จากการแยกตัวประกอบเมทริกซ์ และพิจารณาว่าการแปลงฟาสท์ฟูเรียร์สามารถลดจำนวนครั้งในการคูณได้อย่างไร

เมื่อตรวจสอบสมการที่ (ก.58) พบว่าผลคูณของเมทริกซ์จัตุรัสจะได้ผลเหมือนกับเมทริกซ์จัตุรัสในสมการที่ (ก.43) ยกเว้นเพียงแถวที่ 1 และ 2 จะสลับกัน (เรียกแถวที่ 0, 1, 2, 3) สมมติให้ $\overline{X(n)}$ แทนเมทริกซ์ที่ถูกสลับแถวกัน (row – interchange vector) นั่นคือ

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

จากสมการที่ (ก.58) ให้เมทริกซ์ $x_1(k)$ แทนผลคูณของ 2 เมทริกซ์ทางด้านขวา

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

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

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

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

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

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

พิจารณาการคูณสมการที่ (ก.58) ต่อให้สมบูรณ์

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

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

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

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 $X(n)$ ตามสมการที่ (ก.58) จะใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมด 4 ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมด 8 ครั้ง ซึ่งแต่เดิมเราใช้สมการที่ (ก.39) ในการคำนวณ $X(n)$ เราจะต้องใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อนถึง 16 ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อนอีก 12 ครั้ง วิธีการแยกตัวไม่วุ่นวายใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบเมทริกซ์นี้จะเป็นการนำค่า 0 เข้าไปในเมทริกซ์ย่อย (factored matrices) ซึ่งจะช่วยลดจำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อน จากตัวอย่างกรณี $N = 4$ วิธีการแยกตัวประกอบเมทริกซ์สามารถลดจำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อนลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งทำให้สามารถคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ได้เร็วขึ้น ด้วยเหตุนี้เองการแปลงฟาส์ฟูเรียร์จึงเป็นวิธีการคำนวณที่มีประสิทธิภาพสูง

สำหรับ $N = 2^r$ (r เป็นจำนวนเต็ม) กระบวนการแปลงฟาส์ฟูเรียร์จะสามารถแยกตัวประกอบเมทริกซ์ $N \times N$ ออกเป็น r เมทริกซ์ได้โดยง่าย (แต่ละเมทริกซ์ย่อยมีมิติ $N \times N$) โดยแต่ละเมทริกซ์ย่อยจะมีคุณลักษณะเฉพาะที่ทำให้จำนวนครั้งในการคูณและบวกจำนวนเชิงซ้อน ลดลงเมื่อเราพิจารณาผลจากตัวอย่างที่ผ่านมาจะพบว่า เมื่อใช้วิธีการแปลงฟาส์ฟูเรียร์

- จำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อน เท่ากับ

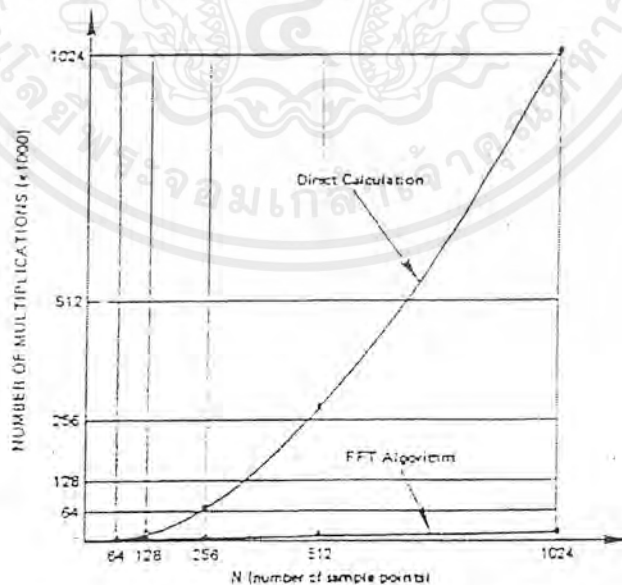
$$\frac{N}{2} r = \frac{N}{2} (\log_2 N) = \frac{4}{2} (\log_2 4) = 4 \text{ ครั้ง}$$

- จำนวนครั้งในการบวกจำนวนเชิงซ้อน เท่ากับ

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

ในขณะที่ใช้วิธีการ โดยตรงตามสมการที่ (ก.39)

- จำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อน เท่ากับ N^2 ครั้ง
- จำนวนครั้งในการบวกจำนวนเชิงซ้อน เท่ากับ $N(n-1)$ ครั้ง



รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อนเมื่อคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟาส์ฟูเรียร์กับคำนวณด้วยวิธีโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสมมติให้เวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการคำนวณขึ้นตรงกับจำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นเราสามารถประมาณอัตราส่วนที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธี โดยตรงต่อวิธีการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ได้ดังสมการ

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

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

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

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

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

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

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

- กลับลำดับบิตของอาร์กิวเมนต์ n (เช่น 01 กลายเป็น 10, 10 กลายเป็น 01) จะได้

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

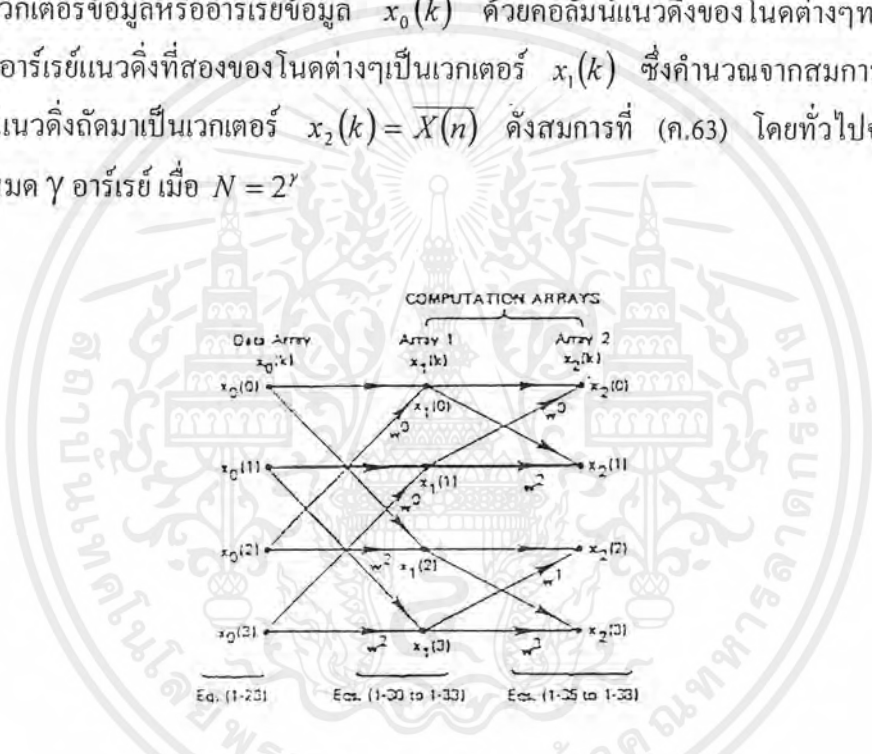
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถพัฒนาวิธีการสลับผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ให้อยู่ในรูปทั่วไปได้

การแยกตัวประกอบเมทริกซ์อย่างสมการที่ (ค.58) ในกรณีที่ N มากกว่า 4 จะทำได้ลำบาก ด้วยเหตุนี้เราจึงใช้แผนภาพ (graphical manner) แสดงการคำนวณตามสมการที่ (ค.58) ซึ่งทำให้เราสามารถพัฒนาต่อไปเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 กราฟการไหลของสัญญาณ (SIGNAL FLOW GRAPH)

เราสามารถเปลี่ยนสมการที่ (ค.58) ให้เป็นกราฟการไหลของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4 จากรูปเราแทนเวกเตอร์ข้อมูลหรืออาร์เรย์ข้อมูล $x_0(k)$ ด้วยคอลัมน์แนวดิ่งของโนดต่างๆทางด้านซ้ายของกราฟ อาร์เรย์แนวดิ่งที่สองของโนดต่างๆเป็นเวกเตอร์ $x_1(k)$ ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (ค.60) และอาร์เรย์แนวดิ่งถัดมาเป็นเวกเตอร์ $x_2(k) = \overline{X(n)}$ ดังสมการที่ (ค.63) โดยทั่วไปจะมีอาร์เรย์คำนวณทั้งหมด γ อาร์เรย์ เมื่อ $N = 2^\gamma$



รูปที่ 4 กราฟการไหลของสัญญาณแสดงการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์กรณี $N = 4$

สังเกตจากกราฟการไหลของสัญญาณพบว่าแต่ละโนดจะมาเส้นตรงเข้า 2 เส้นแทนเส้นทางส่งสัญญาณ (transmission paths) จากโนดก่อนหน้า เส้นทางที่เขียนนี้ใช้แทนการส่งค่าจากโนดในอาร์เรย์หนึ่งคูณด้วย W^p และนำผลลัพธ์ส่งให้โนดในอาร์เรย์ถัดไป โดย W^p จะเขียนไว้ใกล้กับหัวลูกศรของเส้นทางส่งสัญญาณ ถ้าไม่ได้เขียนไว้แสดง $W^p = 1$ ผลลัพธ์ที่ได้จากเส้นทางส่งสัญญาณ 2 เส้นจะนำมาบวกกันก่อนเข้าสู่โนดในอาร์เรย์ถัดไป

ยกตัวอย่างเช่น โหนด $x_1(2)$ ในรูปที่ 4 จากหลักการของกราฟการไหลของสัญญาณจะได้ว่า

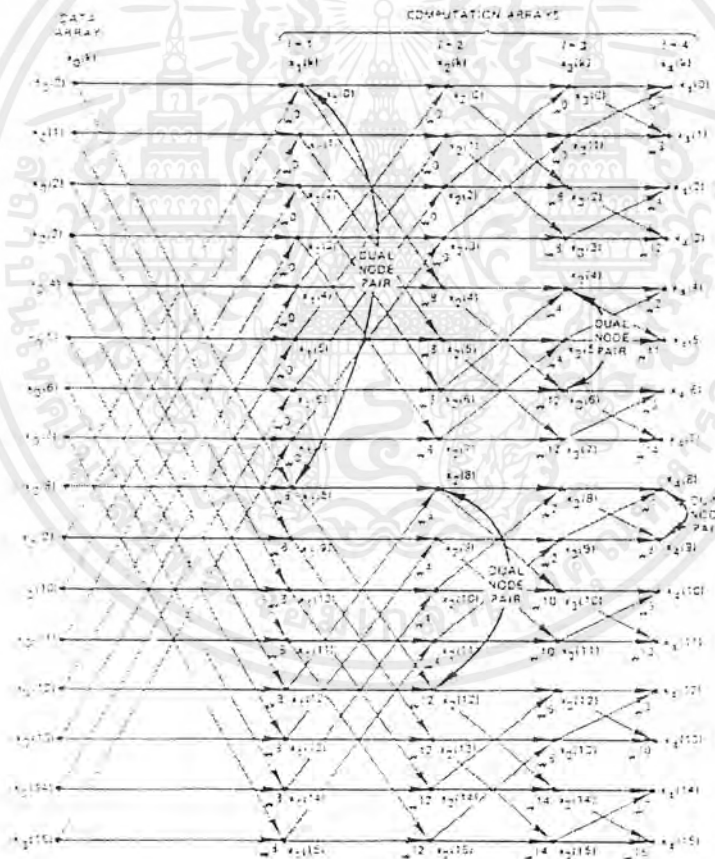
$$x_1(2) = x_0(0) + W^2 x_0(2) \dots (ค.69)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเหมือนกับสมการที่ (ค.62) สำหรับโนดอื่นๆของกราฟการไหลของสัญญาณก็เขียนได้ในทำนองเดียวกับตัวอย่างนี้

การแสดงการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์แบบแยกตัวประกอบเมทริกซ์ (factored matrix FFT algorithm) ดังสมการที่ (ค.58) โดยใช้กราฟการไหลของสัญญาณสามารถทำได้สะดวก คอลัมน์คำนวณแต่ละคอลัมน์ของกราฟจะสอดคล้องกับเมทริกซ์ย่อย (factored matrix) โดยถ้ามีการสุ่ม N จุด จะใช้อาร์เรย์แนวลิ่ง γ อาร์เรย์ ($N = 2^r$) ประโยชน์ของการแสดงการคำนวณด้วยรูปกราฟคือเพื่อความง่ายในการอธิบายกระบวนการแยกตัวประกอบเมทริกซ์เมื่อ N มีค่ามาก

จากรูปที่ 5 แสดงกราฟการไหลของสัญญาณ กรณี $N = 16$ ซึ่งกราฟขนาดนี้สามารถมองเห็นวิธีการคำนวณทั้งหมดในรูปทั่วไป และสามารถพัฒนาไปสู่การเขียนแผนภูมิการทำงาน (flowchart) สำหรับการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5 ตัวอย่างแสดงโนดคู่เสมอกัน (dual – node)

3.4 โหนดคู่เสมอกัน (DUAL NODE)

พิจารณาจากรูปที่ 5 จะสังเกตเห็นว่าในทุกๆอาร์เรย์จะมี 2 โหนด ที่มีเส้นทางส่งสัญญาณมาจาก
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในวงวิชาการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 คู่ของโนดในอาร์เรย์ก่อนหน้าคู่เดียวกัน เช่น โหนด $x_1(0)$ และ $x_1(8)$ จะคำนวณมาจากเทอม $x_0(0)$
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $x_0(8)$ และยังพบอีกว่าโนด $x_0(0)$ และ $x_0(8)$ ไม่ได้ถูกใช้คำนวณ โนดอื่นๆเลย เราเรียกโนด 2 โหนดดังกล่าวนี้ว่า “คู่โนดคู่เสมอกัน (Dual Node Pair)”

เนื่องจากการคำนวณโนดเป็นอิสระจากโนดอื่นๆ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณแบบแทนที่ตัวแปรเดิม (in - place computation) ได้ กล่าวคือจากรูปที่ 5 เราสามารถคำนวณ $x_1(0)$ และ $x_1(8)$ ในเทอมของ $x_0(0)$ และ $x_0(8)$ แล้วส่งค่าผลลัพธ์เข้าเก็บไว้ในตัวแปร $x_0(0)$ และ $x_0(8)$ ซึ่งทำให้พื้นที่ที่เก็บอาร์เรย์ข้อมูล $x_0(k)$ เท่านั้น โดยผลลัพธ์ที่คำนวณได้ในแต่ละอาร์เรย์จะถูกส่งกลับมายังอาร์เรย์ $x_0(k)$ นี้

ระยะห่างระหว่างโนดคู่เสมอกัน (Dual Node Spacing)

หัวข้อนี้จะเป็นการพิจารณาหาระยะห่างระหว่างโนดคู่เสมอกัน (วัดในแนวตั้งในเทอมของ ครรชน k) ในการอธิบายจะอ้างอิงจากรูปที่ 5

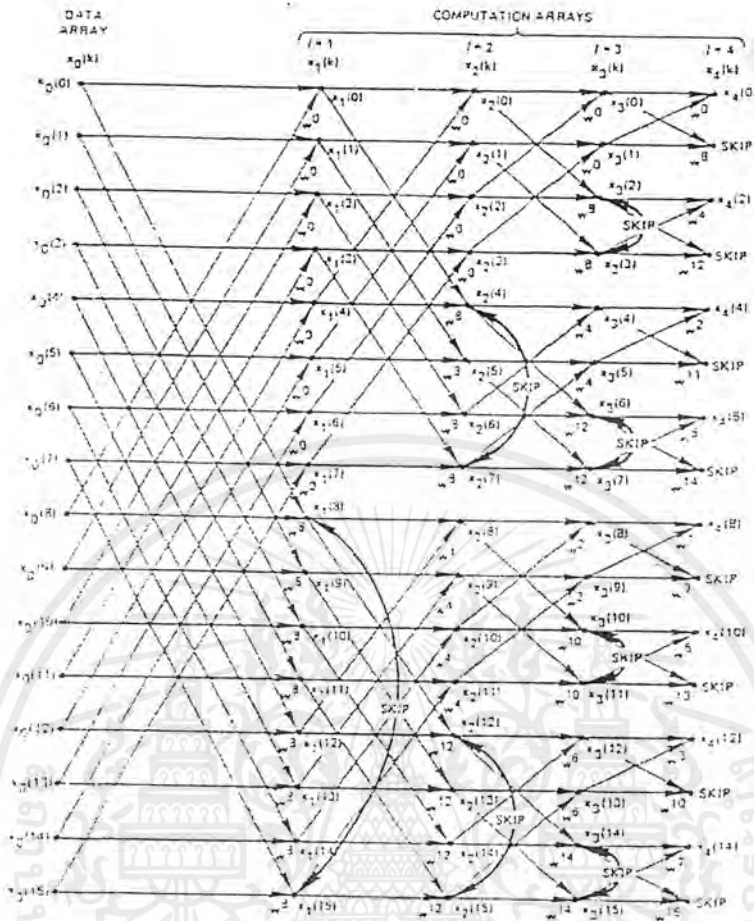
- ในอาร์เรย์ $l = 1$ คู่โนด $\{x_1(0), x_1(8)\}$ ห่างกัน $k = 8 = N/2^1 = 16/2^1$
- ในอาร์เรย์ $l = 2$ คู่โนด $\{x_2(8), x_2(12)\}$ ห่างกัน $k = 4 = N/2^2 = 16/2^2$
- ในอาร์เรย์ $l = 3$ คู่โนด $\{x_3(4), x_3(6)\}$ ห่างกัน $k = 2 = N/2^3 = 16/2^3$
- ในอาร์เรย์ $l = 4$ คู่โนด $\{x_4(8), x_4(9)\}$ ห่างกัน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

จากการพิจารณาตัวอย่าง สรุปได้ว่า “ระยะห่างระหว่างโนดคู่เสมอกันในอาร์เรย์ที่ l จะมีค่า $N/2^l$ ” ดังนั้นโนด $x_1(k)$ จะมีโนดคู่เสมอกันคือโนด $x_1(k + N/2^l)$ ซึ่งจากข้อสรุปนี้ช่วยให้เราหาโนดได้ง่ายขึ้น

การคำนวณโนดคู่เสมอกัน (Dual Node Computation)

ในการคำนวณโนดจะต้องคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น พิจารณาตัวอย่างที่ โหนด $x_2(8)$ และโนดคู่เสมอกันของมันคือ $x_2(12)$ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5 พบว่าเส้นทางส่งสัญญาณที่กำหนดมาจากโนด $x_1(12)$ จะถูกคูณด้วย W^4 เข้าสู่โนด $x_2(8)$ และคูณด้วย W^{12} เข้าสู่โนด $x_2(12)$ และที่สำคัญ $W^4 = -W^{12}$ ดังนั้นจึงมีการคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียง 1 ครั้งเท่านั้น เพราะว่าข้อมูล $x_1(12)$ จะถูกคูณด้วยเทอม W^4 นี้เหมือนกัน

$$\begin{aligned}x_2(8) &= x_1(8) + W^4 x_1(12) \\x_2(12) &= x_1(8) + W^{12} x_1(12) \\&= x_1(8) - W^4 x_1(12)\end{aligned}$$



รูปที่ 6 ตัวอย่างแสดงที่ต้องกระโดดข้าม เมื่อกำนวณกราฟการไหลของสัญญาณ

โดยทั่วไป ถ้าตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) ที่โนดใดโนดหนึ่งมีค่า W^p แล้วตัวประกอบถ่วงน้ำหนักที่โนดคู่เสมอกันจะเป็น $W^{p+N/2}$ และเนื่องจาก $W^p = -W^{p+N/2}$ ดังนั้นในการคำนวณแต่ละคู่โนดจึงมีการคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น การคำนวณคู่โนดใดๆจะใช้สมการคู่ต่อไปนี้

$$\begin{aligned} x_1(k) &= x_{l-1}(k) + W^p x_{l-1}(k + N/2^l) \\ x_1(k + N/2^l) &= x_{l-1}(k) - W^p x_{l-1}(k + N/2^l) \end{aligned} \quad \dots(\text{ก.70})$$

ในการคำนวณอาร์เรย์หนึ่งๆ เราจะเริ่มต้นที่โนด $k = 0$ โดยคำนวณตามสมการที่ (ก.70) จากนั้นจะเพิ่มค่า k เพื่อทำจากด้านบนสู่ล่างของอาร์เรย์ และจากข้อสรุปในหัวข้อก่อนหน้านี้ โหนดคู่เสมอกันของโนดใดๆในอาร์เรย์ที่ l จะอยู่ต่ำลงไป $N/2^l$ ในอาร์เรย์นั้น และเนื่องจากว่าระยะห่างระหว่างโนดคู่เสมอกันเป็น $N/2^l$ ดังนั้นในการคำนวณเราจึงสามารถกระโดดข้าม (skip) ทุกๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปโฆษณาการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$N/2'$ โหนดได้ ยกตัวอย่างเช่น อาร์เรย์ $l = 2$ ในรูปที่ 6 ที่โหนดเริ่มต้น $k = 0$ ตามที่ได้อธิบายมาแล้ว โหนดคู่เสมอจะอยู่ที่ $k = N/2' = 16/2^2 = 4$ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากรูปที่ 6 เมื่อเรากำหนดลงมาเรื่อยๆจนถึง โหนดที่ 4 ซึ่งเราได้คำนวณและป้อนค่าใหม่เข้าไปเรียบร้อยแล้ว เนื่องจาก โหนด $k = 4, 5, 6$ และ 7 เป็น dual node ของโหนด $k = 0, 1, 2$ และ 3 ดังนั้นจึงสามารถข้ามโหนด $k = 4, 5, 6$ และ 7 ไปได้ สำหรับโหนด 8, 9, 10 และ 11 ก็เหมือนกันก็จะมีโหนดคู่เสมออยู่ในตำแหน่งที่ต่ำลงมา 4 ตำแหน่ง สรุปได้ว่าการคำนวณอาร์เรย์ที่ l ใดๆจากบนลงล่าง เราจะคำนวณตามสมการที่ (ค.70) ใน $N/2'$ โหนดแรก แล้วข้าม $N/2'$ โหนดถัดมา สลับกันไปเช่นนี้ และจะหยุดการคำนวณในอาร์เรย์นี้เมื่อค่าตรรกษชี้ค่าโหนด k มากกว่า $N - 1$

3.5 การหาค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก W^p

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

1. เขียนค่าตรรกษชี้ค่าโหนด k ในรูปเลขฐานสองขนาด γ บิต
2. เลื่อนบิตของเลขฐานสองที่เขียนได้ในขั้นตอนที่ 1 ไปทางขวา (shift right) $\gamma - l$ บิต และเติมเลข 0 ฐานสองเข้าในตำแหน่งที่ว่างทางด้านซ้าย
3. กลับลำดับบิตที่ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 เช่น จาก $a_4 a_3 a_2 a_1$ เป็น $a_1 a_2 a_3 a_4$ ค่าที่กลับบิตเรียบร้อยแล้ว คือ ค่า p ที่นำไปใช้แทนในสมการที่ (ค.70)

ยกตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 6 พิจารณาโหนด $x_3(8)$ 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 ในเลขฐานสิบดังนั้น p จึงเท่ากับ 2

วิธีการผันกลับบิตโดยใช้คอมพิวเตอร์

เราจะมาศึกษากระบวนการผันกลับบิตจากตัวอย่างซึ่งสมมติให้จำนวนเต็มที่ต้องการกลับลำดับบิตสามารถเขียนในรูปเลขฐานสองได้เป็น $a_4 a_3 a_2 a_1$ ซึ่งมีค่าในฐานสิบเท่ากับ $a_4 \times 2^3 + a_3 \times 2^2 + a_2 \times 2^1 + a_1 \times 2^0$ จำนวนที่กลับลำดับบิตแล้วมีค่าในฐานสิบเท่ากับ $a_1 \times 2^3 + a_2 \times 2^2 + a_3 \times 2^1 + a_4 \times 2^0$ ดังนั้นถ้าเราสามารถหาเทคนิคในการหาบิตต่างๆของเลขฐานสองของเลขฐานเต็มฐานสิบจากเลขจำนวนเต็มฐานสิบได้ เราก็สามารถนิยามกระบวนการผันกลับบิตได้

สมมติให้ M เป็นเลขฐานสองเท่ากับ $a_4a_3a_2a_1$

1. เมื่อหาร M ด้วย 2 หรือ 10_2 ซึ่งเป็นการเลื่อนบิตไปทางขวา (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 ลบด้วยค่าที่คำนวณได้จากข้อที่ 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 ซึ่งจากคุณสมบัติข้อนี้ทำให้เราสามารถนำเทคนิคนี้ในการหาค่า 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 ก็หาได้ทำนองเดียวกัน กระบวนการหาค่าการผันกลับบิตตามตัวอย่างนี้สามารถที่จะพัฒนาไปสู่การเขียนโปรแกรมด้วยคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมอีกครั้งในหัวข้อที่ 3.7

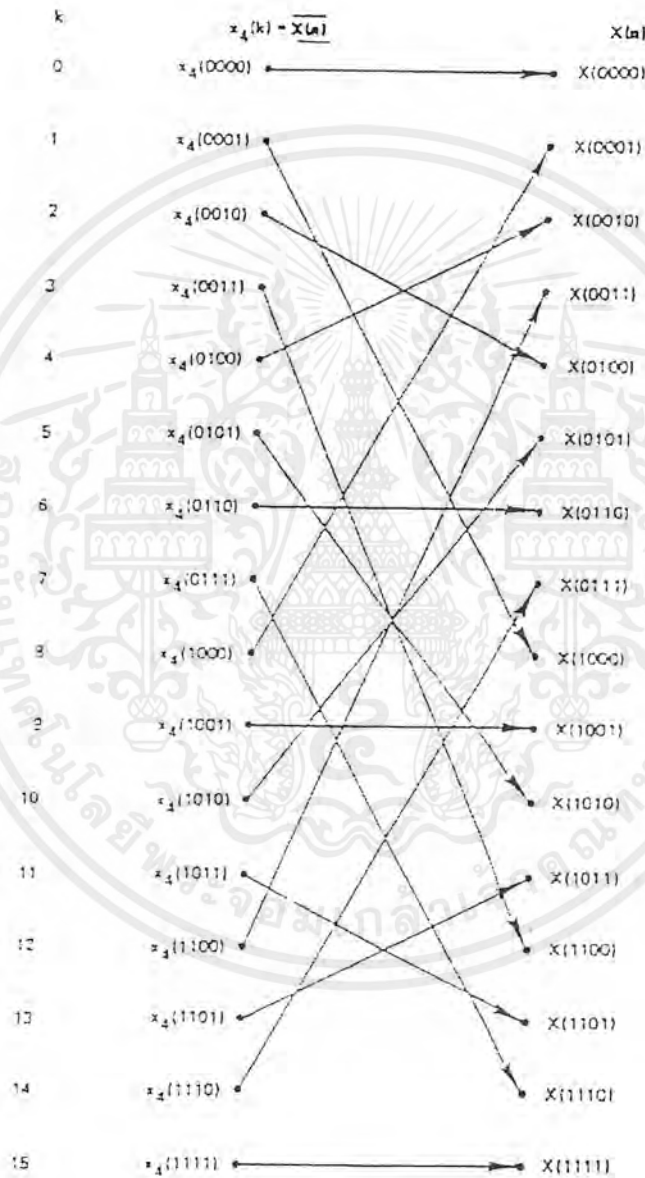
3.6 การสลับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์

ขั้นตอนสุดท้ายในการคำนวณการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์คือการสลับผลลัพธ์ที่ได้ คล้ายกับการแปลง $\overline{X(n)}$ ให้เป็น $X(n)$ ดังสมการที่ 68 โดยกระบวนการในการสลับสมาชิกของเมทริกซ์ $\overline{X(n)}$ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เริ่มต้นที่ $k=0$
2. ให้เขียนค่า k ในรูปเลขฐานสอง
3. ทำการกลับลำดับบิตเลขฐานสองของ k ด้วยวิธีการใช้หัวข้อที่ 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 I แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 2, 3, 4 ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนกว่าจะทำการครบทุกโนด

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

จากรูปที่ 7 แสดงการสลับผลลัพธ์ที่ได้สำหรับ $N=16$ หรือ $\gamma=4$ โหนด $k=0$ ยังคงอยู่ตำแหน่งเดิม โหนด $k=1,2$ และ 3 ได้สลับกับ โหนด $8, 4$ และ 12 ตามลำดับ โหนดถัดไปที่จะพิจารณา คือ โหนด $k=4$ จำนวน i ได้เท่ากับ 2 ต่อเนื่องจาก $x_4(4)$ ได้ถูกสลับกับค่า $x_4(2)$ เรียบร้อยแล้วจึงไม่ต้องสลับค่ากันอีก



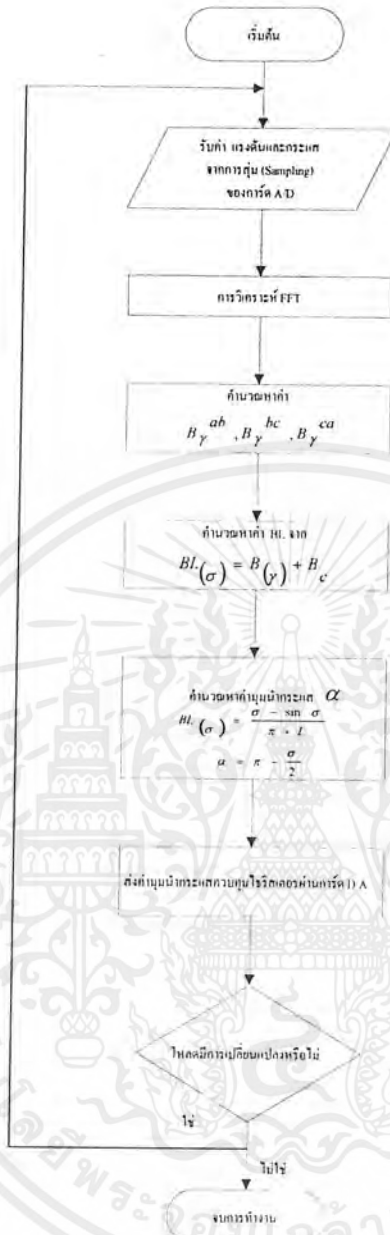
รูปที่ 7 ตัวอย่างการผันกลับบิต (bit-reversing) กรณี $N=16$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 แผนภูมิการคำนวณการแปลงฟาส์ฟูเรียร์ (FFT COMPUTATION FLOWCHART)

จากคุณสมบัติของกราฟการไหลของสัญญาณที่แสดงการคำนวณฟาส์ฟูเรียร์ (FFT Signal Flow graph) สามารถที่พัฒนาเป็นการคำนวณการแปลงฟาส์ฟูเรียร์ด้วยการเขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ จากการอธิบายในหัวข้อที่ผ่านมาสามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณการแปลงฟาส์ฟูเรียร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้ดังนี้

1. คำนวณอาร์เรย์ $l = 1$ โดยเริ่มต้นที่โนด $k = 0$ และทำการคำนวณจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของอาร์เรย์
2. ที่โนด k ใดๆ ให้คำนวณโดยใช้คู่สมการของสมการที่ (ค.70) สำหรับค่า p ใน W^N สามารถหาได้จากกระบวนการที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.5
3. ทำตามข้อ 2 ไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงบริเวณของโนดที่ต้องกระโดดข้ามให้กระโดดข้ามโนดเหล่านี้ไป เนื่องจากได้ทำการคำนวณเรียบร้อยแล้ว และคำนวณในโนดที่ต่อจากบริเวณที่ข้ามไป ทำเช่นนี้จนกว่าจะครบทุกโนดในอาร์เรย์
4. คำนวณอาร์เรย์ที่เหลืออยู่โดยใช้กระบวนการเดียวกัน จนครบทุกอาร์เรย์ (γ อาร์เรย์)
5. ขั้นตอนสุดท้าย ให้ทำการสลับสมาชิกในอาร์เรย์สุดท้าย จะได้ผลลัพธ์ของกระบวนการแปลงฟาส์ฟูเรียร์ตามต้องการ



รูปที่ 8 แสดงแผนภูมิการทำงานสำหรับเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณ กระบวนการแปลงฟาสท์ฟูเรียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การแปลงส่วนประกอบสมมาตร

(The Symmetrical Component Transformation)

เราสามารถแปลงกระแสให้อยู่ในรูปส่วนประกอบสมมาตรได้ดังนี้

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

โดยที่

$$h = e^{j2\omega t} = 1 \angle 120^\circ = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

และเราสามารถแปลงการกลับได้ดังนี้

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

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการสนับสนุนจากหลายฝ่ายด้วยกัน ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง ดังรายนามต่อไปนี้

ผู้ปกครองของผู้จัดทำทุกท่าน

วิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี

คุณวิรัตน์ มั่นวิมาน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย)

คุณนครศักดิ์ แสงศรี

คุณบุญมี นิ่มนวล

คุณชัยทัต มณีอินทร์

คุณ โรมัส ธรรมาธิษฐาน

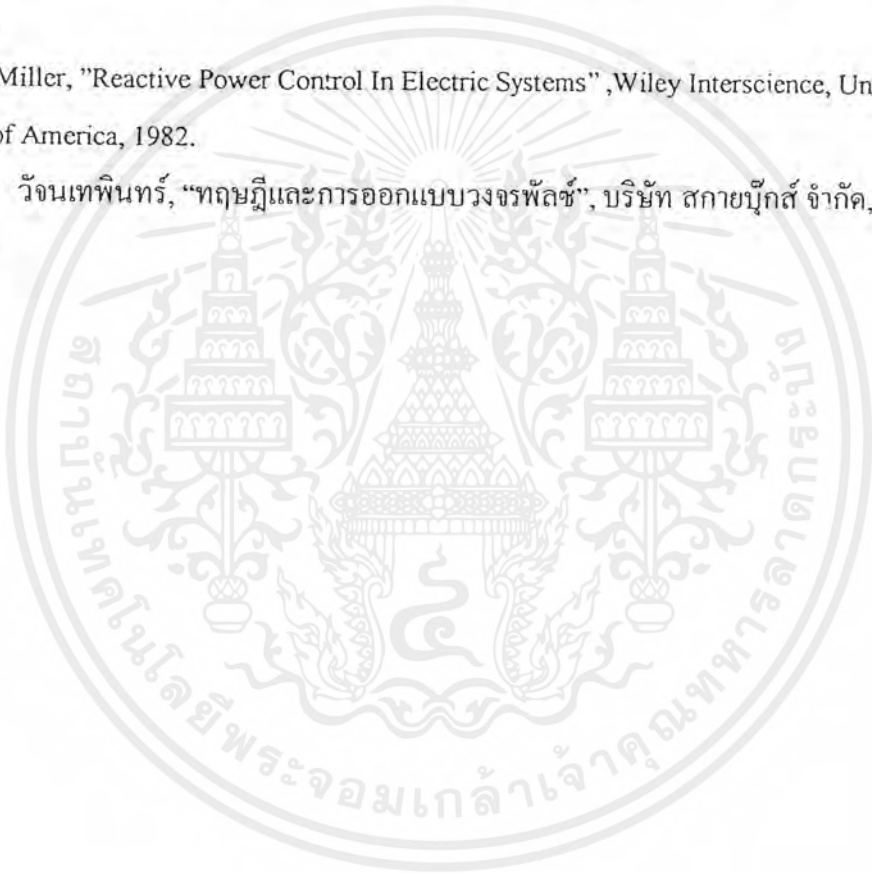
เพื่อนๆ ห้อง 3W ทุกคน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิริยะ พิเศษฐัจฉาวิญ , ดร.วิจิตร กิณเรศ และ อ.สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนช่วยแก้ไข ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] L.Gyugyi, "Power Electronics in Electric Utilities : Static Var Compensators", Proc.IEEE, Vol 76. No.4, 1988, pp.483-494.
- [2] L.Gyugyi, 'Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits', IEEETrans. On Ind. Application, Vol. IA-15, NO.5, 1979, PP.521-531.
- [3] Mohan, Ned. "Power Electronics", John Wiley & Sons,Inc., United State of America, 1995.
- [4] T.J.E.Miller, "Reactive Power Control In Electric Systems" ,Wiley Interscience, United State of America, 1982.
- [5] นภัทร วจนเทพินทร์, "ทฤษฎีและการออกแบบวงจรพัสซ์", บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด, 2538.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้