



การชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์แบบสถติกในระบบไฟฟ้า
STATIC VAR COMPENSATOR IN POWER SYSTEM



โดย
นายธีรศักดิ์ เบ็ญดาแข็ง
นายนิมิต ชรรมวิชิต
นายศิริเดช บุญแสง
นายเอกฉกษณ์ คุ่มสุข

วัน เดือน ปี..... ๒๕๖๓.๑. ๒๐๑๙

เลขทะเบียน..... ๐๖๔๑๙๖

เลขเรียกหนังสือ..... ๓๖๑๒๑๖ ส.๖

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 25๖๓
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

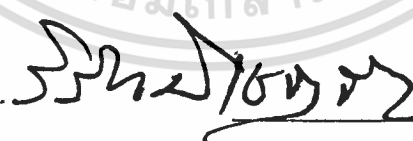
ปริญญานิพนธ์ปี การศึกษา 2537

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง การลดเซย์ร็อกทีฟเพาเวอร์แบบสถติกในระบบไฟฟ้า

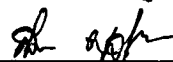
ผู้จัดทำ

1. นายธีรศักดิ์ เบ็ญดาเซ่ง
2. นายนิมิต ธรรมวิจิต
3. นายศิริเดช บุญแสง
4. นายเอกฉกษณ์ คุ้มสุข



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ สมภพ ผลไม้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 จุดประสงค์ของการชดเชยค่าโหด	1
1.2 หลักการทำงานของ TCR	3
บทที่ 2 หลักการชดเชยไฟฟ้าเสมือน	5
2.1 การทำสมมูล 3 เฟสและการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง	5
บทที่ 3 การแปลงฟูเรียร์	20
3.1 ฟูเรียร์อินทิกรัล	20
3.2 การแปลงอินเวอร์สฟูเรียร์	21
3.3 การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง	21
3.4 ขั้นตอนการลดทอนทางเวลา	24
3.5 ความละเอียดของ FFT	26
3.6 การประยุกต์ใช้การแปลงฟูเรียร์กับการหา ตัวประกอบกำลัง	31
บทที่ 4 การทำงานของส่วนชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนและ การควบคุม	49
4.1 การใช้งานส่วนชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน	49
4.2 คอมเพนเซเตอร์แบบ TCR	53
บทที่ 5 การคำนวณหาค่าอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวกรองฮาร์โมนิก	68
บทที่ 6 หลักการควบคุมชุดชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์	72
6.1 การตรวจจับและปรับสภาพสัญญาณ	72
6.2 การประมวลผลที่คอมพิวเตอรื	74
บทที่ 7 การทดสอบและผลการทดลอง	77
บทที่ 8 สรุปผลและวิจารณ์	90

ภาคผนวก
กิตติกรรมประกาศ
เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชดเชยรีเอคทีฟเพาเวอร์แบบสเตติกในระบบไฟฟ้า

นายธีรศักดิ์ เบ็ญลาเชิง

นายนิมิต ธรรมวิจิต

นายศิริเดช บุญแสง

นายเอกลักษณ์ คุ่มสุข

รศ.ดร. วิริยะ พิเชษฐำริณู อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สมภาพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2537

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการเสนอวิธีการควบคุมคุณภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยใช้หลักการชดเชยรีเอคทีฟเพาเวอร์ของระบบ การชดเชยของรีเอคทีฟเพาเวอร์จะประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยทริสเตอร์และคาปาซิเตอร์ชนิดค่าคงที่ รีเอคทีฟเพาเวอร์จะจ่ายเข้าไปในระบบอย่างต่อเนื่องโดยส่วนชดเชย ซึ่งการปรับมุมทริกของทริสเตอร์จะควบคุมปริมาณค่ารีเอคทีฟเพาเวอร์ตามความต้องการของระบบ

การชดเชยรีเอคทีฟเพาเวอร์ของระบบจะสามารถแก้ไขสถานะไม่สมดุลของกระแส และปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้ดีขึ้น ซึ่งการวัดตัวประกอบกำลังจะใช้อัลกอริทึมของฟาสฟูเรียร์ ในการคำนวณ และการประมวลผล,แสดงผลข้อมูล และการควบคุมแบบอัตโนมัติ โดยใช้คอมพิวเตอร์ จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถชดเชยระบบได้ ผลเป็นไปตามทฤษฎี

STATIC VAR COMPENSATOR IN POWER SYSTEM**Theerasak Benlaseng****Nimit Thamvichit****Siridech Boonsang****Aekarak Khumsuk****Assc. Prof.Dr Viriya Phichetchumreon Adviser****Somphop phonlamai Adviser****Abstract**

The purpose of this thesis present the control of Electrical Energy by using reactive power compensating principle. The compensator consists of a thyristor controlled reactor (TCR) biased by a fixed capacitor. The reactive power injected into the system by the compensator is continuously controlled by adjusting the firing angle of the thyristors in the TCR which results in a continuous control of the reactive power demand.

Reactive power copensation can balance line current and power factor correlation. Power factor detection use Fast Fourier Transform (FFT) algorithm. Data processing, User interface and Automatic control by Computer.

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 1.1 สเตติควาคอมเพนเซเตอร์แบบใช้ TCR	3
รูป 2.1 รูปแสดงโหลดไม่สมดุลและการแก้ไข	6
รูป 2.2 วงจรสมมูลที่ได้รับการแก้ไขแล้ว	7
รูป 2.3 เฟเซอร์ไดอะแกรมของลำดับเฟสบวกและลบ	8
รูป 2.4 แสดงการต่อวงจรเพื่อปรับปรุงโหลด 3 เฟส	9
รูป 2.5 แสดงการไหลของกระแสไลน์ และกระแสเฟส	12
รูป 3.1 แสดงตัวอย่างของฟังก์ชันในโดเมนเวลา	20
รูป 3.2 แสดงผลลัพธ์ในลำดับเวลาจากแชนเนลสเปกตรัม	21
รูป 3.3 แสดงความสัมพันธ์ของช่วงเวลาลำดับที่ M	25
รูป 3.4 หน่วยสี่เหลี่ยมของการคำนวณแบบ ดีไอที	33
รูป 3.5 แสดงวิธีแบบ ดีไอที สำหรับ ดีเอฟที 8 จุด	34
รูป 3.6 แสดงกราฟการไหลของสัญญาณ	35
รูป 3.7 ภาพรวมแสดงขั้นตอนการคำนวณทั้งหมด	36
รูป 3.8 แสดงตัวอย่างการแปลงฟูเรียร์	37
รูป 3.9 แสดงรูปการแปลงฟูเรียร์	38
รูป 3.10 แสดงการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนเวลาและความถี่	39
รูป 3.11 แสดงตัวอย่างการเพิ่มความละเอียดของ FFT	40
รูป 3.12 แสดงความผิดพลาดในโดเมนความถี่	41
รูป 3.13 แสดงการตัดทอนในโดเมนเวลา	42
รูป 3.14 แสดงผลจาก FFT จากฟังก์ชันคาบเวลา	43
รูป 3.15 แสดงตัวอย่างการแปลงฟูเรียร์	44
รูป 3.16 แสดงผลจาก FFT จากฟังก์ชันที่มีช่วงการตัดทอนไม่เป็นคาบ	45
รูป 3.17 แสดงฟังก์ชันวินโดว์	46
รูป 3.18 แสดงการใช้ฟังก์ชันแฮนนิ่ง	47
รูป 3.19 แสดงผลจากการรื้อวโหลดอนข้าง	48
รูป 4.1 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนในอุดมคติ	49
รูป 4.2 วันไลน์ไดอะแกรมของ TCR	51

รูป 4.4	วันไลน์ไดอะแกรมของ แชคจูเรทรีแอกเตอร์	51
รูป 4.5	ส่วนต่างๆของ TCR	53
รูป 4.6	รูปคลื่นกระแสไลน์และเฟสเมื่อต่อ TCR	54
รูป 4.7	กฎการควบคุมพื้นฐานของ TCR	55
รูป 4.8	กราฟลักษณะแรงดัน/กระแสมูลฐาน ใน ทีซีอาร์คอมเพนเซเตอร์	56
รูป 4.9	ฮาร์โมนิกส์ของ ทีซีอาร์	57
รูป 4.10	แสดง TCR แบบ 3 เฟส	59
รูป 4.11	แสดง TCR ที่มีช่วงนำกระแสมากกว่า 180	59
รูป 4.12	การจัดเรียง TCR แบบ 12 พัลส์	60
รูป 4.13	การเรียงสลับกันของไทรสเตอร์คอนโทรลทรานฟอร์เมอร์คอมเพนเซเตอร์	61
รูป 4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของ ทีซีอาร์(TCR)	63
รูป 4.15	แสดงคอมเพนเซเตอร์แบบไฮบริด	65
รูป 4.16	แสดงการควบคุมวงปิดและวงเปิด	66
รูป 5.1	แบบของชั้นฟิลเตอร์	69
รูป 5.2	แสดงลักษณะความถี่ของไฮพาสฟิลเตอร์	70
รูป 6.1	แสดงระบบควบคุม	73
รูป 6.2	แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์	74
รูป 7.1	แสดงชุดทดลองวงจร TCR	77
รูป 7.2	แสดงคาปาซิเตอร์แมงกั	78
รูป 7.3	แสดงส่วนฮาร์โมนิกฟิลเตอร์	78
รูป 7.4	แสดงผลก่อนใช้เครื่องมือเมื่อโหลดเป็นมอเตอร์และโหลดไฟ	79
รูป 7.5	แสดงลักษณะของแรงดันก่อนใช้เครื่อง	79
รูป 7.6	แสดงลักษณะของกระแสในเฟส a ก่อนใช้เครื่อง	80
รูป 7.7	แสดงลักษณะของกระแสในเฟส b ก่อนใช้เครื่อง	80
รูป 7.8	แสดงลักษณะของกระแสในเฟส c ก่อนใช้เครื่อง	81
รูป 7.9	แสดงลักษณะของกระแสในเฟส c หลังใช้เครื่อง	81
รูป 7.10	แสดงสภาวะเมื่อเริ่มต้นใช้เครื่อง	82
รูป 7.11	แสดงสภาวะเมื่อเข้าสู่สมดุล	82
รูป 7.12	แสดงผลของระบบเมื่อเข้าสู่สมดุล	83
รูป 7.13	แสดงกระแสเมื่อวัดจากสโคป	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 7.14 แสดงลักษณะของระบบโพลคเป็นมอเตอร์	84
รูป 7.15 แสดงสถานะเมื่อเริ่มต้นใช้เครื่อง	84
รูป 7.16 แสดงสถานะเมื่อเข้าสู่สมดุล	85
รูป 7.17 แสดงผลของระบบเมื่อเข้าสู่สมดุล	85
รูป 7.18 แสดงลักษณะของโพลคไม่สมดุลก่อนใช้เครื่อง	86
รูป 7.19 แสดงสถานะเมื่อเริ่มต้นใช้เครื่อง	86
รูป 7.20 แสดงสถานะเมื่อเริ่มเข้าสู่สมดุล	87



บทที่ 1

บทนำ

1.1 จุดประสงค์ของการชดเชยค่าโหลด

การชดเชยค่าโหลด (load compensation) เป็นการจัดการกำลังงานเสมือน (reactive power) เพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีจุดมุ่งหมายที่สำคัญ คือ

1. การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor)
2. การแก้ไขค่า โวลเตจเรกูเรชัน (voltage regulation)
3. การทำสมดุลโหลด (load balancing)

- การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

เป็นการสร้างกำลังไฟฟ้าเสมือนเพิ่มเติมจากการจ่ายไฟของการไฟฟ้าให้มีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนใกล้เคียงกับที่โหลดต้องการ โหลดในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีตัวประกอบกำลังล่าช้า (lagging) กล่าวคือ จะรับกำลังไฟฟ้าเสมือน ดังนั้นกระแสโหลดจะมีค่ามากขึ้นกว่าที่ต้องการกำลังไฟฟ้าจริงจากแหล่งจ่ายอย่างเฉียว กำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้นที่ใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนรูปพลังงานและกระแสโหลดส่วนเกินจะเป็นส่วนที่สูญเสียไป ซึ่งไม่เพียงแต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการใช้สายที่มีขนาดใหญ่แล้วแต่ยังสูญเสียในรูปพลังงานความร้อนที่สายอีกด้วย ด้วยเหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องหาอุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับ โหลดซึ่งก็คือตัวเก็บประจุ (Capacitor) นั่นเอง โดยเราจะทำการควบคุมให้ตัวเก็บประจุจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดจนทำให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียง 1 หรือ ยูนิตีพาวเวอร์แฟกเตอร์ (unity power factor)

- การแก้ไขค่า โวลเตจเรกูเรชัน (Voltage regulation)

โหลดทุกชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลทำให้เปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่จุดต่อกับแหล่งจ่าย (regulation) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของเครื่องจักรไฟฟ้าของผู้รับไฟจากการไฟฟ้าคนอื่น เพื่อที่จะป้องกันเหตุการณ์เช่นนี้ทางการไฟฟ้าจึงออกกฎข้อบังคับให้ผู้ใช้ไฟฟ้ารักษาระดับแรงดันภายในขีดจำกัดที่กำหนด (ขีดจำกัดนี้อาจมีค่าประมาณ $\pm 5\%$ ของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย) การเปลี่ยนแปลงไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ลดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าโหลดอย่างรวดเร็วจะทำให้แรงดันลดลง และเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ป้องกันระบบ (protective equipment) ด้วยเหตุดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์แก้ไขค่าโวลเตจเรกูเรชั่นของแรงดัน เพื่อที่ช่วยรักษาระดับแรงดันของแหล่งจ่ายให้อยู่ในขีดจำกัดที่ต้องการ

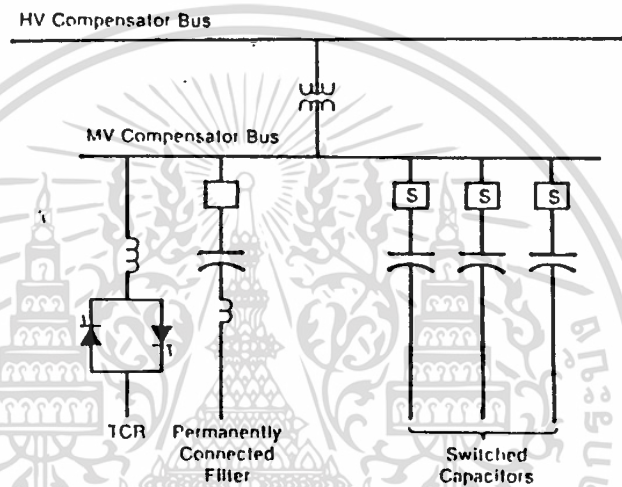
วิธีที่เห็นเด่นชัดที่สุดในการแก้ไขค่าโวลเตจเรกูเรชั่น ก็คือ การทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมั่นคงขึ้นโดยการเพิ่มขนาดและจำนวนของหน่วยผลิตไฟฟ้า (generation units) หรือสร้างระบบเครือข่ายที่ต่อเชื่อมกันให้หนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่วิธีดังกล่าวนี้เป็นวิธีที่ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และอาจนำไปสู่ปัญหาเกี่ยวกับระดับไฮฟอลต์ และสวิตช์เกียร์เรตติ้ง สำหรับวิธีที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติและคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ก็คือ การควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังตามค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด และจัดการกับกำลังไฟฟ้าเสมือนโดยใช้ คอมเพนเซเตอร์ และอุปกรณ์อื่นๆที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนได้ต่ำกว่าหน่วย เงินเนอร์เรตติ้งและไม่ก่อให้เกิด ฟอลต์ (fault)

- การทำสมดุลโหลด

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังกระแสสลับทั้งหมดเป็นระบบ 3 เฟส และถูกออกแบบมาสำหรับทำงานที่สมดุล 3 เฟส เนื่องจากการทำงานในขณะที่ระบบไม่สมดุลจะทำให้กระแสในลำดับเฟสที่ผิดมีค่าสูงขึ้น และอาจก่อให้เกิดเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ได้ รวมถึงความสูญเสียในมอเตอร์ และหน่วยเงินเนอร์เรตติ้งของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ , รีฟเฟิลด์ ที่เพิ่มขึ้นใน เรดิฟายเออร์ , การปฏิบัติงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ต่างๆ , การอิมพัลส์ของหม้อแปลง , และกระแสนิวทรัล (neutral current) ที่เกินไป ที่สภาวะโหลดสมดุลอุปกรณ์บางอย่าง อาทิ คอมเพนเซเตอร์ จะสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ได้ แต่ถ้าภายใต้โหลดไม่สมดุลจะมีฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ปรากฏขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

ส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ในรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่แสดงถึงคุณภาพของแหล่งจ่าย ส่วนที่เป็นปัญหาคือเฉพาะสเปกตรัมที่มีความถี่สูงกว่าความถี่พินคาเมินทอล เท่านั้น ฮาร์โมนิกส์มักจะถูกกำจัดโดยใช้ตัวกรอง (filters) แม้กระนั้นก็ตามปัญหาฮาร์โมนิกส์ก็มักจะเกิดขึ้นพร้อมกับปัญหาการชดเชยค่าโหลด นอกจากนี้ คอมเพนเซเตอร์ หลายแบบที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์ซึ่งจะต้องทำการกำจัดภายในแต่ละตัวหรือกรองฮาร์โมนิกส์ที่ภายนอก

1.2 หลักการทำงานของ ไทริสเตอร์คอลลโทรลรีแอคเตอร์ [Thyristor Control Reactor (TCR)]



รูปที่ 1.1 สแตติกวาคอมเพนเซเตอร์ โดยใช้ ฟิกเจอร์ปาสีเตอร์ และ ไทริสเตอร์คอลลโทรลรีแอคเตอร์

เนื่องจากโหลดทางอุตสาหกรรมส่วนมากจะมีตัวประกอบกำลังต่ำหลังหรือ เร็กทีฟพาวเวอร์แฟคเตอร์ดังนั้นในการชดเชยค่ารีแอคทีฟพาวเวอร์ ให้กับโหลดจึงต้องต่อตัวเก็บประจุ (fix capacitor) และ ไทริสเตอร์คอลลโทรลรีแอคเตอร์ ดังรูปที่ 1 โดยตัวเก็บประจุจะจ่าย รีแอคทีฟพาวเวอร์ power ได้พอเพียงกับความต้องการของโหลดและทีซีอาร์ (TCR) จะต้องครอบคลุมค่าแตกต่างระหว่าง รีแอคทีฟพาวเวอร์ของตัวเก็บประจุ Q_C กับค่ารีแอคทีฟพาวเวอร์ ที่แท้จริงที่โหลดรับเข้าไป $q_{load}(t)$ ค่า รีแอคทีฟพาวเวอร์ $Q_C - q_{load}(t)$ จะไหลเวียนระหว่างตัวเก็บประจุกับ รีแอคเตอร์ (X_L) และกระแสที่เกิดจากการควบคุมของทีซีอาร์ จะทำให้ส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์สูงๆมีค่าเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องมีส่วน ฟิวเตอร์ กรองฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นนี้

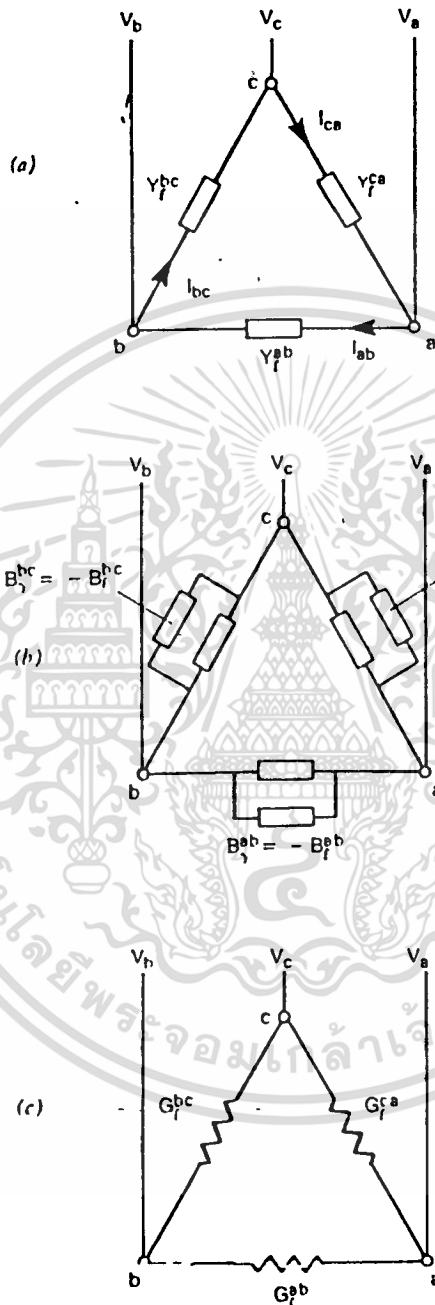
ในการควบคุมให้ได้ค่า รีแอกทีฟพาวเวอร์ ตามที่โหลดต้องการทำได้โดยควบคุม กระแสที่ไหลผ่านอินดักเตอร์(L) ให้ได้ค่าที่ทำให้รีแอกทีฟพาวเวอร์รวมของคอมเพ็นเซเตอร์มีค่าเท่ากับ ความต้องการรีแอกทีฟพาวเวอร์ ของโหลด ในการควบคุมกระแสดังกล่าวนี้จะควบคุมจากมุลทริก ไทริสเตอร์ซึ่งเมื่อมุลนำกระแสของไทริสเตอร์เปลี่ยนไปจะทำให้ค่าอาร์เอ็มเอส ของกระแสที่ไหลผ่าน อินดักเตอร์(L) เปลี่ยนไปด้วย จากเหตุผลนี้เองเราจึงสามารถควบคุมรีแอกทีฟพาวเวอร์ ของระบบได้ โดยการควบคุมมุลทริก ไทริสเตอร์ สำหรับในโครงการนี้มุลทริก ไทริสเตอร์ จะคำนวณโดยอาศัย เครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะหาค่า พาวเวอร์แฟกเตอร์ ของระบบโดยวัดจากสัญญาณของแรงดันและกระแส แล้วมาผ่านอัลกอริทึมของฟาสฟูริเยร์ทรานฟอร์ม (FFT) ซึ่งจะได้ขนาดและมุมของแต่ละฮาร์โมนิกส์และนำมาคำนวณหาค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์เมื่อได้ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ แล้วก็จะทำการคำนวณหา มุลทริกที่เหมาะสมส่งผ่าน เอทูดิ คาร์คมายังวงจรควบคุมการทริกไทริสเตอร์ ต่อไป



คั้งนั้นคอมเพนเซตังซ์เซฟแดนส์ จะเป็น

$$B_{\gamma}^{ab} = -B_{\Gamma}^{ab}$$

.....(2.2)



รูปที่ 2.1 (ก) โหลดสามเฟสไม่สมดุล

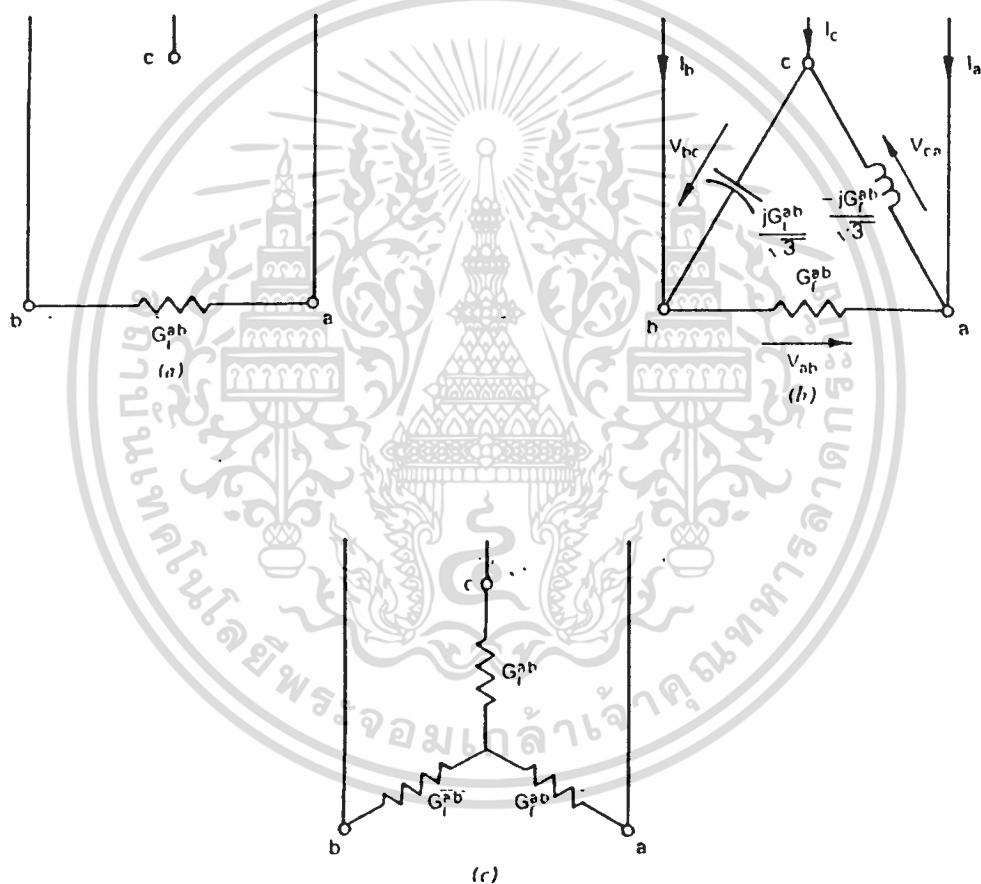
(ข) การต่อ ชัศเซฟแดนส์ เพื่อแก้ค่า พาวเวอร์แฟกเตอร์ ในแต่ละเฟส

(ค) โหลดคัลพัทธ์ที่มีค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ เป็น 1 แต่ยังไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันคอมเพนเซตติ้งซัสเซ็ปแดนส์ $B_Y^{bc} = -B_1^{bc}$ และ $B_Y^{ca} = -B_1^{ca}$ จะถูกต้องขนานกับ Y_1^{bc} และ Y_1^{ca} ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.1b และโหลดแอดมิตแดนส์ลัพท์ จะได้ดังรูปที่ 2.1c ซึ่งจะเป็นค่าจริงทำให้ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์เป็น 1 (unity) แต่ยังคงไม่สมดุล (unbalanced) อยู่

การทำโหลดค่าจริงที่ไม่สมดุลให้สมดุลนั้น ก่อนอื่นขอให้พิจารณาโหลดหนึ่งเฟส G_1^{ab} (รูปที่ 2.2a) เราสามารถทำให้กระแส ลาย (line) ลำดับบวกสามเฟสสมดุลได้โดยการต่อคาปาซิทีฟซัสเซ็ปแดนส์ ระหว่างเฟส บี (b) และเฟสซี (c) ที่มีค่า



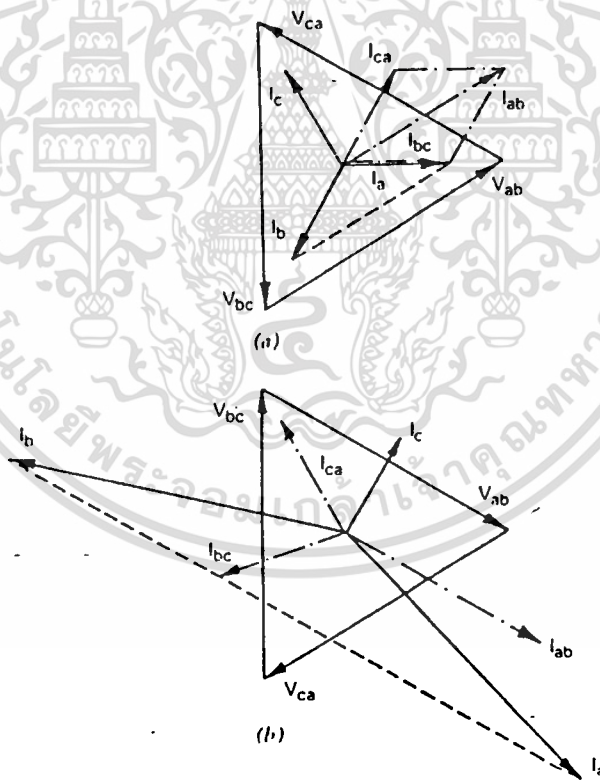
- รูปที่ 2.2 (ก) โหลด 1 เฟส ขุนิตีพาวเวอร์แฟคเตอร์ก่อนที่จะทำการสมดุลลำดับเฟสบวก
 (ข) การทำสมดุลลำดับเฟสบวกของโหลด 1 เฟส ขุนิตีพาวเวอร์แฟคเตอร์
 (ค) วงจรสมมูลลำดับเฟสบวกของโหลด 1 เฟส ที่ถูกปรับปรุงแล้ว

$$B_Y^{bc} = \frac{G_1^{ab}}{\sqrt{3}} \quad \text{.....(2.3)}$$

และ อินดักทีฟซีสทีฟแดนซ์ (inductive susceptance)

$$B_Y^{ca} = -\frac{G_1^{ab}}{\sqrt{3}} \quad \text{.....(2.4)}$$

ระหว่างเฟส c กับเฟส a ดังแสดงในรูปที่ 2.2b และจะได้กระแส line I_a , I_b , และ I_c กรณีแรงดันลำดับบวก (positive-sequence voltage) V_{ab} , V_{bc} , และ V_{ca} ดังแสดงในรูปที่ 2.3a กระแสไลน์ นั้นไม่เพียงแต่จะสมดุลกันเท่านั้น แต่ยังจะต้องมีเฟสตรง (inphase) กับแต่ละแรงดันเฟส (phase voltage) ที่สอดคล้องกันด้วย ดังนั้นแหล่งจ่ายที่ต่อแบบวาย (Y) แต่ละเฟสจะจ่ายกำลังงานเป็น $1/3$ ของกำลังงานทั้งหมด และไม่มีกำลังไฟฟ้าเสมือน สำหรับกรณีแรงดันลำดับบวก จะได้ว่าวงจรสมมูลเป็นตัวต้านทานซึ่งมีค่าคอนดักแตนซ์ G_1^{ab} 3 ตัวต่อกันแบบวาย(Y)



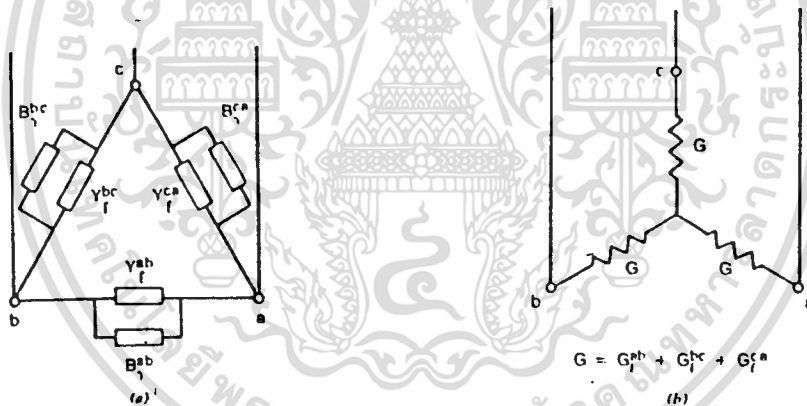
รูปที่ 2.3 (ก)ผลการตอบสนองของรูปที่2.2c ในรูปเฟสเซอร์ไคอะแกรมกรณีลำดับเฟสบวก
(ข)ผลการตอบสนองของรูปที่2.2c ในรูปเฟสเซอร์ไคอะแกรม กรณีลำดับเฟสลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คังรูปที่ 2.2c และกำลังงานทั้งหมดมีค่า $3V^2G_1^{ab}$ เมื่อ V เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันไลน์ทูนิวทอน จากแหล่งจ่ายที่สมมุติว่าสมดุลโดยทั้งพาวเวอร์แฟกเตอร์ทั้งหมดและพาวเวอร์แฟกเตอร์ในแต่ละเฟสของแหล่งจ่ายจะมีค่าเป็น 1 แม้ว่ากระแสในแต่ละขบวนของเซลล์จะไม่สมดุล แต่จะมีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนสมดุลภายในเซลล์ กล่าวคือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างขึ้นจากตัวเก็บประจุระหว่างสาย บี และ ซี มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ตัวเหนี่ยวนำ (inductor) ระหว่างสาย ซี และ เอ รับเข้าไป ดังนั้นจึงไม่มีการสร้างหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนจากแหล่งจ่าย

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นจริงว่า การทำสมดุลโหลดขึ้นอยู่กับลำดับเฟส ในรูปที่ 2.3b ได้แสดงกระแสสายที่ได้จากเนกาทีฟซีควีนซ์ฟรายโวลต์โดยที่ทั้งกระแสไลน์ และ กระแสในแต่ละ ขบวน ของเซลล์จะไม่สมดุล แม้ว่ากำลังงานรวมยังคงมีค่าเหมือนเดิม ($=3V^2G_1^{ab}$) และไม่มีกำลังไฟฟ้าเสมือนถูกจ่ายจากหรือรับเข้าไปในระบบแหล่งจ่ายเลขก็ตาม อย่างไรก็ตามค่า พาวเวอร์แฟกเตอร์ ในทั้ง 3 เฟสของแหล่งจ่ายจะไม่เป็น 1 (unity)



รูปที่ 2.4 (ก) แสดงการต่อวงจรเพื่อปรับปรุงโหลด 3 เฟส
(ข) วงจรสมมูลกรณีแรงดันลำดับเฟสบวก

แอดแดนซ์ ค่าจริงในเฟสที่เหลือ (bc และ ca) สามารถทำให้สมดุลได้โดยวิธีเดียวกับเฟส ab ดังนั้น G_1^{bc} จะถูกทำให้สมดุลโดยใช้คอมเพนเซตติ้งชัซเซพแดนซ์ $B_1^{ca} = G_1^{bc} / \sqrt{3}$ และ $B_1^{ab} = -G_1^{bc} / \sqrt{3}$ ระหว่างสายซีกับเอและ เอ กับ บี ตามลำดับเมื่อเรารวมชัซเซพแดนซ์ ที่ใช้แก้ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์เข้ากับสมการที่ 2.2 ทำให้ตอนนี้แต่ละขบวนของเซลล์มีคอมเพนเซตติ้ง ชัซเซพแดนซ์ 3 ตัวขนานกันซึ่งสามารถรวมกันได้เป็นเครือข่าย “ที่เฟสเซลล์คอนเน็คไอคิวคอมเพนเซตติ้ง” ซึ่งส่วนชดเชยที่ต้องใส่เข้าไปในแต่ละเฟสจะเป็น

$$\begin{aligned}
 B_{\gamma}^{ab} &= -B_{\ell}^{ab} + (G_{\ell}^{ca} - G_{\ell}^{bc})/\sqrt{3} \\
 B_{\gamma}^{bc} &= -B_{\ell}^{bc} + (G_{\ell}^{ab} - G_{\ell}^{ca})/\sqrt{3} \\
 B_{\gamma}^{ca} &= -B_{\ell}^{ca} + (G_{\ell}^{bc} - G_{\ell}^{ab})/\sqrt{3}
 \end{aligned}
 \tag{2.5} \# \#$$

ส่วนชดเชยนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4a และทำให้โหลดแอดมิตแตนซ์ ที่ชดเชยเรียบ-ร้อยแล้ว (compensated load admittances) เป็นค่าจริงและสมมูล ดังแสดงเป็นวงจรสมมูลในรูปที่ 2.4b (วงจรสมมูลนี้ใช้ได้กับเฉพาะ positive-sequence voltage เท่านั้น)

ในกรณีที่โหลดคอลดคัมแคนซ์สมมูล (ซึ่งเกิดจากโหลดต้องการกำลังงานเท่ากันทั้ง 3 เฟส) จะได้ $G_1^{ca} - G_1^{bc} = 0$ ดังนั้นวงจรคอมเพนเซตติ้ง ก็ไม่ต้องทำอะไรมากไปกว่าการไม่ใช้หรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนในแต่ละบรานช์ ของโหลด

เราสามารถสรุปหลักสำคัญของการชดเชยค่าโหลดได้ดังนี้

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

ถ้าโหลดแอดมิตแตนซ์เปลี่ยนแปลงค่าซ์สเซฟแตนซ์ ของวงจรชดเชยโหลดจะต้องเปลี่ยนไปเพื่อที่จะสามารถทำให้โหลดสมมูลได้

2.1.2 การชดเชยโหลดในเทอมของจิมเมตริกอลคอมโพเนนท์

หลักของการชดเชยโหลดตามสมการที่ 2.5 และตามที่สรุปไว้ 2 ข้อท้ายหัวข้อที่แล้ว จะเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่าเราจะต้องทำให้รีแอกทีฟคอมเพนเซเตอร์ ทำงานอย่างไร ซึ่งจะเป็นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางทฤษฎี สำหรับในการออกแบบ คอมเพนเซเตอร์ ใช้งานจริงนั้น ถ้าใช้สมการที่ 2.5 เป็นสมการพื้นฐานในการคำนวณแล้วจะไม่สะดวกในการควบคุมระบบ เพราะค่า ำซ้สเซพแดนซ์ ของคอมเพนเซเตอร์ ที่ต้องการถูกกำหนดในเทอมของ โหลดแอดมิตแดนซ์ ซึ่งไม่สามารถวัดค่าได้เลยเหมือนอย่างกระแสไลน์ และแรงดัน ด้วยเหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องทำให้สูตรหา คอมเพนเซตัง ำซ้สเซพแดนซ์ อยู่ในรูปของกระแสไลน์ กับแรงดัน ซึ่งสูตรนี้จะแสดงให้เห็นถึงวิธีการสร้างสัญญาณทางไฟฟ้าส่งไปยังคอมเพนเซเตอร์ ตามความต้องการ คาปาซิทิพ หรือ อินดักทิพ ำซ้สเซพแดนซ์ ในแต่ละเฟส โดยระบบควบคุม คอมเพนเซเตอร์ จะต้องสามารถปรับค่า ำซ้สเซพแดนซ์ ของ คอมเพนเซเตอร์ ให้ได้เพียงพอกับความต้องการ

การวิเคราะห์โหลดไม่สมดุลโดยการแปลงสูตรหา คอมเพนเซตัง ำซ้สเซพแดนซ์ ที่ต้องการในเทอมกระแส ไลน์ และแรงดัน จะมีความยากในการวิเคราะห์ตรงที่ไม่มีวิธีการทางคณิตศาสตร์โดยเฉพาะที่รวบรัดที่ทำให้กระแสในระบบซเซพสมดุลได้ แต่ปัญหาตรงจุดนี้สามารถขจัดออกไปได้โดยขั้นแรกแปลงกระแสและแรงดันให้อยู่ในรูป ซิมเมตริกอลคอมโพเนนท์ ต่อจากนั้นก็ใช้การแปลงกลับ (inverse transformation) เพื่อที่จะแสดง คอมเพนเซตัง ำซ้สเซพแดนซ์ ที่ต้องการในเทอมของกระแส line และแรงดันที่เกิดขึ้นจริง

การใช้ ซิมเมตริกอลคอมโพเนนท์ จะมีประโยชน์ในการกำหนดลักษณะของคอมเพนเซเตอร์ แบบต่างๆ กับโหลดที่ไม่สมดุล และด้านแหล่งจ่ายเป็น เนกกาทีพซีแควนซ์คอมเพนเซเตอร์ ก็จะมีลักษณะแตกต่างออกไปอีก

โหลดไม่สมดุลดังรูปที่ 2.1a ถูกจ่ายด้วยแรงดัน 3 เฟสสมดุล แบบลำดับเฟสบวก (positive phase sequence) ซึ่งมีค่าแรงดัน ไลน์-นิวตรอนอาร์เอ็มเอส เป็น

$$\begin{aligned} V_a &= V \\ V_b &= h^2 V \\ V_c &= hV \end{aligned} \quad \text{.....(2.6)}$$

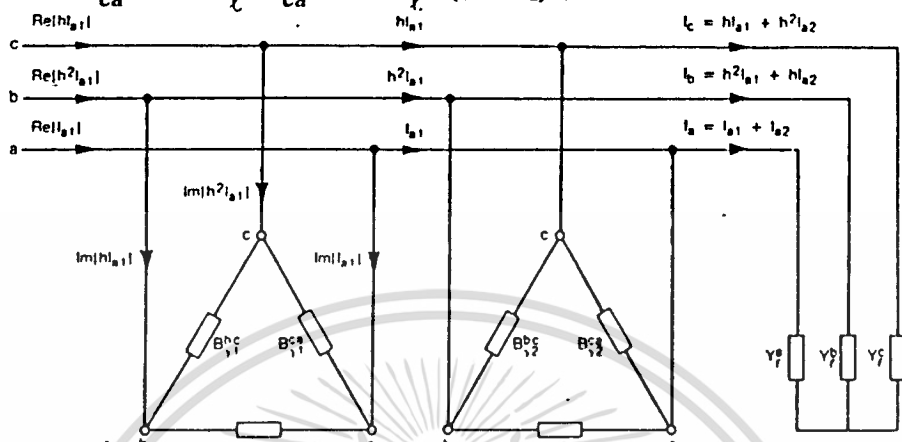
$$\text{เมื่อ } h = e^{j2\pi/3} = \cos\frac{2\pi}{3} + j\sin\frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{.....(2.7)}$$

ค่าแรงดัน ไลน์ทูไลน์ เป็น

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b = (1 - h^2)V \\ V_{bc} &= V_b - V_c = (h^2 - h)V \\ V_{ca} &= V_c - V_a = (h - 1)V \end{aligned} \quad \text{.....(2.8)}$$

ค่ากระแสโหลดในแต่ละ บรานซ์ ของ เอลต้า เป็น

$$\begin{aligned}
 I_{ab} &= Y_{\ell}^{ab} V_{ab} = Y_{\ell}^{ab} (1-h^2)V \\
 I_{bc} &= Y_{\ell}^{bc} V_{bc} = Y_{\ell}^{bc} (h^2-h)V \\
 I_{ca} &= Y_{\ell}^{ca} V_{ca} = Y_{\ell}^{ca} (h-1)V
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$



รูปที่ 2.5 แสดงการไหลของกระแสไลน์ และกระแสเฟส (กระแสใน branch)

และกระแสไลน์ เป็น

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{ab} - I_{ca} = [Y_{\ell}^{ab}(1-h^2) - Y_{\ell}^{ca}(h-1)]V \\
 I_b &= I_{bc} - I_{ab} = [Y_{\ell}^{bc}(h^2-h) - Y_{\ell}^{ab}(1-h^2)]V \\
 I_c &= I_{ca} - I_{bc} = [Y_{\ell}^{ca}(h-1) - Y_{\ell}^{bc}(h^2-h)]V
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

ขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นการแปลงกระแสไลน์ ให้อยู่ในรูป ซิมเมตริกคอลอมโพเนนท์ ซึ่งการแปลงซิมเมตริกคอลอมโพเนนท์ จะมีหลักการดังรายละเอียดต่อไปนี้

การแปลงจะประกอบด้วยตัวคูณ(multiplying factor) $1/\sqrt{3}$ เพื่อที่จะทำให้มั่นใจว่ากำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอ(คงที่) การแปลงจะใช้สัญลักษณ์ $C^{-1} = C^*$ การแปลง ซิมเมตริกคอลอมโพเนนท์ สามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & h & h^2 \\ 1 & h^2 & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}
 \tag{2.11}$$

เมื่อ $h = e^{j2\pi/3}$ และ I_0, I_1 และ I_2 เป็นเฟสเซอร์อ้างอิงของซีโรโพสิทีฟ และเนกาทีฟซีแควนซ์เซ็ต ตามลำดับ

การแปลงอินเวอร์ซิมเมตริกคอลอมโพเนนท์ เป็น

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & h^2 & h \\ 1 & h & h^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \text{.....(2.12)}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.10 และ 2.11 จะสามารถหาค่ากระแสไลน์ ในรูปของ จิมเมตริกคอลลอมโพเนนซ์ ได้เป็น

$$\begin{aligned} I_0 &= (I_a + I_b + I_c) / \sqrt{3} \\ &= (I_{ab} - I_{ca} + I_{bc} - I_{ab} + I_{ca} - I_{bc}) / \sqrt{3} \\ &= 0 \end{aligned} \quad \text{.....(2.13) \#}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= (I_a + hI_b + h^2I_c) / \sqrt{3} \\ &= \frac{V}{\sqrt{3}} \left[[Y_\ell^{ab}(1-h^2) - Y_\ell^{ca}(h-1)] + h[Y_\ell^{bc}(h^2-h) - Y_\ell^{ab}(1-h) \right. \\ &\quad \left. + h^2[Y_\ell^{ca}(h-1) - Y_\ell^{bc}(h^2-h)] \right] \\ &= \frac{V}{\sqrt{3}} \left[\underbrace{Y_\ell^{ab}(1-h^2-h+h^3)}_I + \underbrace{Y_\ell^{bc}(h^3-h^2-h^4+h^3)}_{II} \right. \\ &\quad \left. + \underbrace{Y_\ell^{ca}(-h+1+h^3-h^2)}_{III} \right] \end{aligned} \quad \text{.....(2.14.1)}$$

เนื่องจาก

$$\begin{aligned} h &= e^{j2\pi/3} = \cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ h^2 &= e^{j4\pi/3} = \cos \frac{4\pi}{3} + j \sin \frac{4\pi}{3} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ h^3 &= e^{j6\pi/3} = e^{j2\pi} = \cos 2\pi + j \sin 2\pi = 1 \\ h^4 &= e^{j8\pi/3} = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned}$$

พิจารณาส่วน I ในสมการ (2.14.1) แทนค่า h , h^2 , h^3 จะได้

$$1 - h - h^2 + h^3 = 1 - \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + 3 = 3$$

พิจารณาส่วน II ในสมการ (2.14.1) แทนค่า h^2, h^3, h^4 จะได้

$$-h^2 + 2h^3 - h^4 = -\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + 2(1) - \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 3$$

พิจารณาส่วน III ในสมการ (2.14.1) ซึ่งเหมือนกับส่วน I

แทนค่าแต่ละส่วนที่พิจารณาลงในสมการที่ 2.14.1 จะได้ I_1 มีค่าเป็น

$$I_1 = \frac{V}{\sqrt{3}} [Y_\ell^{ab}(3) + Y_\ell^{bc}(3) + Y_\ell^{ca}(3)] = (Y_\ell^{ab} + Y_\ell^{bc} + Y_\ell^{ca}) V \sqrt{3} \quad \text{.....(2.14.2) \#}$$

$$I_2 = \frac{(I_a + h^2 I_b + h I_c)}{\sqrt{3}} = \frac{V}{\sqrt{3}} \left[\begin{aligned} & [Y_\ell^{ab}(1-h^2) - Y_\ell^{ca}(h-1)] \\ & + h^2 [Y_\ell^{bc}(h^2-h) - Y_\ell^{ab}(1-h^2)] \\ & + h [Y_\ell^{ca}(h-1) - Y_\ell^{bc}(h^2-h)] \end{aligned} \right] = \frac{V}{\sqrt{3}} \left[\begin{aligned} & \underbrace{Y_\ell^{ab}(1-h^2-h^2+h^4)}_I + \\ & \underbrace{Y_\ell^{bc}(h^4-h^3-h^3+h^2)}_{II} \\ & + \underbrace{Y_\ell^{ca}(-h+1+h^2-h)}_{III} \end{aligned} \right] \quad \text{.....(2.15.1)}$$

พิจารณาส่วน I ในสมการ (2.15.1) แทนค่า h^2, h^4 จะได้

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

พิจารณาส่วน II ในสมการ (2.15.1) แทนค่า h^2 , h^3 , h^4 จะได้

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

พิจารณาส่วน III ในสมการ (2.15.1) แทนค่า h , h^2 จะได้

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

แทนค่าแต่ละส่วนที่พิจารณาลงในสมการที่ 2.15.1 จะได้ I_2 มีค่าเป็น

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \frac{V}{\sqrt{3}} \left[Y_\ell^{ab}(-3h^2) + Y_\ell^{bc}(-3) + Y_\ell^{ca}(-3h) \right] \dots(2.15.2) \# \\
 &= -\left(h^2 Y_\ell^{ab} + Y_\ell^{bc} + h Y_\ell^{ca} \right) V \sqrt{3}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 2.13 , 2.14.2 , 2.15.2 สรุปได้ว่า I_0 , I_1 และ I_2 ซึ่งเป็นเฟสเซอร์อ้างอิงของ ซีโร โทจิทัพ และ เมกกาทีพซีแควนซ์เซ็ต ตามลำดับ จะมีสมการเป็น

$$\begin{aligned}
 I_0 &= 0 \\
 I_1 &= \left(Y_\ell^{ab} + Y_\ell^{bc} + Y_\ell^{ca} \right) V \sqrt{3} \\
 I_2 &= -\left(h^2 Y_\ell^{ab} + Y_\ell^{bc} + h Y_\ell^{ca} \right) V \sqrt{3} \\
 \dots\dots(2.16)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.15.2 ถ้าโหลดสมดุล ($Y_{\ell}^{ab} = Y_{\ell}^{bc} = Y_{\ell}^{ca}$) จะทำให้

$$\begin{aligned} I_2 &= -(h^2 + 1 + h)Y_{\ell}^{ab}V\sqrt{3} \\ &= -\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} + 1 - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)Y_{\ell}^{ab}V\sqrt{3} \\ &= 0 \end{aligned}$$

นั่นคือไม่มีกระแสเนกาทีฟซีแควนซ์

จิมเมตริกอลคอมโพเนนซ์ ของกระแสไลน์ ของรีแอกทีฟ คอมเพนเซเตอร์ ที่ต่อแบบ เดลต้า จะกำหนดขึ้นสอดคล้องกันโดย

$$\begin{aligned} I_0(\gamma) &= 0 \\ I_1(\gamma) &= j(B_{\gamma}^{ab} + B_{\gamma}^{bc} + B_{\gamma}^{ca})V\sqrt{3} \\ I_2(\gamma) &= -j(h^2B_{\gamma}^{ab} + B_{\gamma}^{bc} + hB_{\gamma}^{ca})V\sqrt{3} \end{aligned} \quad \text{.....(2.17) ***}$$

โหลดที่ชดเชยแล้วจะสมดุลได้ ก็ต่อเมื่อกระแสลำดับลบ (negative-sequence current) มีค่าเป็น 0 กล่าวคือ

$$I_2(\ell) + I_2(\gamma) = 0 \quad \text{.....(2.18) \#}$$

เมื่อซับซ้อนที่ 1 ที่เพิ่มเข้าไปนั้น เพื่อแสดงว่า $I_2(\ell)$ เป็นกระแสโหลด สมการนี้จะใช้ทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ $I_2(\ell)$ และ $I_2(\gamma)$ ในการชดเชยโหลดนี้ ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ รวมของโหลดจะมีค่าเป็น 1 (unity) ก็ต่อเมื่อ ส่วนจินตภาพของกระแสไลน์ ลำดับบวก (positive-sequence line current) มีค่าเป็น 0 นั่นคือ

$$\text{Im}\left[I_1(\ell) + I_1(\gamma)\right] = 0 \quad \text{.....(2.19) \#}$$

จากที่กล่าวไว้แล้วที่ต้นหัวข้อนี้ว่า เราต้องการหาค่า คอมเพนเซตติ้งคอมโพเนนซ์ ที่ต้องการในเทอมของกระแสไลน์ และแรงดัน ดังนั้นถ้าเราแทนค่า $I_0(\gamma)$, $I_1(\gamma)$ และ $I_2(\gamma)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.17 ลงในสมการที่ 2.18 และ 2.19 จะทำให้เราได้สูตรของ B_γ^{ab} , B_γ^{bc} และ B_γ^{ca} ซึ่งเป็นค่า ขั้วเซพแทนซ์ ของ คอมเพนเซเตอร์ ในอุดมคติ

- แทนค่า $I_{2(\gamma)}$ จากสมการที่ 2.17 ลงในสมการที่ 2.18 จะได้

$$I_{2(\ell)} - j(h^2 B_\gamma^{ab} + B_\gamma^{bc} + h B_\gamma^{ca}) V \sqrt{3} = 0 \dots (2.20)$$

$$\text{Re } I_{2(\ell)} + j \text{Im } I_{2(\ell)} - j(h^2 B_\gamma^{ab} + B_\gamma^{bc} + h B_\gamma^{ca}) V \sqrt{3} = 0$$

.....(2.20.1)

แทนค่า $h = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ และ $h^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ลงในสมการที่ 2.20.1 จะได้

$$\begin{aligned} & \text{Re } I_{2(\ell)} + j \text{Im } I_{2(\ell)} - \\ & j \left[\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) B_\gamma^{ab} + B_\gamma^{bc} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) B_\gamma^{ca} \right] V \sqrt{3} = 0 \\ & \underbrace{\left[\text{Re } I_{2(\ell)} + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} B_\gamma^{ab} + \frac{\sqrt{3}}{2} B_\gamma^{ca} \right) V \sqrt{3} \right]}_{\text{Real Part}} + \\ & \underbrace{j \left[\text{Im } I_{2(\ell)} + \left(\frac{1}{2} B_\gamma^{ab} - B_\gamma^{bc} + \frac{1}{2} B_\gamma^{ca} \right) V \sqrt{3} \right]}_{\text{Imaginary Part}} = 0 \end{aligned}$$

.....(2.20.2)

- จำนวนเชิงซ้อนจะเป็น 0 ได้ ก็ต่อเมื่อ ส่วนจริง = 0 และส่วนจินตภาพ = 0

- พิจารณาส่วนจริง = 0

$$\text{Re } I_{2(\ell)} + \frac{3}{2} V \left(-B_\gamma^{ab} + B_\gamma^{ca} \right) = 0$$

$$B_\gamma^{ab} - B_\gamma^{ca} = \frac{2}{3V} \text{Re } I_{2(\ell)} \dots (2.21)$$

- พิจารณาส่วนจินตภาพ = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Im} I_2(\ell) + \left(\frac{1}{2} B_\gamma^{ab} - B_\gamma^{bc} + \frac{1}{2} B_\gamma^{ca} \right) V \sqrt{3} = 0$$

$$B_\gamma^{ab} - 2B_\gamma^{bc} + B_\gamma^{ca} = -\frac{2}{\sqrt{3}V} \text{Im} I_2(\ell) \dots\dots$$

(2.22)

- แทนค่า $I_{1(\gamma)}$ จากสมการที่ 2.17 ลงในสมการที่ 2.19 จะได้

$$\text{Im} I_{1(\ell)} + \left(B_\gamma^{ab} + B_\gamma^{bc} + B_\gamma^{ca} \right) V \sqrt{3} = 0$$

$$B_\gamma^{ab} + B_\gamma^{bc} + B_\gamma^{ca} = -\frac{\text{Im} I_{1(\ell)}}{\sqrt{3}V} \dots\dots(2.23)$$

จากสมการที่ 2.21 , 2.22 และ 2.23 จะสามารถแก้สมการหาค่า B_γ^{ab} , B_γ^{bc} และ B_γ^{ca} ได้ดังต่อไปนี้ (3 ตัวแปร 3 สมการ หาได้)

นำสมการ (2.23) - สมการ (2.22) จะได้

$$3B_\gamma^{bc} = -\frac{\text{Im} I_{1(\ell)}}{\sqrt{3}V} + \frac{2 \text{Im} I_2(\ell)}{\sqrt{3}V}$$

$$B_\gamma^{bc} = -\frac{1}{3\sqrt{3}V} \left[\text{Im} I_{1(\ell)} - 2 \text{Im} I_2(\ell) \right] \dots\dots(2.24) \#$$

นำสมการ (2.21) - สมการ (2.22) จะได้

$$\cancel{B}_\gamma^{bc} - \cancel{B}_\gamma^{ca} = \frac{\cancel{I}}{3V} \text{Re} I_2(\ell) + \frac{\cancel{I}}{\sqrt{3}V} \text{Im} I_2(\ell)$$

แทนค่า B_γ^{bc} จากสมการที่ 2.24 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 B_{\gamma}^{ca} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} \left[\text{Im} I_1(\ell) - 2 \text{Im} I_2(\ell) \right] \\
 &\quad - \frac{1}{3V} \text{Re} I_2(\ell) - \frac{1}{\sqrt{3}V} \text{Im} I_2(\ell) \\
 &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} \left[\text{Im} I_1(\ell) - 2 \text{Im} I_2(\ell) + \right. \\
 &\quad \left. \sqrt{3} \text{Re} I_2(\ell) + 3 \text{Im} I_2(\ell) \right]
 \end{aligned}$$

$$B_{\gamma}^{ca} = -\frac{1}{3\sqrt{3}V} \left[\text{Im} I_1(\ell) + \text{Im} I_2(\ell) + \sqrt{3} \text{Re} I_2(\ell) \right]$$

.....(2.25)

แทนค่า B_{γ}^{ca} ลงในสมการที่ 2.21 จะได้ค่า B_{γ}^{ab} เป็น

$$\begin{aligned}
 B_{\gamma}^{ab} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} \left[\text{Im} I_1(\ell) + \text{Im} I_2(\ell) + \sqrt{3} \text{Re} I_2(\ell) \right] + \frac{2}{3V} \text{Re} I_2(\ell) \\
 &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} \left[\text{Im} I_1(\ell) + \text{Im} I_2(\ell) + \sqrt{3} \text{Re} I_2(\ell) - 2\sqrt{3} \text{Re} I_2(\ell) \right]
 \end{aligned}$$

$$B_{\gamma}^{ab} = -\frac{1}{3\sqrt{3}V} \left[\text{Im} I_1(\ell) + \text{Im} I_2(\ell) - \sqrt{3} \text{Re} I_2(\ell) \right]$$

.....(2.26)

จากสมการที่ 2.24 , 2.25 และ 2.26 จะเป็นค่าคอมเพนเซตเชิงซัสเซพแดนซ์ B_{γ}^{ab} , B_{γ}^{bc} และ B_{γ}^{ca} ตามลำดับ

3.2.การแปลงอินเวอร์สฟูรีเยร์ (inverse forrier transform)

การแปลงอินเวอร์สฟูรีเยร์มีคำจำกัดความดังนี้

$$h(t) = \int H(f)e^{j2\pi ft} dt \quad \dots\dots(3.4)$$

3.3.การแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง(discrete fourier transform หรือ DFT)

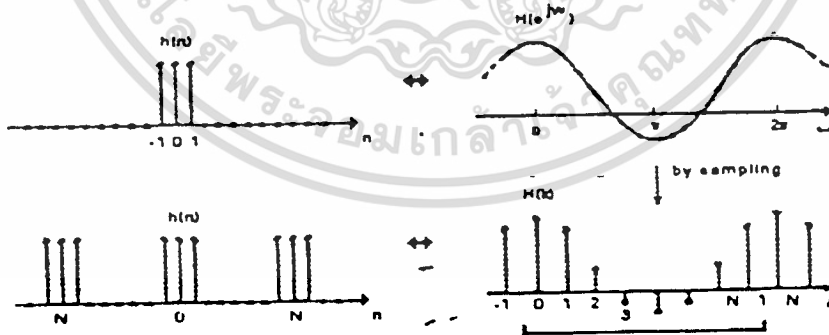
ดีเอ็ฟที เป็นลำดับของความถี่ไม่ต่อเนื่องที่ได้จากการสุ่มในหนึ่งคาบเวลาของการแปลงฟูรีเยร์ เมื่อกำหนดให้จำนวนการสุ่มเท่ากับ N สุ่มบนคาบเวลา $0 < w < 2\pi$ ดังนั้น

$$W_k = 2\pi k/N \quad \text{เมื่อ } 0 < k < N-1 \quad \dots\dots(3.5)$$

ถ้ากำหนดให้ $\{h(n)\}$ เป็นลำดับของ discrete time และลำดับของ Fourier Transform $H(e^{j\omega})$ ให้เท่ากับ $\{H(k)\}$ โดยที่

$$H(k) = H(e^{j\omega}) \quad \text{เมื่อ } \omega = W_k = 2\pi k/N \text{ และ } 0 < k < N-1 \dots\dots(3.6)$$

ลำดับของ ดีเอ็ฟที เริ่มต้นที่ $k = 0$ หรือ $\omega = 0$ แต่ไม่รวมจุด $k = N$ หรือ $\omega = 2\pi$ เราจะเห็นว่า $H(e^{j\omega})$ มีคาบเวลาเท่ากับ ω หรือ 2π ซึ่งได้จากการกระจายอนุกรมด้วยคาบเวลาการสุ่ม T_s สเปกตรัมของผลลัพธ์จากการแปลงฟูรีเยร์จะมีฟังก์ชันคาบเวลาของความถี่เท่ากับ $2\pi/T_s$ จากรูปที่ 1 เมื่อ $H(e^{j\omega})$ ถูกสุ่มด้วยคาบเวลาการสุ่ม $W_s = 2\pi/N$ เมื่อแปลงกลับเป็นลำดับของฟังก์ชันเวลาไม่ต่อเนื่อง $\{h(n)\}$ จะมีคาบเวลา $2\pi/W_s = N$



รูปที่ 3.2 แสดงผลลัพธ์ในลำดับเวลาจากแซมเปิลสเปกตรัม (sample

spectrum)

บทที่ 8

การแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform)

การแปลงฟูรีเยร์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ในงานวิทยาศาสตร์สาขาต่างๆ ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้งานที่นิยมใช้วิเคราะห์ระบบเชิงเส้นที่ไม่มีการแปรผันตามเวลา (linear time-invariant system) แต่การแปลงฟูรีเยร์ที่กล่าวต่อไปนี้เป็นหลักหรือคุณสมบัติสำคัญซึ่งสามารถวิเคราะห์งานได้ทั่วไป

8.1. ฟูรีเยร์อินทิกรัล

ฟูรีเยร์อินทิกรัลมีคำจำกัดความเป็นสมการว่า

$$H(f) = \int h(t)e^{j2\pi ft} dt \quad \dots\dots(3.1)$$

$h(t)$ เป็นเทอมของฟังก์ชันของตัวแปรเวลาและ $H(f)$ เป็นเทอมของฟังก์ชันของความถี่ การแปลงฟูรีเยร์ของฟังก์ชันเวลาจะแทนด้วยตัวอักษรใหญ่ ในรูปทั่วไปการแปลงฟูรีเยร์มีรูปเป็นจำนวนเชิงซ้อน (complex number)

$$H(f) = R(f) + jI(f) = |H(f)| e^{j\theta(f)} \quad \dots\dots(3.2)$$

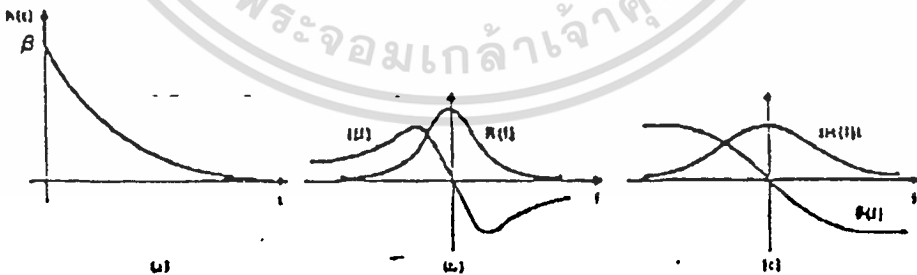
เมื่อ $R(f)$ เป็นส่วนจริงของการแปลงฟูรีเยร์

$I(f)$ เป็นส่วนจินตภาพของการแปลงฟูรีเยร์

$|H(f)|$ เป็นแอมพลิจูดหรือฟูรีเยร์สเปกตรัมของ $h(t)$ ซึ่งได้จาก

$$\sqrt{R(f)^2 + I(f)^2} \quad \dots\dots(3.3)$$

$\theta(f)$ เป็นมุมเฟสของการแปลงฟูรีเยร์ซึ่งได้ $\tan^{-1}[I(f)/R(f)]$



รูปที่ 3.1 (ก) ตัวอย่างของฟังก์ชันในโดเมนเวลา

(ข) ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของการแปลงฟูรีเยร์

(ค) แอมพลิจูดและเฟสของการแปลงฟูรีเยร์

ในกรณี $N=8$ และอยู่ในช่วง $0 < w < 2\pi$

ดังนั้นลำดับซิกกรีท(discrete time) ที่อยู่ในฟังก์ชันคาบสามารถหาในเทอมของ $\{x(n)\}$ ได้

$$h(n) = \sum h(n+mN) \dots\dots\dots(3.7)$$

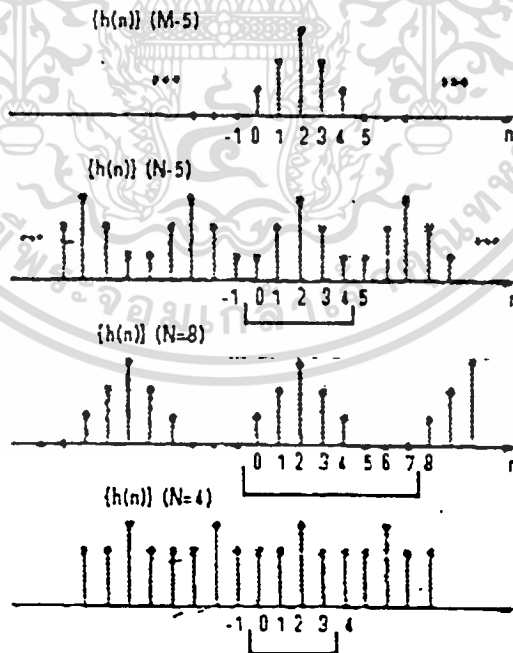
ลำดับ $\{h(n)\}$ เรียกว่าพีริโอดิกเอ็กเทินชันของ $\{h(n)\}$ จำนวนจุดสุ่มในหนึ่งคาบของสเปกตรัม (m) จะมีค่าเท่ากับคาบของ $\{h(n)\}$ เราสามารถเลือกค่าเอ็น(n)เท่าใดก็ได้ซึ่งเป็นจำนวนการสุ่มของเฮิร์ซ(h) ภายใต $0 < w < 2\pi$ เมื่อ N เป็นคาบของ $\{h(n)\}$ เราต้องเลือกค่าที่ไม่น้อยเกินไปในลักษณะที่ $\{h(n)\}$ เป็นฟังก์ชันคาบเวลาแบบไม่จำกัดทำให้เกิดลักษณะสัญญาณที่ถูกสุ่มทับกันสัญญาณที่ได้จะผิดพลาดไปสามารถแสดงจากตัวอย่างข้างล่าง

กำหนดให้

$$h(n) = h(n) \quad \text{เมื่อ } 0 \leq n \leq M-1$$

$$= 0 \quad \text{เมื่อ } M \leq n \leq N-1$$

จะได้จุดที่เกิดจากการสุ่มเมื่อ N มีค่าต่างๆ ดังรูป



รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ของช่วงเวลาของลำดับ เอ็ม และจำนวนจุดในการสุ่มสเปกตรัม เอ็ม

จากรูปจะเห็นว่าถ้าค่า $(M > N)$ รูปสัญญาณจะทับกัน (overlap) ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยเลือกค่า $(N \geq M)$

3.4. การแปลงฟูรีเยร์ (Fast fourier Transform หรือ FFT)

เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นกับการแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย (discrete fourier transform หรือ DFT) คือ ในการคำนวณนั้นมีการใช้จำนวนลำดับข้อมูลมากซึ่งทำให้การคำนวณของคอมพิวเตอร์ใช้เวลามากตามไปด้วยเช่น การคำนวณดีเอฟที สำหรับลำดับสัญญาณเข้ายาวเอ็น ลำดับหรือ จุดนั้นคอมพิวเตอร์ทั่วไปแล้วไม่มีคำสั่งภาษาเครื่องที่ใช้ในการคูณตัวเลข จึงต้องเขียนโปรแกรมย่อยหรือเพิ่มเติมวงจรคูณโดยเฉพาะเข้าไป ส่วนการบวกตัวเลขของคอมพิวเตอร์นั้นทำได้ง่ายและรวดเร็วจึงสามารถกล่าวได้ว่ากระบวนการคำนวณตัวเลขนั้นใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าการบวกตัวเลขมาก จากผลอันนี้ทำให้เห็นได้ว่า ความเร็วในการคำนวณ ดีเอฟที จึงขึ้นอยู่กับความเร็วและจำนวนครั้งในการคูณตัวเลขเป็นสำคัญ ดังนั้น J.W. Coolwy และ J.W. Turkey จึงได้พัฒนาลำดับการหรือขั้นตอนวิธีในการคำนวณ ดีเอฟที ให้รวดเร็วขึ้นซึ่งเรียกว่า การแปลงฟูรีเยร์ ซึ่งการคำนวณโดยใช้ดีเอฟที จะใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียง $N \log_2 N$ ครั้งเท่านั้นหรือจำนวนครั้งในการคูณลดลงไปถึง $N / (\log_2 N)$ เท่าและผลคืออีกประการหนึ่งคือทำให้การสร้างวงจรเฉพาะเพื่อการคำนวณ ดีเอฟที ทำได้ง่ายและคำนวณได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่า ดีเอฟที จะมีชื่อเรียกว่า การแปลงฟูรีเยร์ แต่ดีเอฟที เองนั้นไม่ใช่การแปลงฟูรีเยร์แท้จริงแต่เป็นวิธีการหรือลำดับการในการคำนวณที่ช่วยในการคำนวณ ดีเอฟที ซึ่งเป็นกานแปลงฟูรีเยร์ได้รวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันมีการคิดแปลงและคิดค้นเสนอผลงานเกี่ยวกับ ดีเอฟที มากมายหลายแบบซึ่งแต่ละแบบมีทั้งข้อดีและข้อเสียต่างกันออกไปแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ คือ ชนิดลดทอนทางเวลา (decimation in time หรือ DIT) และ ชนิดลดทอนทางด้านความถี่ (decimation in frequency หรือ DIF) ทั้งสองชนิดนี้โดยหลักการแล้วมีความคล้ายคลึงกันดังนั้นจึงจะขออธิบายแค่วิธีเดียวคือ DIT

3.4.1. การแปลงฟูรีเยร์แบบฐานสอง (Radix 2 FFT)

มีหลักการนิยามมาจากการแปลงฟูรีเยร์แบบเต็มหน่วย(DFT) โดยมีการนิยามดังนี้

$$X(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \cdot W_N^{mk} \quad \text{.....(3.9)}$$

โดยครรชนี $k, m=0, 1, \dots, N-1$ และจำนวนเชิงซ้อน $W_N = \exp(-j2\pi/N)$ โดยที่ลำดับ $x(m)$ มักจะเป็นสัญญาณเกี่ยวกับในโดเมนเวลา ส่วน $X(k)$ มักเกี่ยวข้องกับสัญญาณในโดเมนความถี่ หรือเรียกว่าสเปกตรัมของสัญญาณ โดยในที่นี้ในสมการได้ยกเว้นการเติม $1/N$ ไว้เพื่อที่จะให้สะดวกและง่ายต่อการอธิบายสำหรับหลักสำคัญประการหนึ่งของ เอ็ฟเอ็ฟที ที่ลดจำนวนครั้งในการคูณเลขจำนวนเชิงซ้อนโดยอาศัยคุณสมบัติ ความเป็นคาบ ของจำนวนเชิงซ้อน W_N คือ $W_N^{mk} = W_N^{[mk \bmod N]}$

3.4.1.2. ขั้นตอนการลดทอนทางเวลา (Decimation-In-Time หรือ DIT)

เป็นวิธีการแบ่งกลุ่มลำดับของสัญญาณในโดเมนเวลา $x(m)$ ที่มีขนาด N จุดออกเป็นสองลำดับสัญญาณที่มีความยาว $N/2$ จุดเท่ากันทั้งสองลำดับนี้ให้ชื่อว่า ลำดับสัญญาณคู่มาเรียงกัน โดยส่วนที่เหลือเป็นลำดับสัญญาณคี่ ถ้าเรานิยามให้ $x_E(m)$ เป็นลำดับคู่และลำดับคี่เป็น $x_O(m)$ ตามลำดับเพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} x_E &= x(2m) & ; & \quad m=0, 1, \dots, (N/2)-1 \\ x_O &= x(2m+1) & ; & \quad m=0, 1, \dots, (N/2)-1 \end{aligned} \quad \text{.....(3.10)}$$

ถ้าให้ W_N แทน W ของลำดับยาว N จุดจะทำให้การคำนวณการแปลง ดีเอ็ฟที ของลำดับ $x(m)$ ที่ยาว N จุดเขียนใหม่ได้เป็น

$$X(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x_E(m) (W_N)^{km} + \sum_{m=0}^{N-1} x_O(m) (W_N)^{km}$$

$$X(k) = \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x_E(m) (W_N)^{km} + \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x_O(m) (W_N)^{km} \quad \text{.....(3.11)}$$

ให้พจน์ $(W_N)^2$ จะได้ว่า

$$(W_N)^2 = (\exp(2j\pi/N))^2 = \exp(j2\pi/N/2) = W_{N/2}$$

จะเมื่อจัดพจน์ใหม่จาก $W_{N/2}$ หรือ W ของลำดับยาว $N/2$ จุด จะได้

$$X(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x_E(m) (W_N)^{km} + \sum_{m=0}^{N-1} x_O(m) (W_N)^{km}$$

$$X(k) = X_1(k) + (W_N)^k X_2(k) \quad \dots\dots(3.12)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $X_1(k)$ และ $X_2(k)$ แทนการแปลง ดีเอ็ฟที ขนาด $N/2$ จุดของลำดับ ตามลำดับสมการ (3.12) แสดงให้เห็นว่าการคำนวณ ดีเอ็ฟที ขนาด N จุด นั้นสามารถแบ่งออกเป็นการคำนวณ DFT ขนาด $N/2$ จุดสองอันดับได้และข้อสำคัญก็คือการคูณจำนวนเชิงซ้อนจะลดลงเหลือ $2(N/2)^2 = N^2/2$ ครั้ง ซึ่งจะเห็นว่าการลดเวลาการคำนวณลงไปได้ถึง 50% โดยอาศัยหลักการเดียวกันถ้าเราแบ่งทอนลำดับ $x_e(m)$ และ $x_o(m)$ ออกเป็นลำดับคู่ลำดับคี่ลงไปอีกตามลำดับจนในที่สุดเหลือเป็นลำดับขนาด 2 จุดหรือกล่าวได้ว่า การคำนวณการแปลง ดีเอ็ฟที ขนาด N จุดทำได้โดยการแปลง ดีเอ็ฟที ขนาดสองจุดจำนวน $N/2$ คอน ด้วยกันซึ่งในการแบ่งหรือซอยลำดับ $x(n)$ ออกทีละครึ่งจนเหลือดีเอ็ฟที ขนาดเอ็นจุดซึ่งการนำมาประกอบกันจะต้องมีหลักเกณฑ์ที่แน่นอนไม่เช่นนั้นจะทำให้ผลการคำนวณ ดีเอ็ฟที ที่ได้มีค่าผิดพลาด เพื่อให้การประกอบกันของลำดับสัญญาณ N ลำดับ เป็นไปอย่างถูกต้องจึงต้องทำการนิยามค่าของสมการ (3.12) สำหรับค่า $k > N/2$ ดังนี้ ในการคำนวณดีเอ็ฟที นั้นลำดับสัญญาณเข้า $x(n)$ จะมีการสลับตำแหน่งหรือสลับลำดับอย่างมีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า การผันกลับบิต นั่นคือการแทนครรชน n ของลำดับ $x(n)$ ด้วยเลขฐานสองโดยจำนวนของเลขฐานสองต้องเพียงพอที่จะแทนค่าเอ็น ได้เช่นในกรณี $N=8$ ต้องแทนด้วยเลขฐานสอง 3 บิต จากนั้นการจัดลำดับ $x(n)$ ใหม่จะได้จากการผันบิตของเลขฐานสอง) เป็นต้นดังรูปที่ 3.6 โดยวิธีที่อธิบายอาจกล่าวโดยย่อได้ว่าเป็นการคำนวณ ที่แทนด้วยครรชน n ดังในรูปที่ 3.3 คือ $x(001)$ จะถูกแทนด้วย $x(100)$ และ $x(110)$ จะแทนด้วย $x(011)$ ดีเอ็ฟที ขนาดเอ็น จุดเดิม โดยถูกแบ่งออกเป็นดีเอ็ฟที ขนาด $N/2$ จุดจำนวน 2 คอนแล้วนำมารวมกันโดยใช้ตัวประกอบหมุนและลำดับนี้จะทำจนกระทั่งผลสุดท้ายเป็นการแปลง ดีเอ็ฟที ขนาด 2 จุดตามรูปที่ 3.7.5 การประยุกต์ เอ็ฟเอ็ฟที

3.5.1 ความละเอียด (resolution) ของ เอ็ฟเอ็ฟที (FFT)

ผลลัพธ์ของ เอ็ฟเอ็ฟที ในรูปที่ 3.8(b) และ แต่ละความถี่มีระยะห่าง $f=1/NT$ ดังนั้น จุดศูนย์กลางของความถี่จึงมีค่าตั้งแต่ $0/NT, 1/NT, 2/NT, \dots, (N/2)/NT$ สำหรับด้านความถี่บวกระยะห่างของความถี่ $f=1/NT$ เป็นเทอมที่แสดงถึงความละเอียดของเอ็ฟเอ็ฟที แต่สมาชิกของความถี่ที่ได้เรียกว่า สมาชิกความละเอียด (resolution element) หรือเซลล์ความละเอียด (resolution cell) เราอาจจะคิดว่า ความละเอียดเป็นเทอมที่ทำให้เราสามารถแยกความแตกต่างของแต่ละความถี่โดยประมาณค่าความถี่ที่ได้จากการแปลงเป็นความถี่ตั้งแต่ $0/NT, 1/NT, 2/NT, \dots, (N/2)/NT$ ซึ่งเราอาจจะลดระยะห่างระหว่างแต่ละความถี่ได้โดยการเพิ่มจำนวนข้อมูลเอ็น ซึ่งก็คือการเพิ่มระยะการตัดทอน (truncation) ของฟังก์ชันที่ต้องการแปลงถ้าค่าของเอ็น เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าระยะห่างของ

ความถี่ที่ลดลงสองเท่าเช่นกันจากรูปที่ 3.9 ระยะห่างของความถี่(ความละเอียด) ของการแปลงดิสครีตฟูเรียร์ (discrete fourier transform) ถูกกำหนดจากความกว้างของสี่เหลี่ยมที่ไปคูณหรือตัดทอนฟังก์ชันก่อนทำการแปลง การตัดทอนในโดเมนเวลาก็คือการทำคอนโวลูชันของฟังก์ชัน $[\sin(f)/f]$ กับผลการแปลงฟูเรียร์ของฟังก์ชัน $[\sin(f)/f]$ ทำให้ผลการแปลงคลุมเครือและเลื่อนลงถ้าฟังก์ชันที่ตัดทอนในโดเมนเวลามีความกว้างมากขึ้นจะทำให้ผลของฟังก์ชัน $[\sin(f)/f]$ แคบลงและความคลุมเครือของความถี่ลดน้อยลงด้วยความคลุมเครือของความถี่ยิ่งน้อยเท่าใดก็ยิ่งทำให้ประสิทธิภาพของการใช้ เอ็ฟเอ็ฟที ในการแก้ปัญหาในแต่ละงานเป็นไปได้มากยิ่งขึ้นความเข้าใจผิดต่างๆไปของผู้ใช้ เอ็ฟเอ็ฟที คือการเพิ่มจำนวนข้อมูล N โดยการต่อเติมศูนย์และตัดทอนฟังก์ชันและตีความหมายของฟังก์ชันความถี่ที่ได้เป็นฟังก์ชันความถี่ที่มีความละเอียดสูงตอนนี้เรามาดูเปรียบเทียบรูปที่ 3.10 (g) เราต้องการตรวจสอบผลของการเพิ่มศูนย์ให้กับฟังก์ชันเวลาของรูปที่ 3.11(a) สมมติว่าจำนวนของศูนย์ที่เพิ่มเข้าไบนั้นเท่ากับ N ซึ่งทำได้โดยการคูณด้วยฟังก์ชันเวลาในโดเมนเวลา ในรูปที่ 3.11 (b) ผลของความถี่ที่ได้แสดงในรูปถัดมาซึ่งในการคูณทำให้ฟังก์ชันมีคาบเวลาเท่ากับ $2N$ โดยจุดที่ไม่ใช่ศูนย์เท่ากับจุดสุ่ม N จำนวนในรูปที่ 3.11(a) ผลของฟังก์ชันความถี่ที่ได้ก็คือการทำคอนโวลูชันของฟังก์ชันความถี่ของรูปที่ 3.11(a) และรูปที่ 3.11(b) แต่ความละเอียดของความถี่ที่ได้ถูกกำหนดไว้ในรูปที่ 3.11(a) เรียบร้อยแล้ว การทำคอนโวลูชันเป็นการเพิ่มจำนวนจุดสุ่มในโดเมนความถี่โดยการเฉลี่ยค่า (Interplation) ด้วยฟังก์ชันที่จะทำการต่อเติมศูนย์มีค่าศูนย์ครอบคลุมช่วงนั้นอยู่แล้วจากหัวข้อนี้จึงสรุปได้ว่า ความละเอียดนั้นต้องพิจารณาจากช่วงเวลาในโดเมนเวลาในสัญญาณและในการประยุกต์ใช้ เอ็ฟเอ็ฟที ช่วงเวลาของสัญญาณถูกตั้งใหม่เป็นช่วงระยะห่างของการตัดทอนข้อมูล

3.5.2 ผลของความผิดเพี้ยนจาก เอ็ฟเอ็ฟที (FFT aliasing)

ปัญหาหนึ่งที่เราพบในการคำนวณการแปลงฟูเรียร์จาก เอ็ฟเอ็ฟที คือความผิดเพี้ยน (aliasing) จากที่เขากล่าวมาแล้วในการสุ่มข้อมูลความผิดเพี้ยนจะเกิดขึ้นเมื่อจุดสุ่มของฟังก์ชันเวลามีระยะห่างของการเก็บมากเกินไปผลของฟังก์ชันความผิดเพี้ยนนี้เราเรียกว่า การพับ (fold) หรือ การซ้อน(overlap) ในตัวมันเองซึ่งแสดงตัวอย่างไว้ในรูปที่ 3.12เรามีจุดสุ่มของฟังก์ชัน $h(t)=e^{-t}$, $t > 0$ โดยช่วงของเวลาการสุ่ม $T=1.0, 0.5$ และ 0.25 ตามลำดับ จำนวนข้อมูลตั้งให้เท่ากับ 32 สำหรับแต่ละกรณีขนาดของการแปลงฟูเรียร์ที่ได้คำนวณโดยใช้ เอ็ฟเอ็ฟที ซึ่งได้แสดงรวมไว้ในรูปที่ 3.12 (a) ถึง 3.12ค แล้วจากผลที่ได้จาก เอ็ฟเอ็ฟที จะเห็นว่าเมื่อ $T=1.0$ ผลที่ได้ความผิดเพี้ยนมากที่สุด (ขนาดของการแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่องได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12(d)) จะเห็นว่าความผิดเพี้ยนมีค่า

ลดลงเมื่อมีคาบเวลาเท่ากับ 0.5 และเมื่อคาบเวลาเท่ากับ 0.25 ผลที่ได้จะมีค่าคล้ายคลึงกับผลที่ได้จากการคำนวณแบบต่อเนื่องมากที่สุด

ในรูปที่ 3.12 ได้แสดงหลักการลดความผิดเพี้ยนโดยการลดช่วงของการสุ่มในกรณีนี้จะเห็นว่าไม่มีผลต่อการตัดทอนเนื่องจาก T มีค่าต่ำจึงทำให้ NT มีค่ามากกว่าความกว้างของช่วงไม่เป็นศูนย์ (nonzero interval) ของฟังก์ชันมา

3.5.3 การตัดทอนของ FFT ในโดเมนเวลา (FFT Time-Domain Truncation)

ปัญหาความผิดพลาดอื่นที่มักพบจากการประยุกต์ใช้ เอ็ฟเอ็ฟที ในการแปลงฟูเรียร์คือ ความผิดพลาดเนื่องจากการตัดทอนข้อมูลในโดเมนเวลา (time-domain truncation) ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการเลือกกลุ่มข้อมูลจุดสุ่มเพื่อหาลักษณะของฟังก์ชันเวลาไปตัดทอนลักษณะบางส่วน ของรูปคลื่นเริ่มต้น รูปที่ 3.13(a) และรูปที่ 3.13(b) แสดงตัวอย่างของจุดนี้เมื่อเราตัดทอนฟังก์ชัน $h(t)$ ที่ $NT = 1, 2, 5$ วินาที ตามลำดับขนาดของการแปลงฟูเรียร์ที่ผ่าน เอ็ฟเอ็ฟที ได้แสดงในรูป การตัดทอนที่ 1 วินาทีทำให้ผลที่ได้จาก เอ็ฟเอ็ฟที มีการกระเพื่อม (rippling) เมื่อใช้ช่วงเวลาของการตัดทอนนานขึ้นเท่ากับ 2 วินาทีผลของ เอ็ฟเอ็ฟที ที่ได้มีการกระเพื่อมน้อยลงและเมื่อเพิ่มช่วงเวลาการตัดทอนให้เป็น 5 วินาทีผลของ เอ็ฟเอ็ฟที ที่ได้ไม่ปรากฏผลของการเกิดการกระเพื่อม เหมือนกับรูปที่ถูกตัดในรูปที่ 3.13c ส่วนในรูปที่ 3.13 แสดงผลของการทดลองโดยการพิจารณา ช่วงเวลาการตัดทอนที่ดีที่สุดโดยการเพิ่มช่วงเวลาการตัดทอนซึ่งเราก็ได้เห็นผลของการลดลงของการกระเพื่อม

3.5.4 เอ็ฟเอ็ฟที (FFT) ของฟังก์ชันคาบเวลา

การคำนวณ เอ็ฟเอ็ฟที ของฟังก์ชันคาบเวลาเราจะต้องเลือกช่วงของการสุ่มและช่วงของการตัดทอน จากที่กล่าวมาแล้ว การเลือกที่ (T) ต้องเลือกให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดความผิดเพี้ยน การตัดทอนของฟังก์ชันเวลา คาบเวลาเป็นปัญหาใหม่ที่ไม่ได้อธิบายไว้ในหัวข้ออื่นมาก่อน ถ้าเราเลือกจำนวนจุดสุ่มเอ็น ของการแปลงฟูเรียร์เท่ากับ 1 คาบเวลาพอดีหรือเท่ากับจำนวนเท่าของคาบเวลา ผลของความถี่ที่ได้จะตรงกับสัญญาณเริ่มต้น

เพื่ออธิบายตรงจุดนี้เราทำการคำนวณ เอ็ฟเอ็ฟที ของฟังก์ชันโคไซน์ในรูปที่ 3.14(a) โดยมีช่วงการสุ่ม $T=1.0$ s และจำนวนจุดสุ่มเท่ากับ 32 และแสดงผลลัพธ์ที่ได้ในรูปที่ 3.14(b) โดยแสดงเป็นขนาดที่ได้จาก เอ็ฟเอ็ฟที ของจุดเหล่านี้จากรูปจะเห็นว่า จุดอื่นเป็นศูนย์หมดคนอกจากจุดที่เป็นควาแท้จริง

3.5.5 ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักข้อมูล (data weighting function)

จากหัวข้อที่แล้ว การตัดทอน (truncation) อาจจะทำให้ผลการแปลงฟูเรียร์คลาดเคลื่อน การประมวลผลข้อมูลจำนวนจำกัด N ของฟังก์ชันคาบเวลาที่ไม่รู้คาบแน่นอนจำเป็นต้องใช้วินโดว์ของข้อมูลหรือที่เรียกว่าฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักข้อมูลในหัวข้อนี้เราจะอธิบายเทคนิคการใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักเพื่อลดผลเสียจากการตัดทอนให้เหลือน้อยที่สุด

3.5.5.1. ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักสี่เหลี่ยม (rectangular weighting function)

จากรูปที่ 3.15 เราสรุปสัญญาณขาขึ้นโดยการคูณด้วยอิมพัลส์ฟังก์ชัน (impulse function) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.15(b) นำผลที่ได้ (รูปที่ 3.15(c)) ไปคูณด้วยฟังก์ชันตัดทอนสี่เหลี่ยมซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.15(d) เพื่อจำกัดจำนวนของจุดสุ่มให้เหลือเท่ากับ N ในที่นี้คือการตัดทอนของโดเมนเวลา (time domain) ก็คือการถ่วงน้ำหนักข้อมูลโดยคูณด้วยสี่เหลี่ยมผลของการตัดทอนโดเมนเวลาได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.15(e) เรารู้ว่าฟังก์ชันโดเมนความถี่ (frequency domain) ของฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคือฟังก์ชัน $[\sin(f)/f]$ ดังนั้นการแปลงเป็นโดเมนความถี่ของฟังก์ชันเวลาที่ตัดทอนแล้วจึงเป็นการทำคอนโวลูชัน (convolution) ของฟังก์ชันเวลากับฟังก์ชันสี่เหลี่ยมทำให้ผลที่ได้มีองค์ประกอบของความถี่เพิ่มขึ้นมาซึ่งคือลอนข้าง (side lobe) ของฟังก์ชันสี่เหลี่ยมองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นมานี้เรียกว่า ส่วนรั่วไหล (leakage) ทำให้อิมพัลส์ของความถี่ของฟังก์ชันรั่วออกไปที่ลอนข้างของฟังก์ชัน $[\sin(f)/f]$

ถึงแม้ว่าฟังก์ชันในโดเมนเวลาเริ่มต้นเป็นสัญญาณสุ่มขาขึ้นแต่เมื่อผ่านการสุ่มแล้วรูปคลื่นของสัญญาณที่ถูกสุ่มในโดเมนเวลาจะไม่ใช่สัญญาณสุ่มอีกเพราะว่าช่วงของการตัดทอน (truncation interval) ไม่เท่ากับคาบเวลาหรือจำนวนเท่าของกาลเวลา (เป็นจำนวนเต็ม) ทำให้คอนโวลูชันในโดเมนเวลารูปที่ 3.15(e) และ 3.15(f) ไม่ตรงกับฟังก์ชันคาบเวลาเริ่มต้นเนื่องจากการทำคอนโวลูชันของฟังก์ชันเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous) จึงได้แสดงผลของการเกิดการกระเพื่อมที่เพิ่มขึ้น (rippling effect) ไว้ในแบบไม่ต่อเนื่องในรูปที่ 5.2(g) ด้วยต่อไปเราสาธิตตัวอย่างของผลที่เกิดจากการใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักสี่เหลี่ยมดังนี้

สมมติว่าเราต้องคำนวณ เอ็ฟเอ็ฟที ของฟังก์ชันโคไซน์ (cosine function) ซึ่งแสดง 5.8 (a) โดยมีคาบเวลา $T=1.0$ และ $N=32$ ในรูปที่ 3.16(b) เราได้แสดงขนาดของการแปลง ดิสครีตฟูเรียร์ (discrete fourier transform) ของจุดสุ่มในรูปที่ 3.16(a) เอ็ฟเอ็ฟที จะทำให้ผลเป็นความถี่ที่ไม่ต่อเนื่องทางด้านบวกทั้งหมดจากที่ได้อธิบายในหัวข้อที่แล้วองค์ประกอบของความถี่เพิ่มขึ้นมาที่แยกว่าส่วนรั่วไหลเป็นผลมาจากลักษณะการมีลอนข้างของฟังก์ชัน $[\sin(f)/f]$ เพื่อลดผลจากการรั่วไหลของผลลัพธ์จากเอ็ฟเอ็ฟที ลดน้อยลงเพื่อให้เข้าใจจุดนี้ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นขอให้พิจารณารูปที่

3.15 อีกครั้งหนึ่งถ้าเปลี่ยนฟังก์ชันตัดคอนในรูปที่ 3.15(d) เป็นฟังก์ชันที่ในลอนข้างต่ำจะทำให้การประกาศค่าของการแปลงฟูเรียร์ดีขึ้น การใช้ฟังก์ชันด่วงน้ำหนักข้อมูลต้องทำกับจุดสุ่ม N ก่อนคำนวณเอ็ฟเอ็ฟที

3.5.5.2. ลักษณะของฟังก์ชันด่วงน้ำหนักชนิดต่างๆ

ในรูปที่ 3.17(a) ได้แสดงค่าฟังก์ชันตัดคอนหรือด่วงน้ำหนักที่นิยมใช้กับเอ็ฟเอ็ฟที ผลของการตอบสนองความถี่ของฟังก์ชันได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 3.17 (b) และในตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะของฟังก์ชันด่วงน้ำหนักแต่ละตัวทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดศูนย์เพื่อให้ว่างต่อการสังเกต

จากรูปที่ 3.17(b) จะเห็นว่าฟังก์ชันด่วงน้ำหนักสี่เหลี่ยมทั้งหมดมีลอนข้างในโดเมนความถี่ที่มีขนาดเล็กกว่าฟังก์ชันด่วงน้ำหนักสี่เหลี่ยมทั้งนั้นซึ่งจะช่วยให้ผลของการรั่วไหลลดน้อยลงลงแต่อย่างไรก็ตามฟังก์ชันด่วงน้ำหนักทั้งหมดนี้มีลักษณะของลอนหลัก (main lobe) ที่กว้างกว่าลวดรูปที่ 3.15(d) และรูปที่ 3.15(e) อีกครั้งลองคิดเปรียบเทียบผลที่ได้เมื่อใช้ฟังก์ชันด่วงน้ำหนักตามรูปที่ 3.17(b) จะเห็นว่ายิ่งลอนหลักมีความกว้างมากขึ้นเท่าใดผลที่ได้จาก เอ็ฟเอ็ฟที ยิ่งมีความคลุมเครือมากยิ่งขึ้นนั่นก็หมายความว่าถ้าลอนหลักมีขนาดกว้างจะทำให้แยกความแตกต่างของแต่ละความถี่ได้ยาก

ข้อได้เปรียบเสียเปรียบระหว่างส่วนรั่วไหล (ระดับของการรั่วไหล) และความละเอียด (แบนด์วิดธ์ของลอนหลัก) เป็นที่รู้จักกันดีในงานวิทยาศาสตร์สาขาต่างๆ ในตารางที่ 5.2 แสดงระดับสูงสุดของลอนข้างและแบนด์วิดธ์ (bandwidth) 3-dB สำหรับแต่ละฟังก์ชันด่วงน้ำหนักสำหรับงานการทดลองทั้งไปนิยมใช้ฟังก์ชันแฮนนิ่ง (Hanning function) เพราะว่าโครงสร้างของมันง่ายกว่าแบบอื่นการเลือกใช้ฟังก์ชันด่วงน้ำหนักที่ให้ผลดีที่สุดต้องขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่เราจะไปใช้งานด้วยเป็นสำคัญ

ผลที่ได้จาก เอ็ฟเอ็ฟที จะมีช่วงความถี่ $f_0 = 1/NT$ ซึ่งอาจทำให้เกิดความสับสนกับค่า $1/NT$ ของฟังก์ชันด่วงน้ำหนักที่เลือกใช้ผลของความละเอียดของความถี่ของผลลัพธ์จากเอ็ฟเอ็ฟที เป็นเพียงฟังก์ชันด่วงน้ำหนักแต่ละตัวเท่านั้น (ดูรูปที่ 3.17 (b)) ดังนั้นการใช้ค่านิยามของความละเอียด $1/NT$ ต้องทำอย่างระมัดระวังและรำลึกอยู่เสมอว่ามันเป็นเพียงช่องว่างระหว่างความถี่ที่เกิดจากผลที่ได้จากเอ็ฟเอ็ฟที เท่านั้นและไม่เกี่ยวกับ $1/NT$ ของวินโดว์ที่ใช้

ต่อไปเราจะแสดงผลจากการใช้ฟังก์ชันด่วงน้ำหนักที่มีลอนข้างต่ำให้เห็นลักษณะการนำไปใช้ลดการรั่วไหลของผลการตัดคอนในโดเมนเวลาในรูปที่ 3.18(a) เราได้แสดงรูปคลื่นโค

ชายน์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.16(a) ที่ คูณด้วยฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแชนนิ่งที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.17(a) แล้วรูปที่ 3.18(b) แสดงจุดศูนย์กลางจากเอ็ฟเอ็ฟที ของรูปที่ 3.18(a) จากรูปจะเห็นว่าส่วนร้วไหลลดลงไปอย่างมาก แต่องค์ประกอบหลักของความถี่มีระยะกว้างขึ้นหรือคลุมเครือเมื่อเปรียบเทียบกับจุดของอิมพัลส์ฟังก์ชันเพราะผลจากการคอนโวลูชันความถี่ของอิมพัลส์ฟังก์ชันกับผลการแปลงฟูเรียร์ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก

3.6. การประยุกต์ใช้การแปลงฟูเรียร์กับการหาตัวประกอบกำลัง(power factor)

จากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์ข้างต้น กระแสในแต่ละเฟสจะแสดงได้ในเทอมของความถี่มูลฐาน (fundamental) ของกระแส i_1 ดังแสดงในรูปที่ 3.19 และบวกกับกระแสที่ ฮาร์โมนิกส์อื่นๆ ถ้าสมมติว่า V_1 เป็นรูปชายน์จริงๆจะพบว่ากระแสมูลฐานเท่านั้นจะมีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าหรือออกจากระบบเพราะว่าความถี่ของแรงดันและกระแสจะต้องมีค่าเท่ากันสำหรับการเกิดกำลังไฟฟ้าในเทอมของแรงดันอาร์เอ็มเอส V_1 กับกระแสอาร์เอ็มเอส ของ i_1 เป็นความถี่มูลฐานของกระแส

i_1 กำลังที่ได้เป็น

$$P = V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad \text{.....(3.13)}$$

เมื่อ ϕ_1 เป็นมุมซึ่งกระแส i_1 ล้าหลัง V_1 ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ค่าขนาดของกำลังปรากฏ (apparent power) ซึ่งเป็นผลคูณของแรงดันอาร์เอ็มเอส V_1 กับกระแสอาร์เอ็มเอส I_1 ของกระแสในแต่ละเฟสได้เป็น

$$S = V_1 I_1 \quad \text{.....(3.14)}$$

ค่าตัวประกอบกำลังจะนิยามได้เป็น

$$\text{powerfactor (PF)} = P/S \quad \text{.....(3.15)}$$

จากสมการ 3.13-3.15

$$PF = \frac{V_s I_{s1} \cos \Phi_1}{V_s I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \Phi_1 \quad \dots\dots(3.16)$$

ค่าคอสเฟสสมมติพาวเวอร์แฟคเตอร์ (displacement powerfactor) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าตัวประกอบกำลังในวงจรที่กระแสและแรงดันเป็นซายน์จะถูกนิยามให้เป็นค่า โคซายน์ ของมุม ϕ_1

$$\text{displacement powerfactor (DPF)} = \cos \phi_1 \quad \dots\dots(3.17)$$

จะได้ว่า

$$PF = (I_{s1}/I_s) * DPF \quad \dots\dots(3.18)$$

จากสมการ 3.17 จะได้ว่าค่าความผิดเพี้ยนมากๆ ในกระแสในแต่ละเฟสจะเป็นผลทำให้ค่า I_{s1}/I_s มีค่าเล็กมากและจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังเป็นมีค่าน้อยด้วย ว่าค่า ดีพีเอฟ จะมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

ค่าอาร์เอ็มเอส ของกระแส I_s ของกระแสในแต่ละเฟสจะสามารถคำนวณได้จากค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของ i_s ตามสมการ 3.15 (โดยที่ $T = 2\pi/\omega$) หรือในรูปเทอมของ

$$I_s = \left[\frac{1}{T} \int_0^T i_s^2(t) dt \right]^{1/2} \quad \dots\dots(3.19)$$

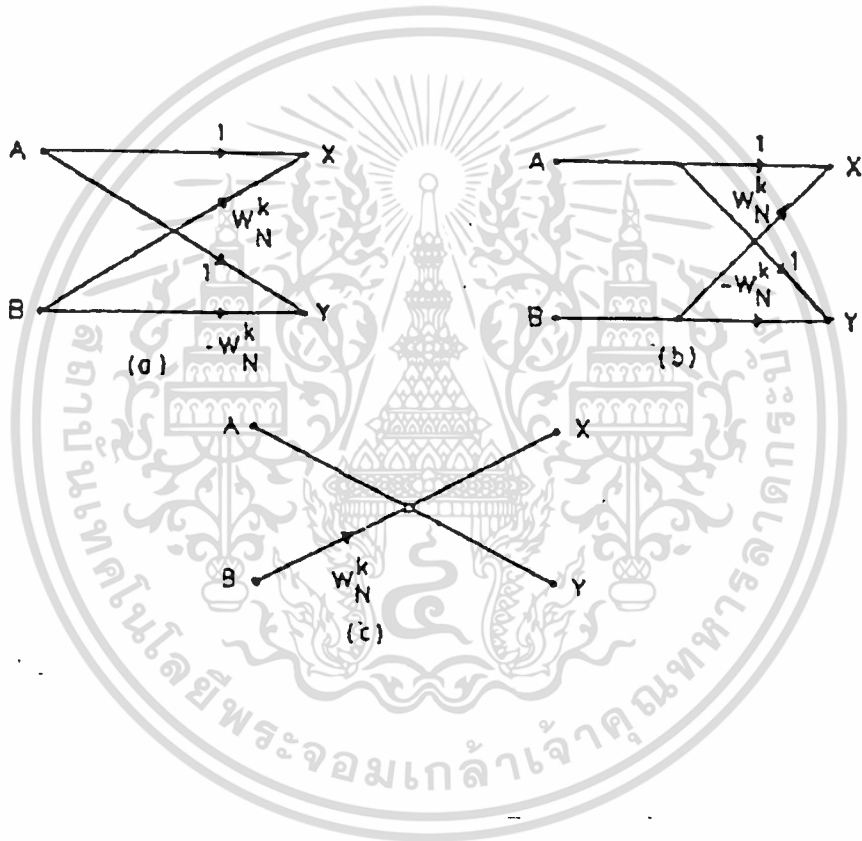
$$I_s = \left[I_{s1}^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_{sh}^2 \right]^{1/2} \quad \dots\dots(3.20)$$

จากสมการ 3.20 ค่าอาร์เอ็มเอสของส่วนผิดเพี้ยนในกระแสในแต่ละเฟสจะสามารถนิยามได้ว่า

$$I_{dis} = \left[I_s^2 - I_{s1}^2 \right]^{1/2} = \left[\sum_{h=2}^{\infty} I_{sh}^2 \right]^{1/2} \quad \dots\dots(3.21)$$

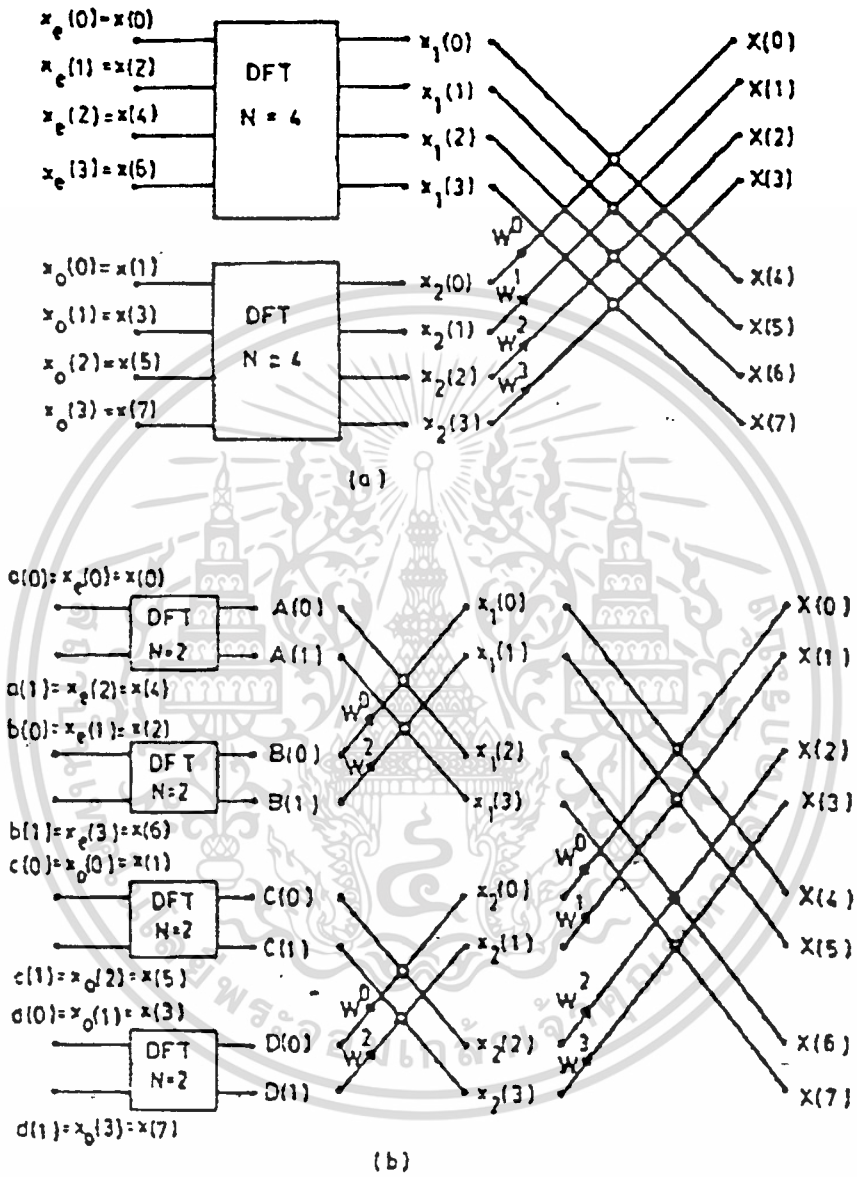
การหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสจะใช้ค่าที่เรียกว่าผลรวมของการผิดเพี้ยนของกระแส (total harmonics distortion THD) ซึ่งจะนิยามเป็น

$$\%THD = 100 * I_{dis}/I_{s1}$$



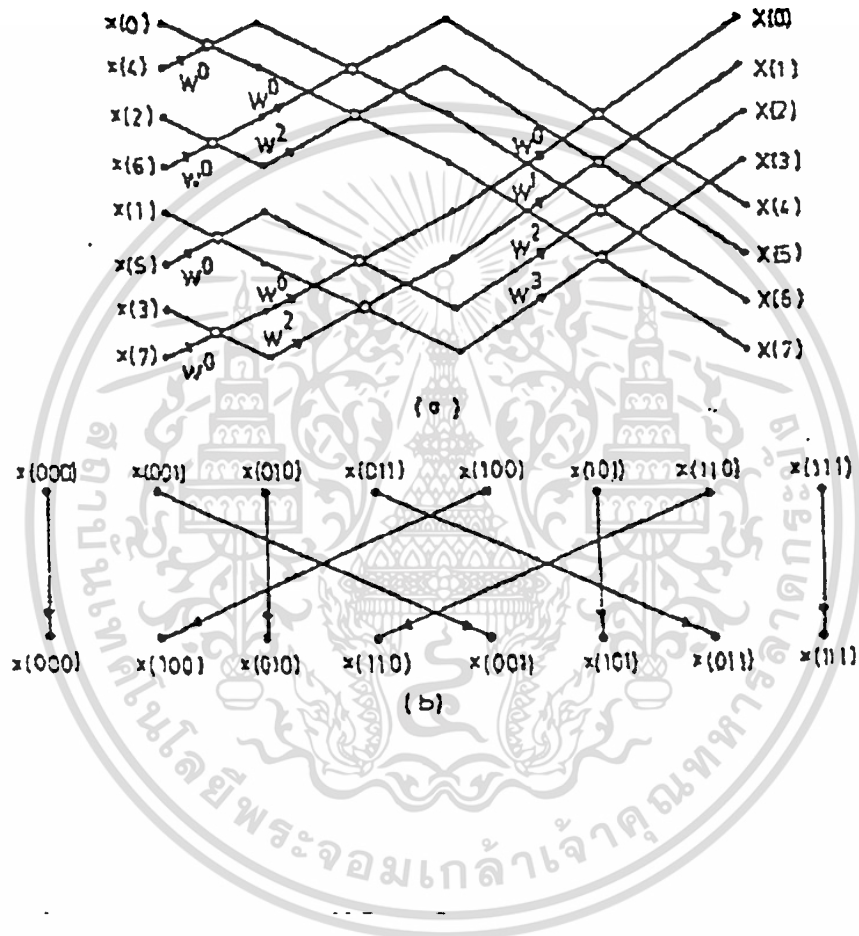
รูปที่ 3.4 หน่วยเซลล์ของการคำนวณแบบ ดีไอที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



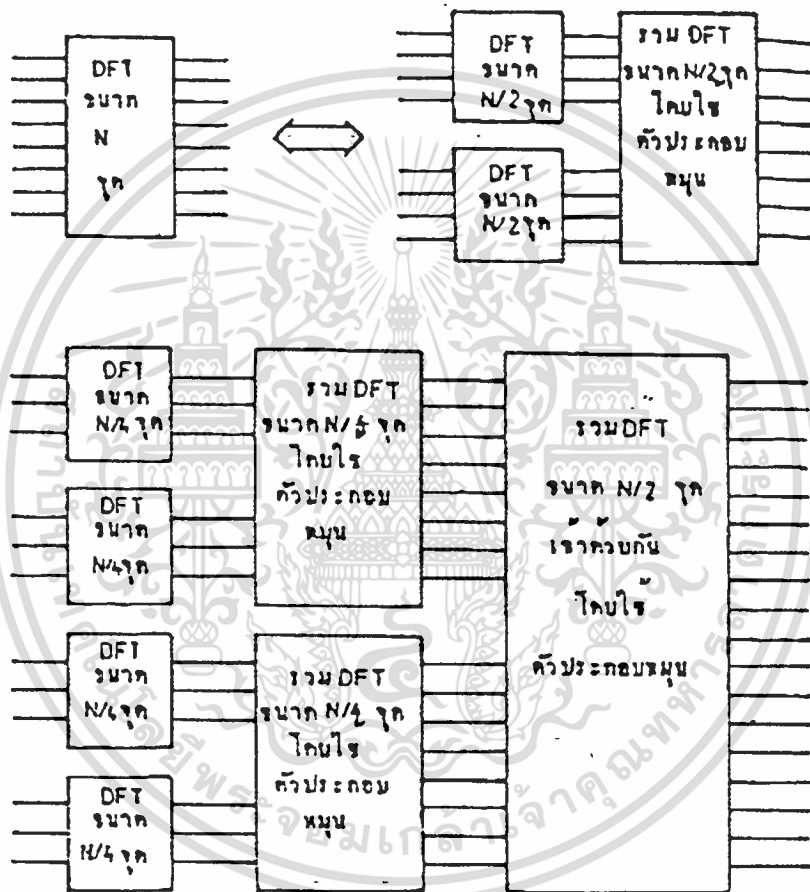
รูปที่ 3.6(a) และ (b) แสดงวิธีแบบ ดีไอที สำหรับ ดีเอฟที แบบ 8จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



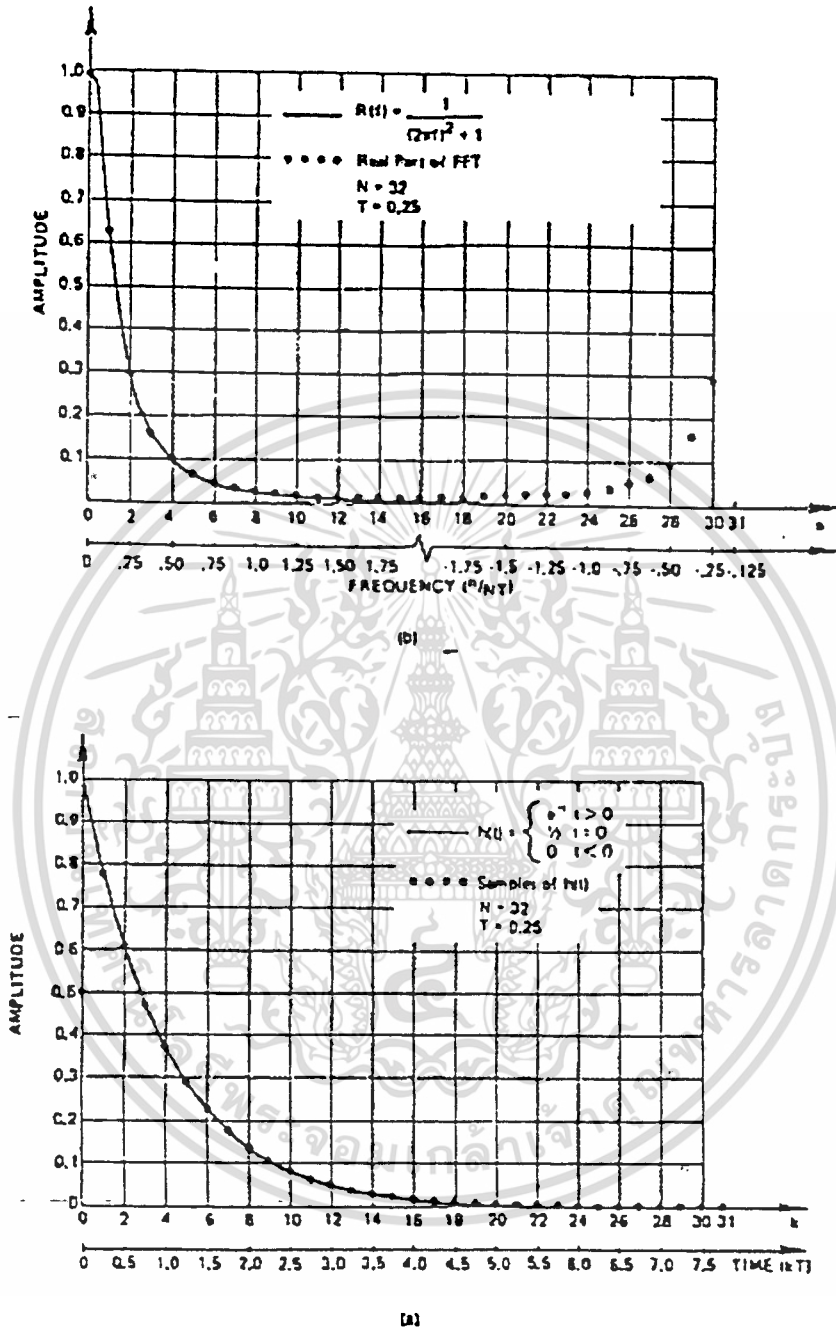
รูปที่ 3.6 (ก) กราฟแสดงการไหลสัญญาณแสดงการคำนวณตามรูป 3.5
(ข) แสดงการสลับตำแหน่งของลำดับ $x(n)$ ด้วยการผันบิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



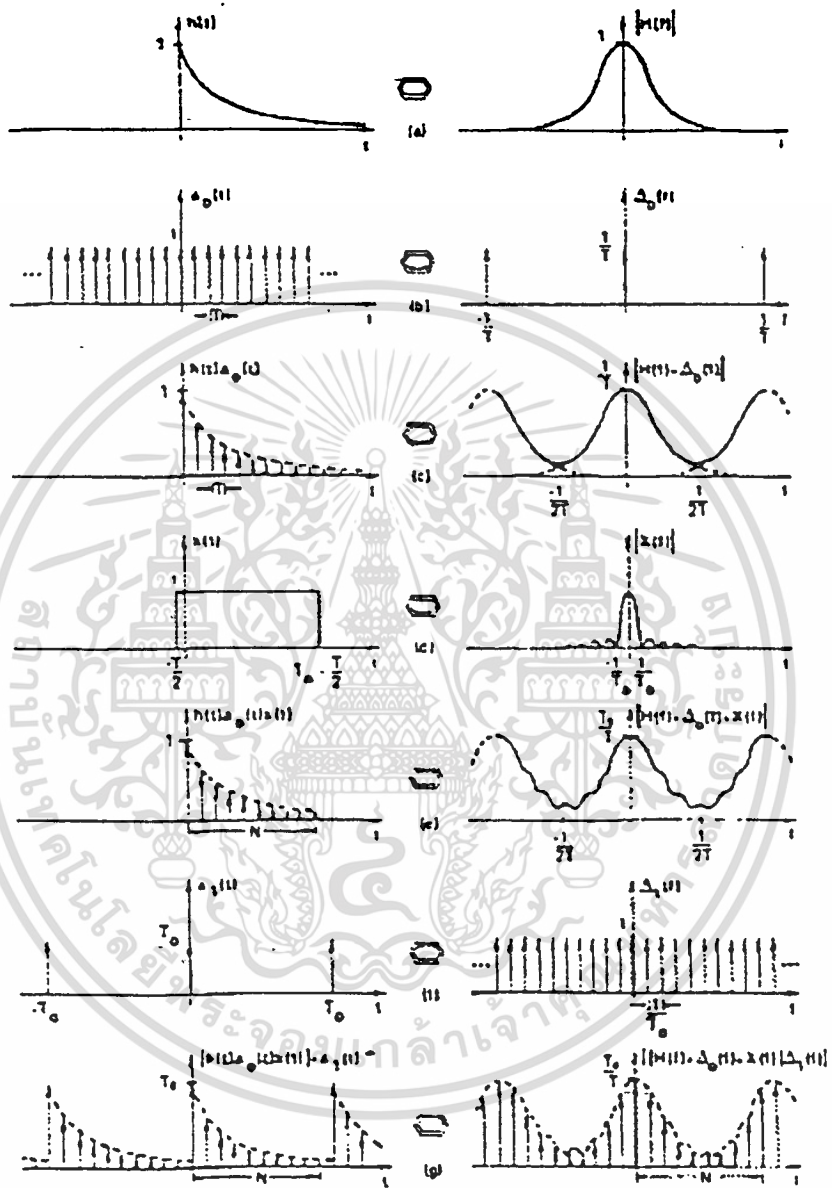
รูปที่ 3.7 ภาพรวมแสดงขั้นตอนวิธีการคำนวณ ดีเอฟที ขนาด N จุด แบบ ดีไอที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



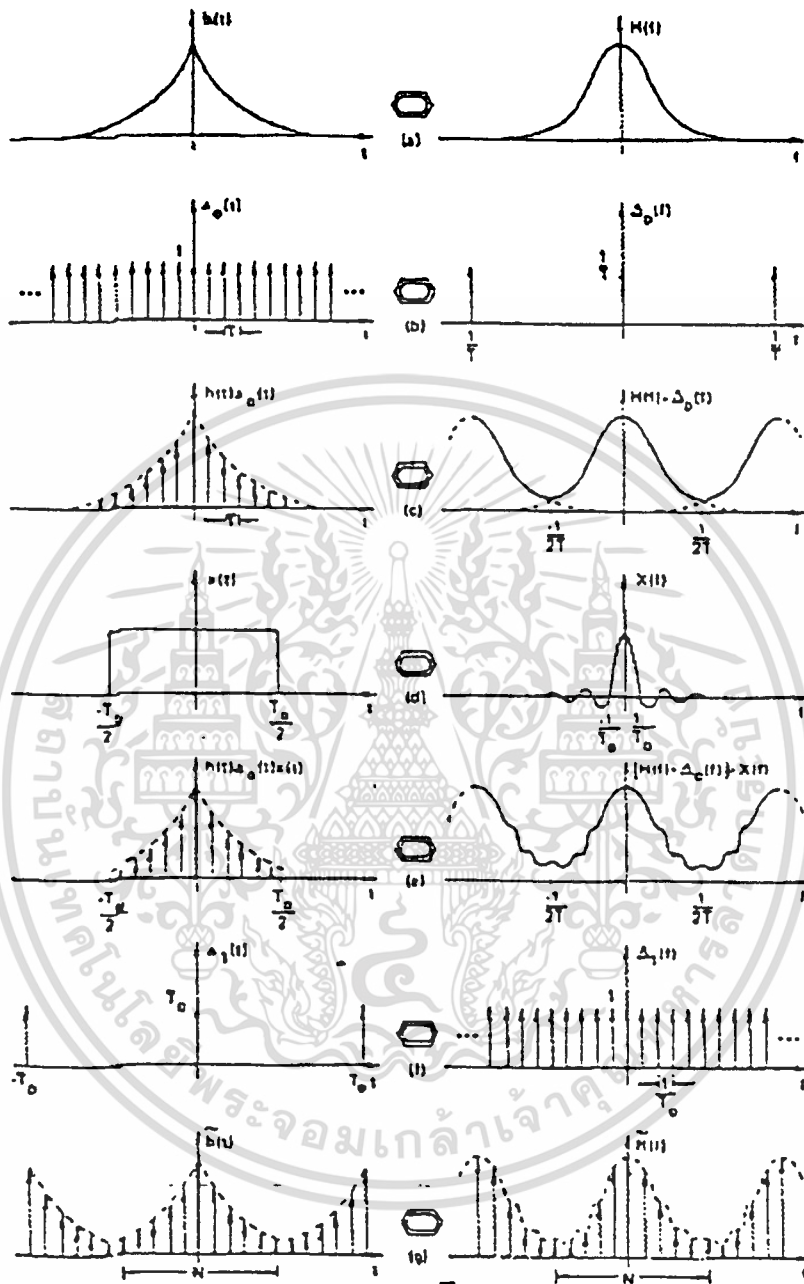
รูป 3.8 แสดงตัวอย่างการแปลงฟูเรียร์ โดยผ่าน เอ็ฟเอ็ฟที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



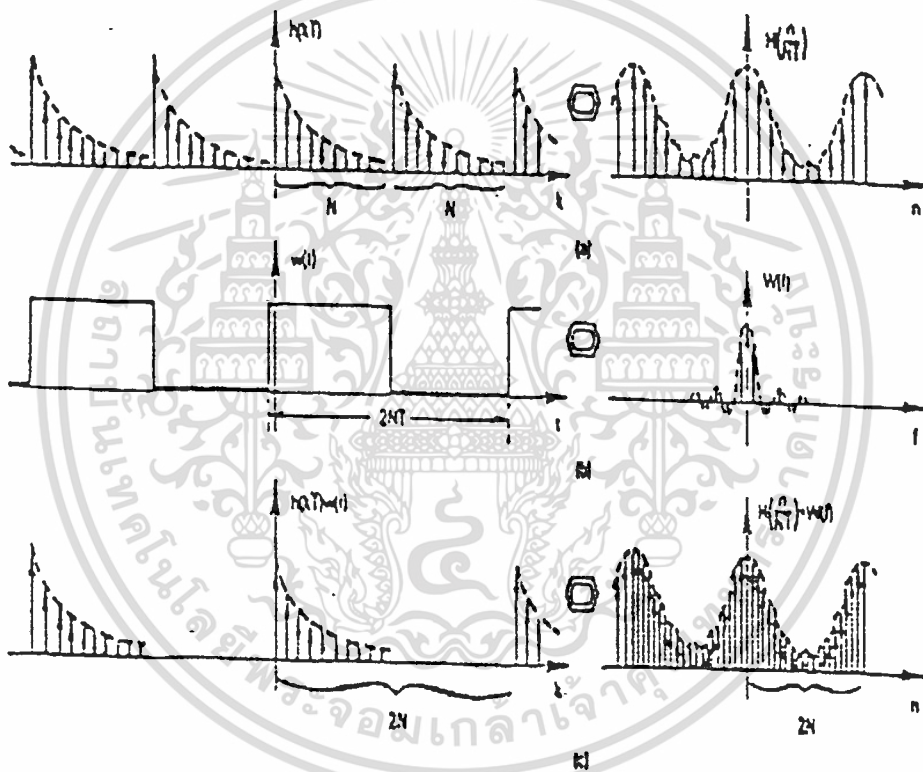
รูปที่ 3.9 แสดงรูปของการแปลงฟูเรียร์(DFT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



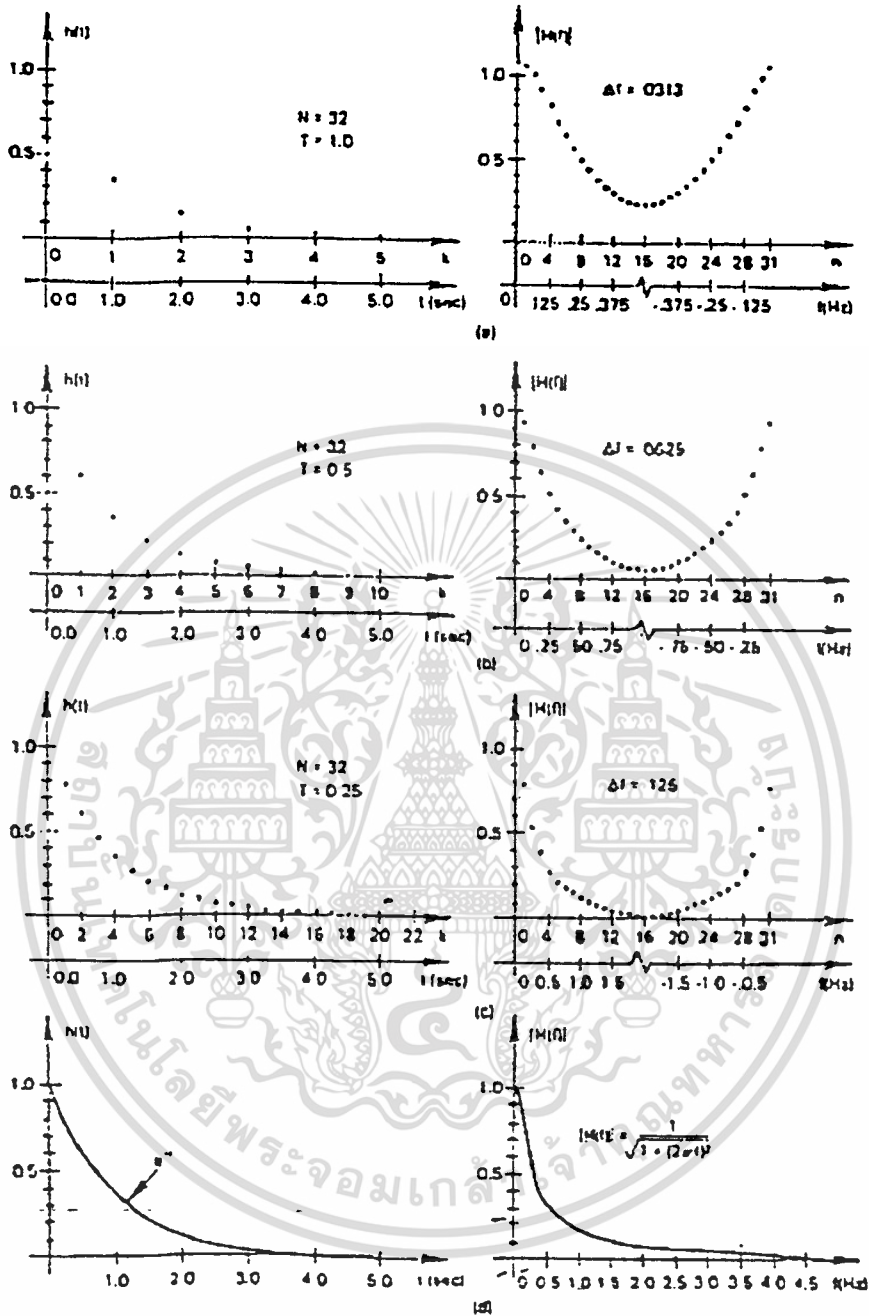
รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างการแปลงฟูเรียร์ (DFT) ในโดเมนเวลาและ โดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



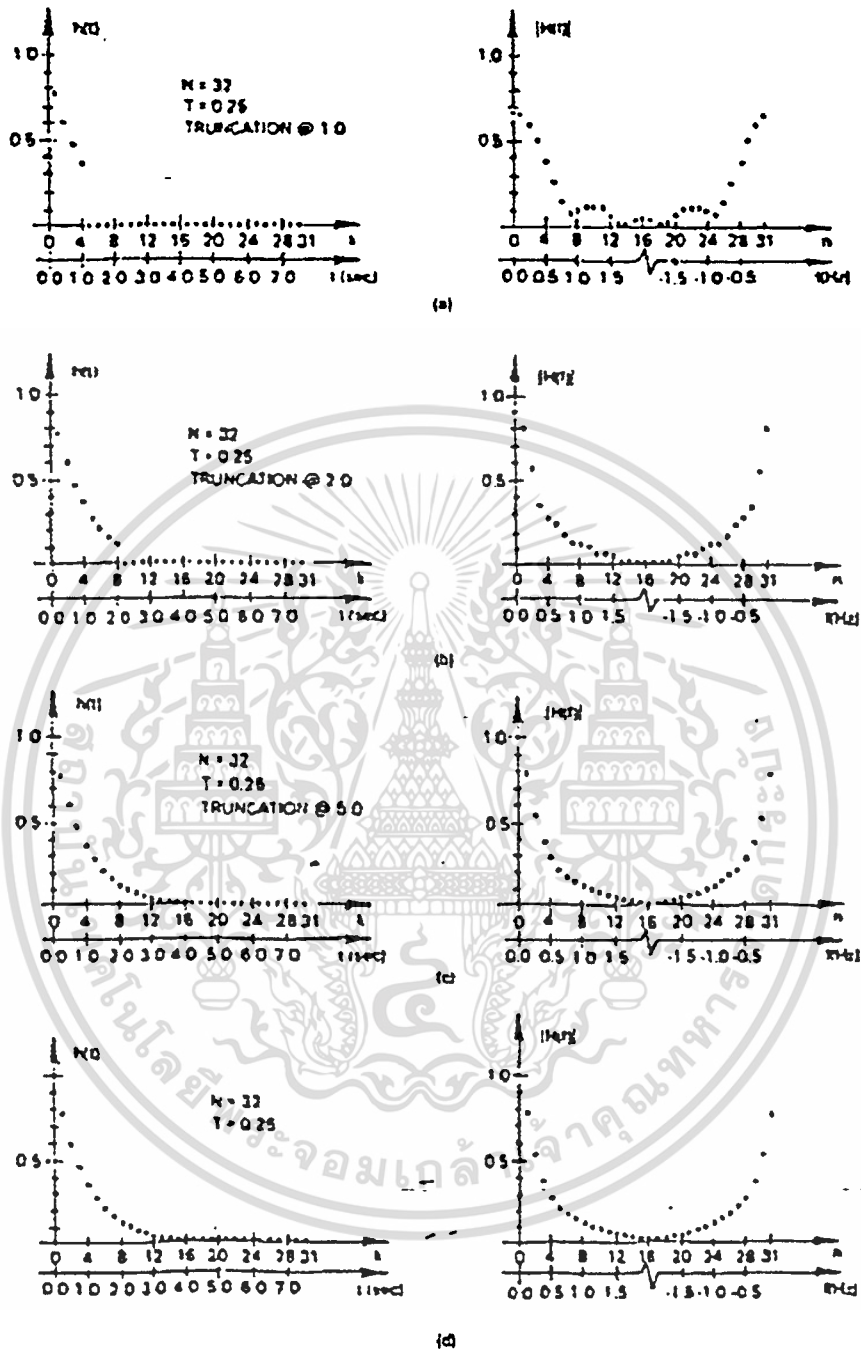
รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างของการเพิ่มความละเอียดของ เอฟเอฟที โดยต่อเคิมศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



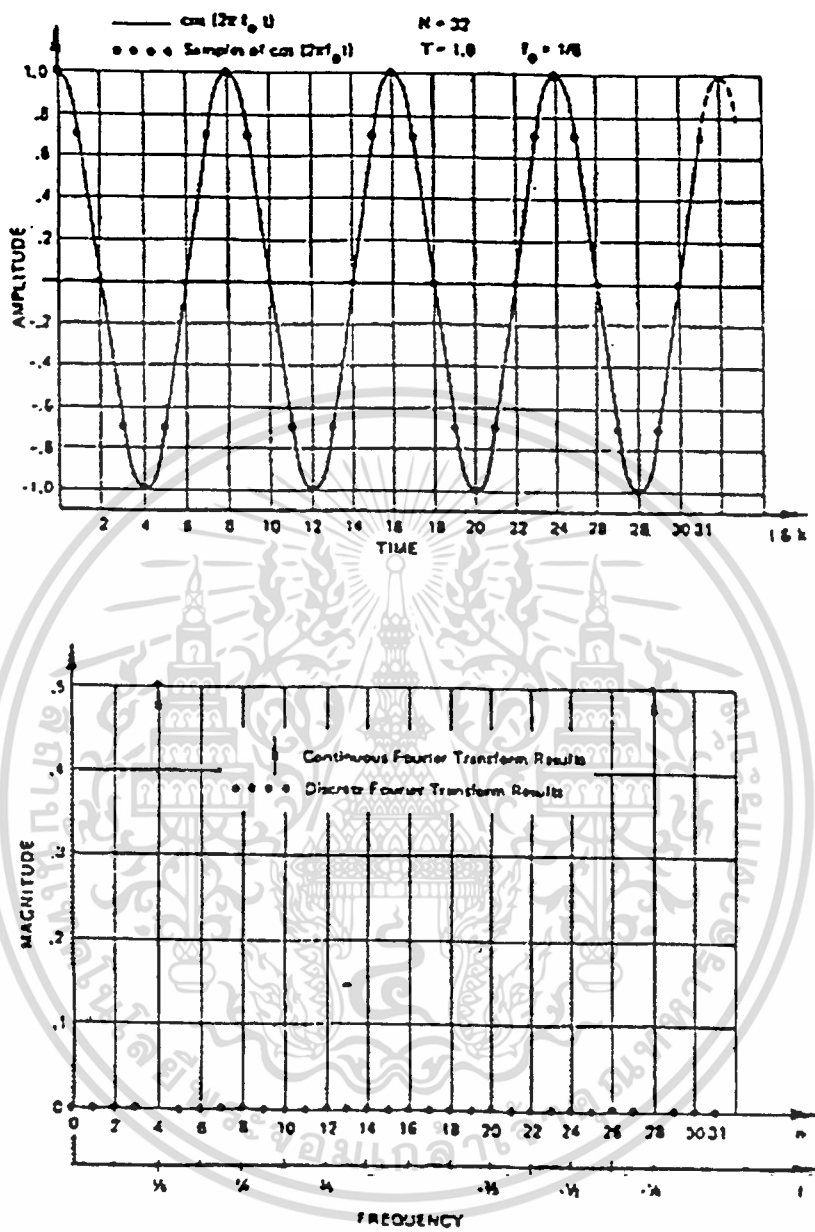
รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างของความผิดเพี้ยนในโดเมนความถี่จากอัตราการสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



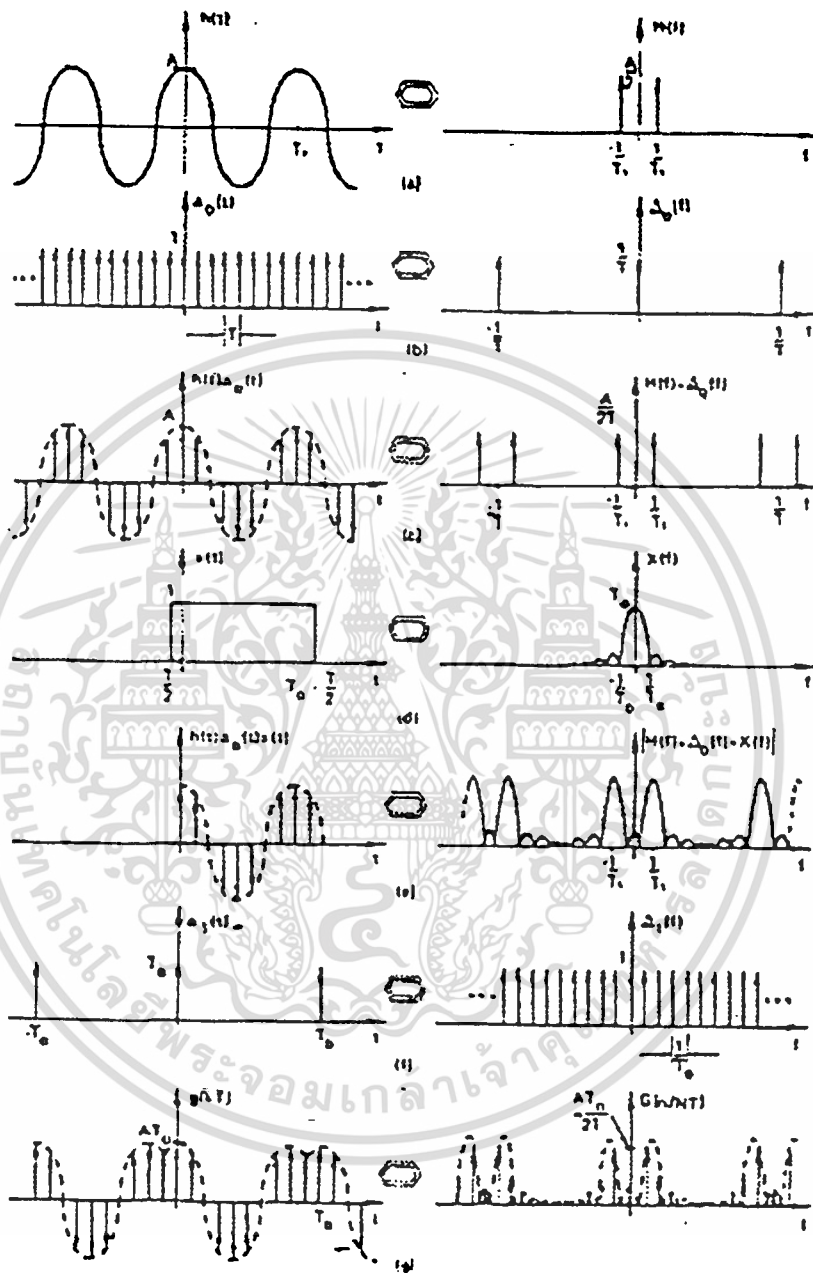
รูปที่ 3.13 แสดงการตัดทอนในโดเมนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



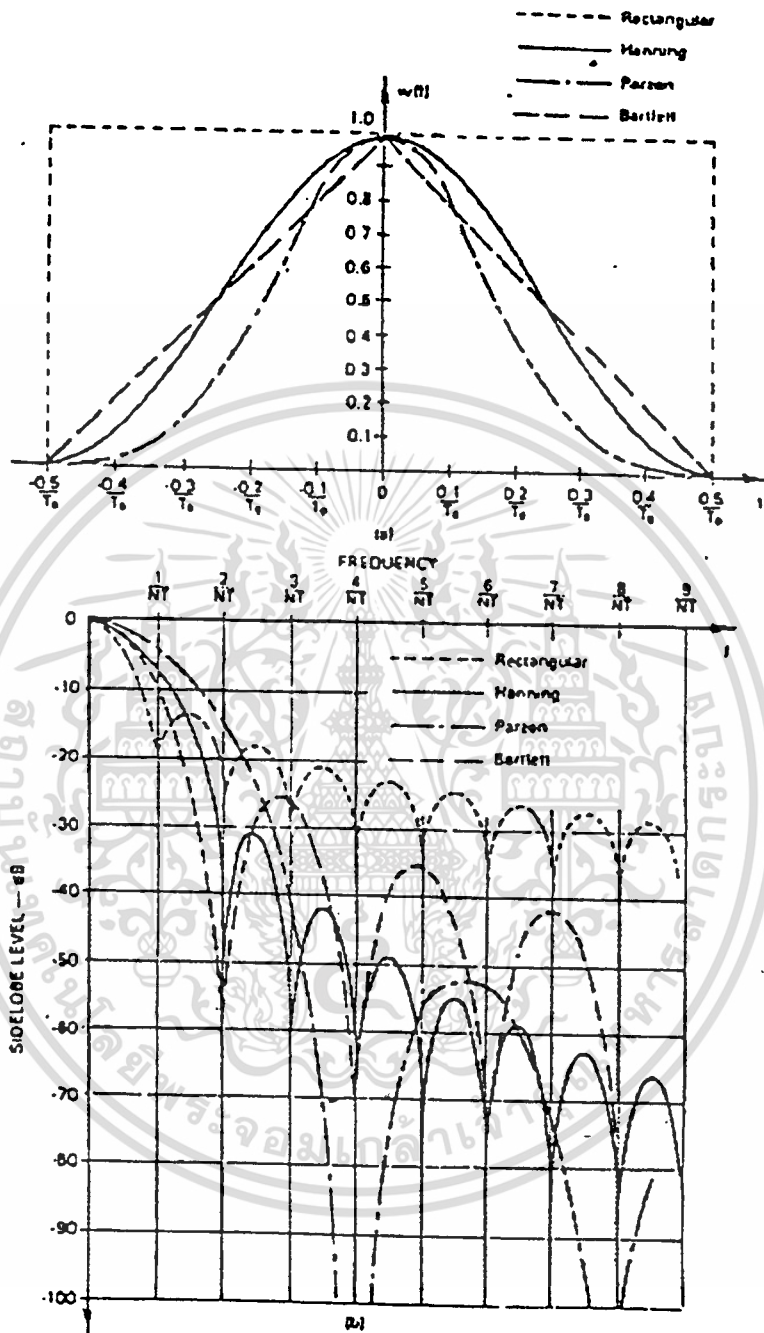
รูปที่ 3.14 แสดงผลจาก เอ็ฟเอ็ฟที ของฟังก์ชันคาบเวลาโดยมี ช่วงการตัดทอนเท่ากับจำนวนเท่าของคาบเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



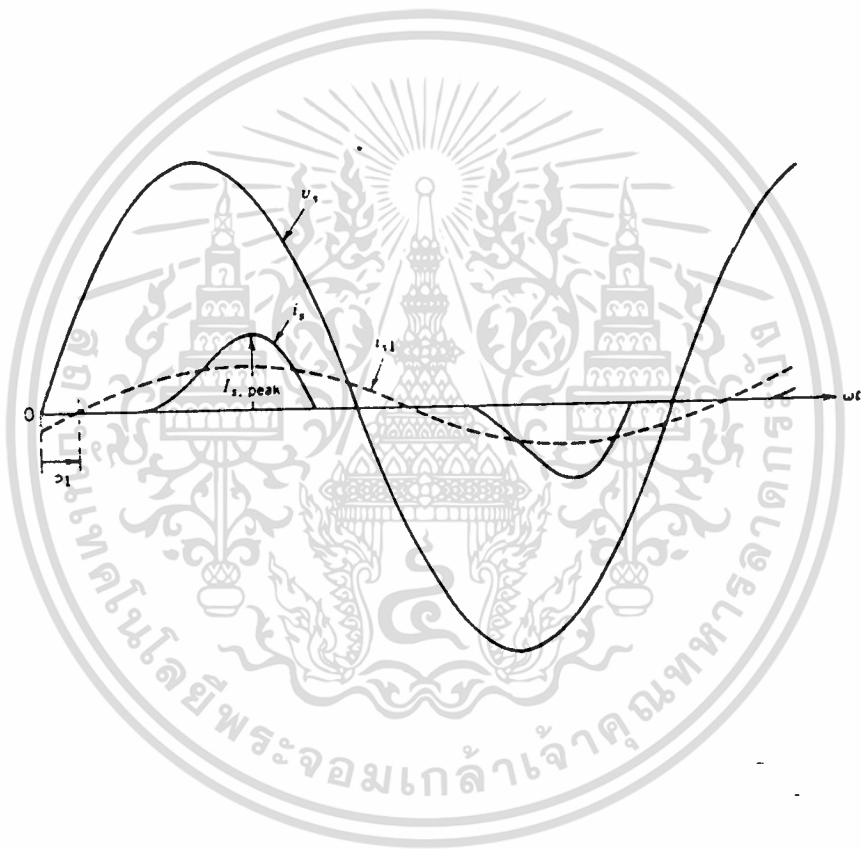
รูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่างการแปลงฟูรีเยร์ โดยผ่าน เอ็ฟเอ็ฟที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



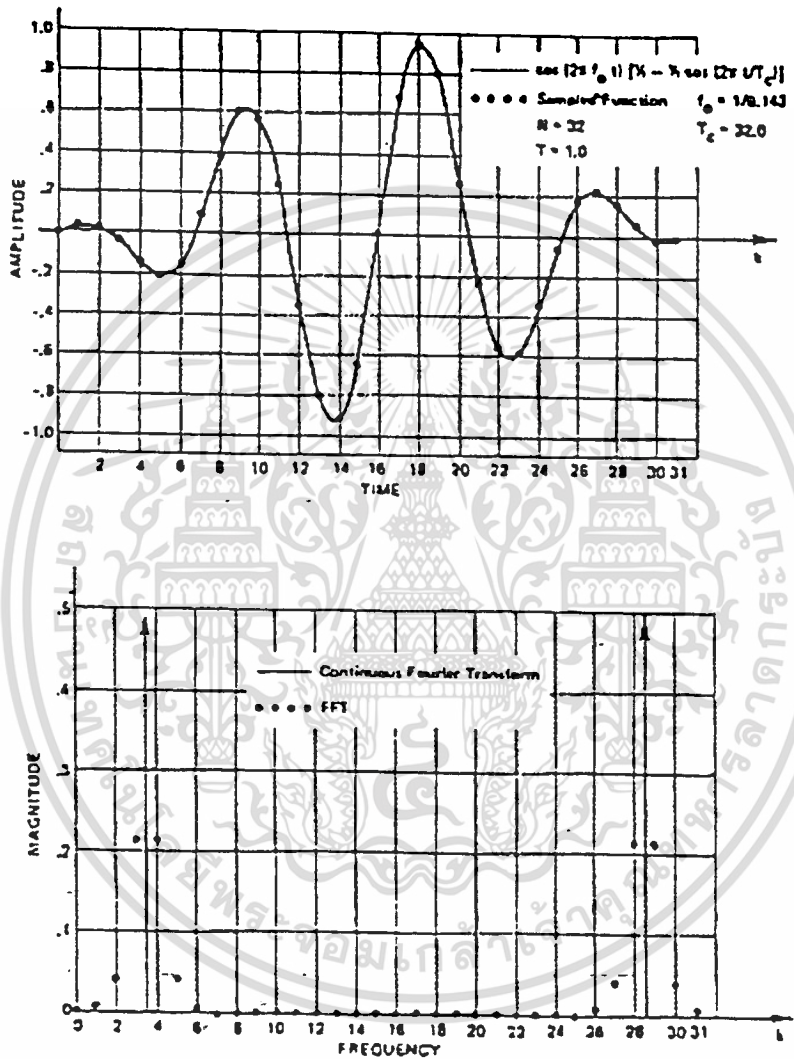
รูปที่ 3.17 แสดงฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักหรือวินโดว์ของ เอ็ฟเอ็ฟที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



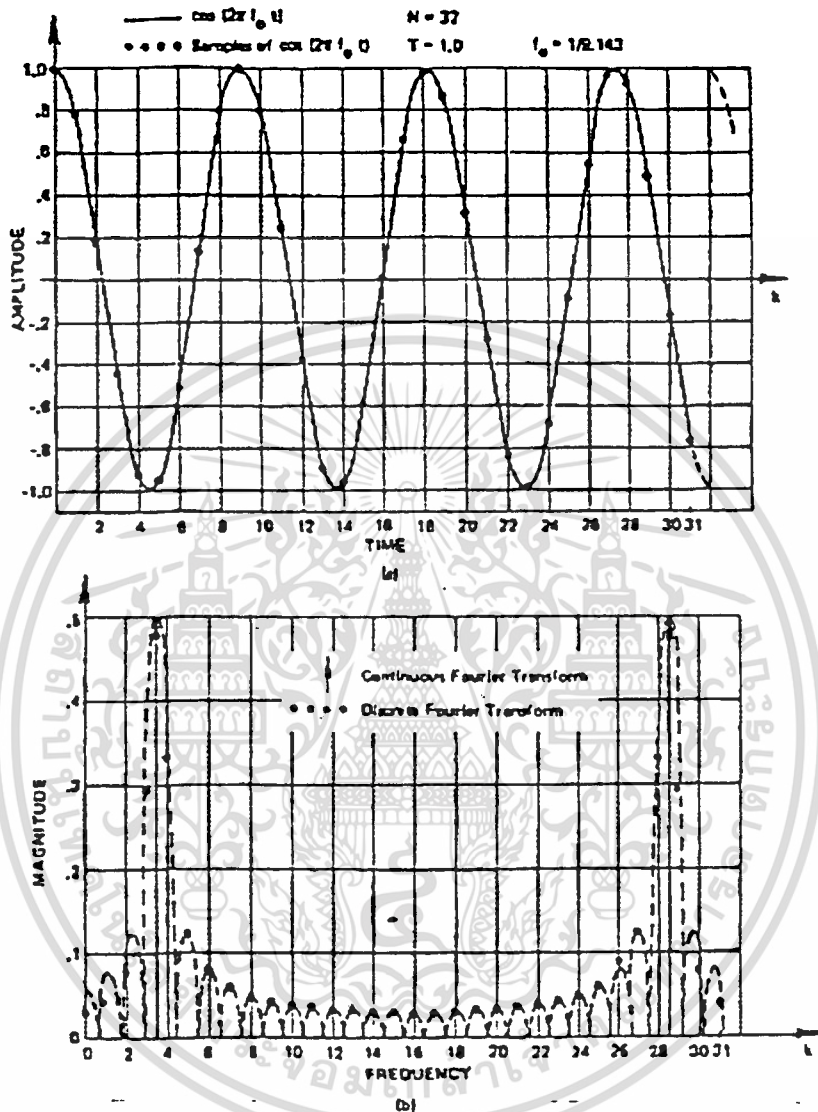
รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะของสัญญาณที่ต้องการหาตัวประกอบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แสดงตัวอย่างการใช้งานแฮนนิ่งฟังก์ชันเพื่อลดส่วนรั่วไหลของการคำนวณด้วยเอฟเฟซีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงผลจาก เอฟเอฟที ของฟังก์ชันคาบเวลาโดยมีช่วง
การตัดทอนไม่เท่ากับจำนวนเท่าของคาบเวลา

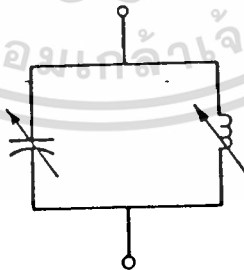
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทำงานของส่วนชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนและการควบคุม

4.1 การใช้งานส่วนชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน

ในบทนี้จะเกี่ยวข้องกับส่วนชดเชยขนานแบบอยู่กับที่อุปกรณ์ปรับปรุงตัวนี้จัดอยู่ในกลุ่มของ ส่วนชดเชยแบบอยู่นิ่ง นั้นไม่เหมือนกับ ชิงโครนัสคอนเดนเซอร์ กล่าวคือไม่มีส่วนเคลื่อนที่ มันจะใช้สำหรับปรับปรุง ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ขึ้นๆลงๆ (surge impedance) และใช้กับส่วนย่อยของระบบสายส่งแรงดันสูงระยะทางยาวๆ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงโหลดที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ ตารางที่ 4.1 แสดงถึงการประยุกต์ใช้งานและรายละเอียดในทางปฏิบัติอย่างกว้างๆของ ส่วนชดเชยแบบอยู่นิ่งหัวข้อหลักในตารางที่ 4.1 แสดงถึงความต้องการพื้นฐานในระบบไฟฟ้ากำลังกระแสสลับ ส่วนการใช้งานด้านอื่นๆที่ไม่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ก็สามารถนำไปใช้งานได้เช่นการควบคุมแรงดันสลับที่ขั้วของเซมิคอนดักเตอร์ การทำให้การสูญเสียที่สายส่งที่ออกมาจากโถกอลเงินเนอร์ชัน น้อยที่สุด หรือเรื่องการรับกำลังไฟฟ้าเสมือน , การกำจัดรีโซแนนซ์ของ ชับชิงโครนัส บางครั้ง ส่วนชดเชย ก็ถูกออกแบบไว้ใช้ในการจำกัดแรงดันชั่วขณะด้วย



รูปที่ 4.1 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบ สแตติก(static) ในทางอุดมคติ

4.1.1 คุณสมบัติของ ส่วนชดเชยแบบอยู่นิ่ง(static var compensator)

รูปที่ 4.1 แสดงถึง การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนในทางอุดมคติ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สามารถปรับค่า กำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการหน่วงเวลา การตอบสนองและยังสามารถขยายช่วงการชดเชยได้อีกด้วย (ขยายช่วง lagging และ leading)

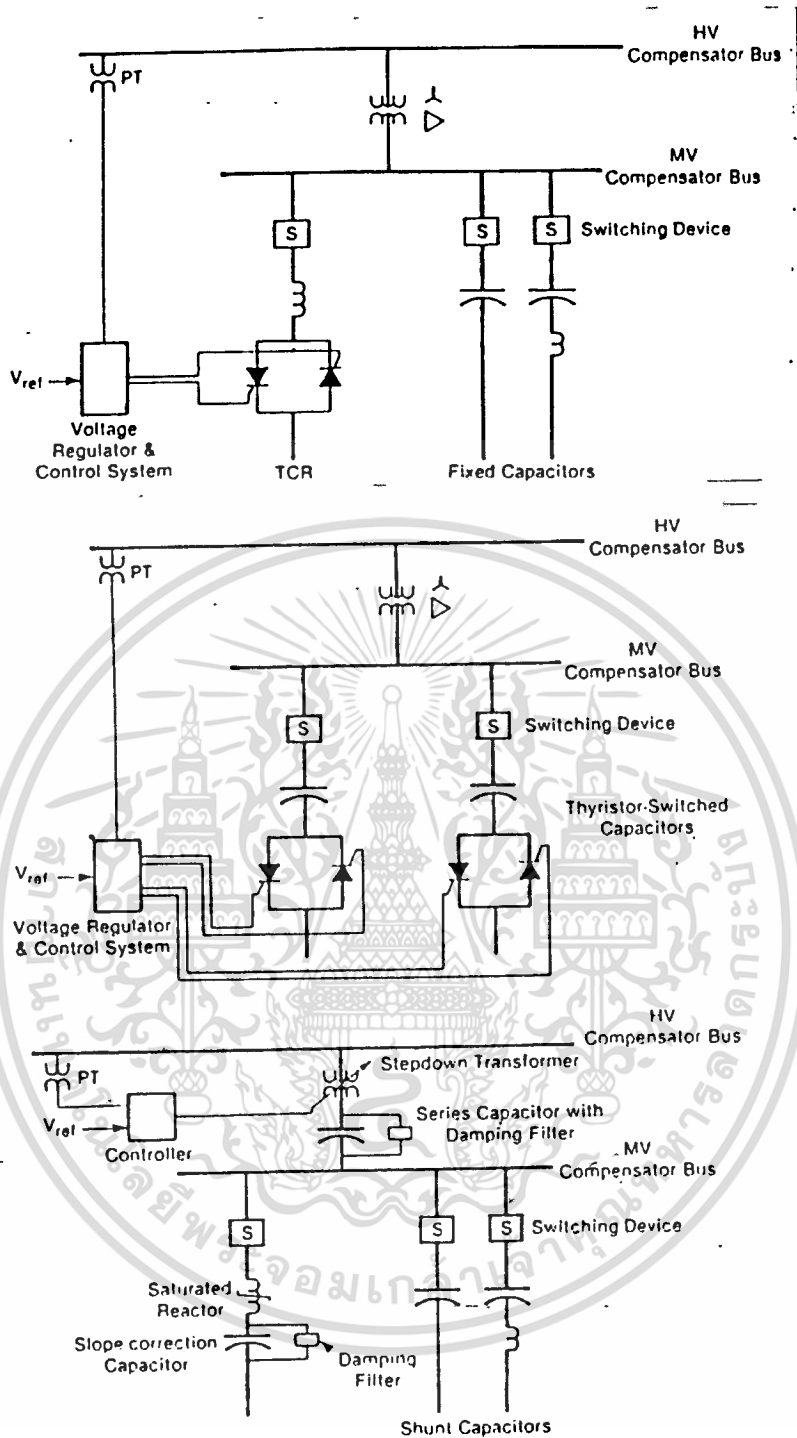
คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของ ส่วนชดเชยแบบอยู่นิ่งคือ ความสามารถในการรักษาให้แรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) คงที่ตลอดช่วงการปรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบไฟฟ้ากำลัง คุณสมบัติในการรักษาแรงดันให้คงที่นี้เป็นความจำเป็นอันแรกของไดนามิกซ์คอมเพ็นเซเตอร์ และมีความสำคัญในการลดการกระตุก (flicker) และการแกว่งของแรงดันที่เกิดจากโหลดที่เปลี่ยนแปลง

คุณสมบัติที่สำคัญข้อที่สองคือความเร็วในการตอบสนอง ซึ่ง ส่วนชดเชย จะต้องสามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนได้รวดเร็วเพียงพอในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ขั้ว แม้จะเปลี่ยนเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่มันก็เป็นการยากที่จะให้มันสามารถตอบสนองได้เร็วสำหรับทุกระบบ เช่น ในระบบสายส่งซึ่งมีค่าคงที่เวลา (time constants) ที่ครอบคลุมถึงการเข้าสู่เสถียรภาพของระบบอีกครั้ง (re-establishment) ของสถานะเสถียร หลังจากรบกวน ซึ่งค่าคงที่ของเวลา นี้จะขึ้นอยู่กับระบบภายนอกที่ค่ออยู่กับ ส่วนชดเชย ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของระบบ แม้ว่าการตอบสนองที่เร็วที่สุดจะเป็นสิ่งที่ต้องการ แต่ก็จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งไม่มีจุดที่ชี้ชัดลงไปว่า compensator แต่ละแบบจะมีการตอบสนองที่เร็วที่สุดที่เป็นไปได้ในทางทฤษฎีเท่าใด ในการปรับปรุงค่าโหลด การกระตุก (flicker) จะลดลงได้เมื่อ ส่วนชดเชย ตอบสนองรวดเร็วที่สุดเท่านั้น

ลักษณะการควบคุมส่วนใหญ่จะมีความซับซ้อนเป็นบวกเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเสถียรภาพของจุดปฏิบัติงาน กระแสเสมือนจะถูกจำกัดในทั้งแรกกึ่ง และ รีดคั้ง ด้วยองค์ประกอบในการออกแบบ ส่วนชดเชย และหลักในการปฏิบัติงานของมัน แม้ว่ากราฟคุณลักษณะของมันจะเบนออกจากเส้นตรง ซึ่งทำให้ไม่ต่อเนื่อง โดยค่าความชันของกราฟจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสกับแรงดัน

ทฤษฎีหลายอย่างถูกนำมาใช้ในการออกแบบ ส่วนชดเชยแบบขนาน ซึ่งสามารถจำแนกประเภทของ ส่วนชดเชย ได้เป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

1. ไทริสเตอร์คอลลโทรลรีแอคเตอร์ (the thyristor-control reactor : TCR)
2. ไทริสเตอร์สวิตซ์คาปาซิเตอร์ (the thyristor-switch capacitor :TSC)
3. แซททูเรทรีแอคเตอร์ (the saturated reactor: SR)



รูปที่ 4.2 วันไลน์ไดอะแกรมของ ทีซีอาร์ คอมเพนเซเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ฟิกซ์ชันท์ คาปาซิเตอร์

รูปที่ 4.3 วันไลน์ไดอะแกรมของ ทีเอสซี คอมเพนเซเตอร์

รูปที่ 4.4 วันไลน์ไดอะแกรมของ แชนเจอร์รีเอกเตอร์คอมเพนเซเตอร์ ซึ่งมีตัวเก็บประจุขนาน และปรับค่าความชัน

4.1.2 ชนิดของ ส่วนชดเชย

รูปที่ 4.2 ถึง 4.4 จะแสดงถึงวันไลน์โคอะแกรมของ ส่วนชดเชย แบบหลักๆ ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละแบบ เราจะดูลักษณะทั่วไปที่สำคัญ 2-3 ประการ คือ

1. จะมีการต่อคาปาซิเตอร์ ขนานกับซัสเซปแตนซ์(susceptance)ที่ควบคุมได้ โดยคาปาซิเตอร์ขนาน จะถูกปรับด้วยตัวเหนี่ยวนำ เล็กๆสู่ค่าความถี่ฮาร์โมนิก ซึ่งอาจเป็นลำดับจำนวนเต็มหรือไม่เป็นก็ได้ เหตุผลที่ปรับก็เพื่อที่จะลดคลื่นฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจาก คอลโทรลซัสเซปแตนซ์ (TCR หรือ SR) หรือเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาโรโซแนนซ์ คาปาซิเตอร์ขนาน นี้จะทำให้กำลังไฟฟ้าเสมือนลัฟท์ของ คอมเพนเซเตอร์เป็นแบบมูมนำ (leading) หรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน

2. จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 เราจะสังเกตเห็นว่ามีมือแปลงลดแรงดัน (step-down transformer) ซึ่งจะมีหรือไม่มีก็ได้ แต่ถ้าใส่เข้าไปแล้วจะมีผลกระทบต่อคุณลักษณะของ ส่วนชดเชย อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับฮาร์โมนิกส์ , การสูญเสีย(lost) และเรื่องแรงดันเกิน (overvoltage) บางครั้ง คาปาซิเตอร์ขนาน นี้จะต่ออยู่กับด้านแรงดันสูงของมือแปลง แต่ส่วนใหญ่แล้วจะต่อกับบัสแรงดันปานกลางของ ส่วนชดเชย และมีอุปกรณ์ควบคุมต่ออยู่ด้วย บางครั้งคอมเพนเซเตอร์ ก็จะต่ออยู่กับขดลวดทุติยภูมิของมือแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง ถ้า ทีซีอาร์ คอมเพนเซเตอร์ ต่อ ชั้นที่คาปาซิเตอร์ กับด้านแรงดันสูง จะต้องใช้มือแปลงที่ลดแรงดันลงมากๆ ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียสูง สำหรับ ไทริสเตอร์คอนโทรลทรานฟอร์เมอร์ (TCT) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของ ทีซีอาร์ ก็จะมีลักษณะเช่นนี้เหมือนกัน

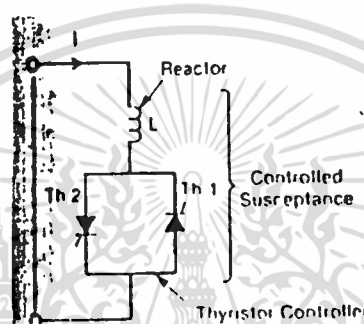
3. ลักษณะที่คล้ายคลึงกันของรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 ถือว่าเป็นหลักการอย่างกว้างๆ ส่วนรายละเอียดรูปร่างและการนำไปติดตั้งในสถานีไฟฟ้าย่อยของ ส่วนชดเชย แต่ละแบบก็จะแตกต่างกันออกไป เช่น ส่วนชดเชยแบบมือแปลงจะใช้ ตัวเหนี่ยวนำแบบอิมตัว ในขณะที่ ส่วนชดเชย แบบ ทีเอสซี และ ทีซีอาร์ จะใช้ไริสเตอร์ควบคุม โดยจะแยกส่วนจาก คาปาซิเตอร์ และ ตัวเหนี่ยวนำ และมักจะบรรจุในโครงสร้างเพื่อป้องกันฝนฟ้าที่อาจทำให้เกิดความเสียหายได้

4.2 คอมเพนเซเตอร์แบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ (TCR)

และแบบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

4.2.1 หลักการทำงาน

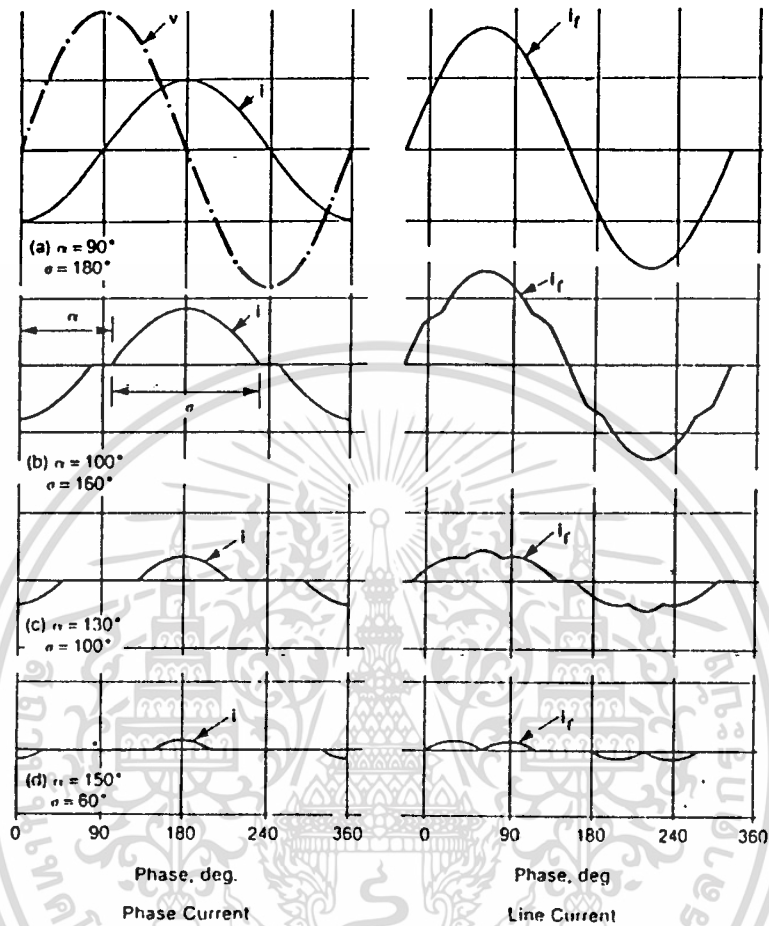
รูปแบบพื้นฐานของ ไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ (TCR) แสดงดังรูปที่ 4.5 ส่วนควบคุมคือส่วนที่เป็นไทรสเตอร์(thyristor)ซึ่งต่อในลักษณะที่ขนานกันดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ส่วนต่างๆของ thyristor-controlled reactor

กระแสกลับไป-กลับมาในแต่ละครึ่งรอบ ของความถี่ แหล่งจ่าย ถ้าไทรสเตอร์ถูก เปิด ที่ ค่าสูงสุดของ แรงดันแหล่งจ่ายพอดี จะเกิดการนำกระแสเต็มที่ (full conduction) ทำให้ ไทรสเตอร์คอนโทรลเลอร์ถูกลัดวงจร และกระแสเป็นรีแอกทีฟ และตามหลัง (lagging) แรงดันเกือบๆ 90° เนื่องจากมีส่วนประกอบที่อินเฟส อยู่เล็กน้อยอันเกิดจากการสูญเสียกำลังในรีแอกเตอร์ ประมาณ 0.5-2% ของ รีแอกทีฟพาวเวอร์ รูปที่ 4.6a แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อเกิดการนำกระแสเต็มที่ (full conduction)

ถ้าเราทริกขาเกตที่มุมมากขึ้น (delay) เท่ากันบนไทรสเตอร์ทั้งคู่ รูปคลื่นของกระแสจะเป็นดังรูปที่ 4.6a ถึง 4.6d ผลการตอบสนองเหล่านี้จะขึ้นอยู่กั่มุมทริก α ซึ่งวัดจากจุดที่แรงดันเป็นศูนย์ การนำกระแสจะเกิดขึ้นเต็มที่เมื่อมุมทริกเป็น 90° แต่ถ้าทริกด้วยมุม 90° ถึง 180° จะเกิดการนำกระแสบางส่วน เมื่อเพิ่มมุมทริกจะไปทำให้ส่วนประกอบ ความถี่มูลฐาน (ฮาร์โมนิกส์ที่ 1) ของกระแสลดลง การทำเช่นนี้เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มอินดักแตนซ์ ของรีแอกเตอร์ ซึ่งเป็นการลดกำลังไฟฟ้าเสมือนลง นอกจากจะเกี่ยวข้องกับกระแสมูลฐานแล้ว ทีซีอาร์ยังเป็น อิมพีแดนซ์ ที่ควบคุมได้ และสามารถนำไปใช้ใน ส่วนชดเชยแบบอยู่หนึ่ง



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นกระแสไลน์ และกระแสเฟส เมื่อต่อ ที่ซีอาร์แบบ เกลดต้า

กระแสขณะใดๆ (i) จะเป็น

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t) & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \dots (4.1)$$

เมื่อ V คือ แรงดันอาร์เอ็มเอส

$X_L = \omega L$ เป็นค่า รีแอกแตนซ์ ของ รีแอกเตอร์ ที่ความถี่เริ่มแรก (Ohm)

$$\omega = 2\pi f$$

และ α คือ มุมทริกกีที่ป้อนขากท

จุดเริ่มแรกของเวลา คือ จุดที่แรงดันไฟฟ้าเป็น 0 และกำลังจะเพิ่มขึ้นในทางบวก
เมื่อใช้การวิเคราะห์ฟูเรียร์ (Fourier) จะพบว่ากระแสมูลฐาน จะมีค่าเป็น

$$I_1 = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} V \quad A_{(rms)} \quad \dots (4.2)$$

เมื่อ σ คือ ช่วงมุมที่นำกระแส ซึ่งสัมพันธ์กับ α ดังสมการ

$$\alpha + \sigma/2 = \pi \quad \dots (4.3)$$

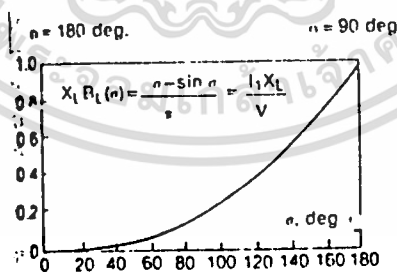
เราสามารถเขียนสมการที่ (4.2) ใหม่ได้เป็น

$$I_1 = B_L(\sigma)V \quad \dots (4.4)$$

เมื่อ $B_L(\sigma)$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ความถี่มูลฐานซึ่งสามารถปรับ
ค่าได้โดยควบคุมช่วงมุมที่นำกระแส (σ)

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} \quad \dots (4.5)$$

กฎการควบคุมนี้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.7 เมื่อ $\sigma = \pi$ หรือ 180° จะทำให้ได้ค่า
 $B_L(\max) = \frac{1}{X_L}$ ซึ่งจะทำให้ทรินสเตอร์นำกระแสเต็มที่ และค่า B_L จะต่ำสุดเป็น 0 เมื่อ $\sigma = 0$
($\alpha = 180^\circ$) หลักในการควบคุมดังกล่าวเรียกว่า "เฟสคอนโทรล"

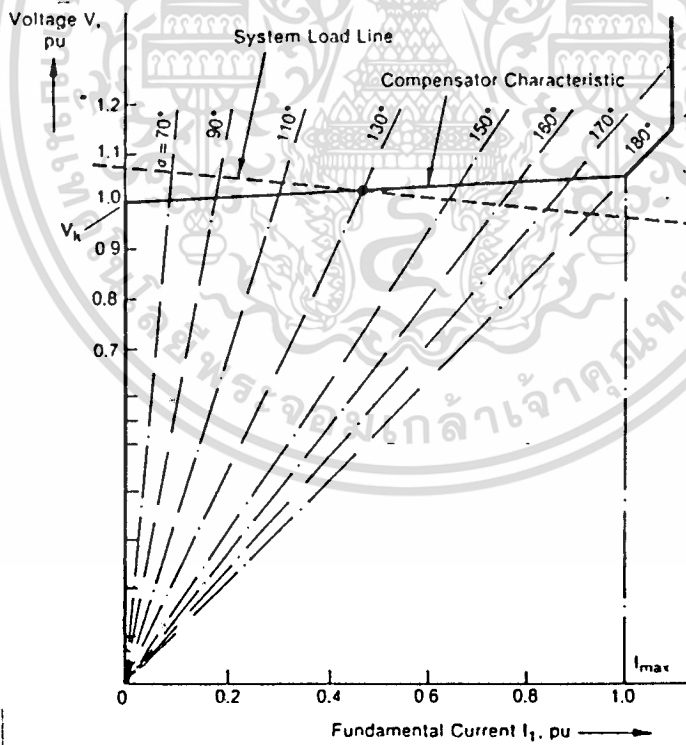


รูปที่ 4.7 กฎการควบคุมของ ทริสเตอร์แบบพื้นฐาน

4.2.2 ลักษณะแรงดัน/กระแส

ที่ซีอาร์ จำเป็นต้องมีระบบควบคุมที่ใช้กำหนดในรูปของ เกตติงพัลส์ ไปยังขาเกตของไทรสเตอร์ ในการออกแบบระบบควบคุมนี้เราจะต้องสร้างสัญญาณป้อนขาเกตที่จะทำให้ได้ รั้งเซพแดนซ์ B_L ตามต้องการ กระบวนการในการควบคุมจะแตกต่างกันไปตาม พารามิเตอร์ ที่วัดได้ของระบบที่จะไปชดเชย (compensated) เช่น แรงดัน และจะสร้างสัญญาณป้อนขาเกต (gating pulses) โดยไม่ได้ใช้สัญญาณสำหรับ B_L ที่แน่นอน ลักษณะของแรงดัน/กระแสในแต่ละกรณีจะเป็นดังรูปที่ 4.8 จุดตัดระหว่างเส้นโหลดของระบบกับเส้น คุณสมบัติของส่วนชดเชย คือ สภาวะ สเตทส์สเตท เช่น ที่มุมช่วงนำกระแส (conduction angle) 130° จะให้ค่าแรงดันประมาณ 1.0 p.u. แต่กราฟนี้เป็นแค่เพียงส่วนหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมซึ่งจะต้องพิจารณาส่วนอื่นๆอีก เช่น คอนโทรลเซอร์คิตติ้ง และ คอมเพนเซเตอร์เรดคิตติ้ง ลักษณะการควบคุมดังรูปที่ 4.8 กำหนดโดยสมการ

$$V = V_K + jX_S I_1, \quad 0 < I_1 < I_{max} \quad \text{..... (4.6)}$$



รูปที่ 4.8 กราฟลักษณะแรงดัน/กระแสมูลฐาน ใน ที่ซีอาร์คอมเพนเซเตอร์

ในรูปที่ 4.8 I_{\max} มักจะเป็นค่ากระแสพิทัก (rated current) ของตัวเหนี่ยวนำ สำหรับที่แสดงไว้นี้เป็น 1 p.u.

4.2.3 ฮาร์โมนิกส์

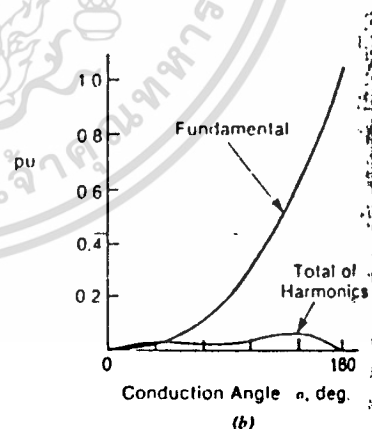
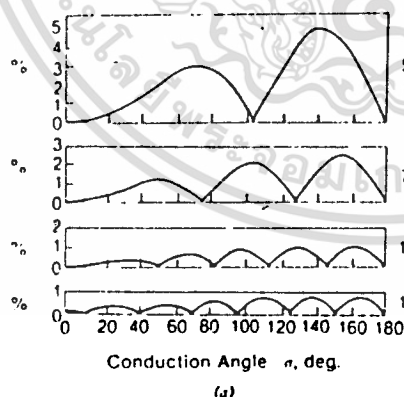
ถ้าเพิ่มมุมทริกขาเกต (α) จะทำให้มุมช่วงนำกระแส (σ) ลดลงและก่อให้เกิดผลที่สำคัญ 2 ประการ คือ

- 1) กำลังงานสูญเสียทั้งในตัวควบคุมไทรสเตอร์และ รีแอคเตอร์ เพิ่มขึ้น
- 2) คลื่นกระแสมีความเป็นซายน์ น้อยลง กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือที่ซีอาร์ สร้างกระแสที่มีฮาร์โมนิกเกิดขึ้น

ถ้ามุมทริกขาเกต (α) ของไทรสเตอร์ทั้งสองตัวเท่ากัน จะเกิดฮาร์โมนิกส์ที่ขึ้นและค่า อาร์เอ็มเอส ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ที่ n ของกระแสจะมีค่าเป็น

$$I_n = \frac{4}{\pi} \frac{V}{X_L} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha \frac{\sin n\alpha}{n} \right] \dots (4.7)$$

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



รูปที่ 4.9 ฮาร์โมนิกส์ของ ทีซีอาร์

- (a) ส่วนประกอบของกระแสฮาร์โมนิกหลักของ ทีซีอาร์ แต่ละรูปแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของส่วนประกอบมูลฐาน ที่การนำกระแสเต็มที โดยค่าเปอร์เซ็นต์นี้จะเท่ากันทั้งในกระแส โลว์และกระแสเฟส

(b) ส่วนประกอบรวมของกระแส ทีซีอาร์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของส่วนประกอบมูลฐานที่การนำกระแสเต็มที โดยค่าเปอร์เซ็นต์นี้จะเท่ากันทั้งในกระแสไลน์ และกระแสเฟส

TABLE 2
Maximum Amplitudes of Harmonic Currents in TCR*

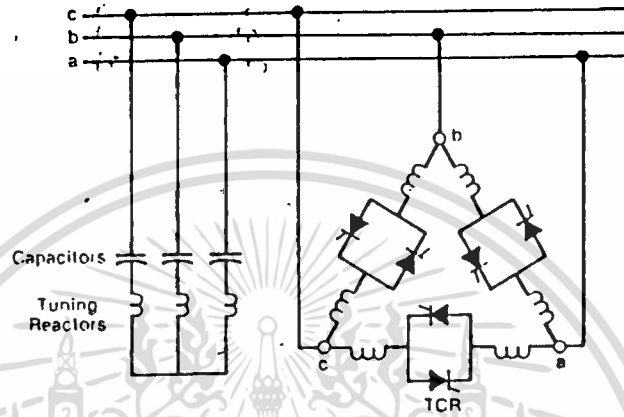
Harmonic Order	Percentage
1	100
3	(13.78)
5	5.05
7	2.59
9	(1.57)
11	1.05
13	0.75
15	(0.57)
17	0.44
19	0.35
21	(0.29)
23	0.24
25	0.20
27	(0.17)
29	0.15
31	0.13
33	(0.12)
35	0.10
37	0.09

รูปที่ 4.9a แสดงแอมพลิจูดซึ่งเปลี่ยนตามมุมช่วงนำกระแสของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำๆ และรูปที่ 4.9b แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าส่วนประกอบที่ฮาร์โมนิกต่างๆรวมกัน ตารางที่ 4.2 จะแสดงค่า แอมพลิจูด สูงสุดของฮาร์โมนิกส์ต่างๆจนถึงฮาร์โมนิกส์ที่ 37 (Note ค่าสูงสุดมิได้เกิดที่มุมช่วงนำกระแส (0) เดียวกัน)

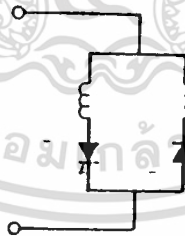
ทีซีอาร์สำหรับระบบ 3 เฟส จะจัดเรียงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเสมือนเป็น ทีซีอาร์ 1 เฟส 3 ตัว ต่อกับแบบ เคลด้า ซึ่งถ้าระบบสมมูลฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 จะไหลวนอยู่ในวงปิด เคลด้า และจะขาดหายไปจากกระแสไลน์ ส่วนฮาร์โมนิกส์ที่เหลือทั้งหมดจะปรากฏที่กระแสไลน์ และขนาดของฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวจะมีอัตราส่วนเดียวกับที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.2 อย่างไรก็ตามรูปคลื่นจะแตกต่างไปจากกระแสเฟสบ้าง ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.6

สิ่งที่สำคัญมากสำหรับ ทีซีอาร์ คือต้องมั่นใจว่ามุมช่วงนำกระแสของไทรสเตอร์คู่ ต่อกันกลับกันนั้นเท่ากัน ถ้ามุมช่วงนำกระแสไม่เท่ากันจะก่อให้เกิดส่วนฮาร์โมนิกขึ้นใน

กระแส และทำให้เกิดความร้อนที่ขั้วตรงข้ามของไทรสเตอร์ไม่เท่ากัน ด้วยเหตุนี้มุมช่วงนำกระแส (α) จึงจำกัดแค่ 180° อย่างไรก็ตาม ถ้าแยกตัวเหนี่ยวนำในรูปที่ 4.5 ออกเป็น 2 ตัวดังรูปที่ 4.11 เราจะสามารถทำให้มุมนำกระแสในแต่ละข้างสูงถึง 360° ได้ นอกจากนี้การจัดเรียงแบบนี้ยังทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์น้อยกว่าในรูปที่ 4.5 แต่การสูญเสีย (power losses) จะสูงขึ้น เนื่องจากกระแสไหลวนระหว่างสองข้าง



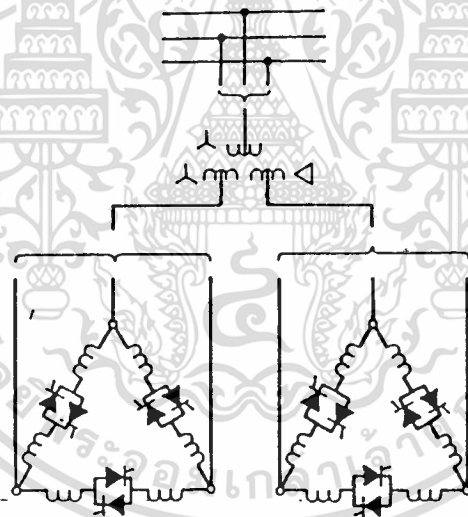
รูปที่ 4.10 ทีซีอาร์ 3 เฟสที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ และมีการแยก รีแอคเตอร์ ของแต่ละเฟสออกเป็น 2 ส่วน เพื่อให้ตัวควบคุมแบบใช้ไทรสเตอร์ (thyristor controller, ไทรสเตอร์ควบคุม) สามารถทำงานได้แม้ว่าจะเกิดรีแอคเตอร์ฟอลท์



รูปที่ 4.11 ทีซีอาร์ที่มีมุมช่วงนำกระแสในแต่ละขามากกว่า 180° เพื่อลดกระแสฮาร์โมนิกส์

บางครั้ง กระแสฮาร์โมนิกของ ทีซีอาร์ จะถูกจำกัดโดยฟิลเตอร์ (รูปที่ 4.10) กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือในการกำจัดฮาร์โมนิกที่ 5 และที่ 7 ทำโดยการแยก ทีซีอาร์ออกเป็น 2 ส่วน โดยป้อนจากด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงลดแรงดัน 2 ชุด ชุดหนึ่งต่อแบบสตาร์ และอีกชุดหนึ่งต่อ

แบบคลด้า (ดังแสดงในรูปที่ 4.12) ซึ่งจะทำให้เกิดมุมเลื่อนเฟส ระหว่างแรงดันและกระแสของ ทิศีอาร์ ทั้งสองเป็น 30° และเสมือนว่าสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่ 5 และที่ 7 ออกจากกระแสไลน์ ด้านปฐมภูมิได้ การต่อแบบนี้เรียกว่า "การจัดเรียงแบบ 12-พัลซ์" (12-pulse arrangement) เพราะว่ามีกรตริกขาเททของไทรสเตอร์ 12 ตัวใน 1 คาบ เทคนิคเฟสมัลติพลิเคชัน แบบนี้จะใช้ใน เอชวีดีซี เรกติไฟทรานฟอร์เมอร์ เพื่อกำจัดฮาร์โมนิกและเกี่ยวข้องกับ โพลีเฟสแซททูเรทรีแอกเตอร์ คอมเพนเซเตอร์ของ คอมเพนเซเตอร์ แบบความถี่มัลติฟลายเออร์ เนื่องจากมี 12-พัลซ์เกิดขึ้น ดังนั้นฮาร์โมนิกส์ที่ต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นคือฮาร์โมนิกส์ที่ 11 และที่ 13 นอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้โดยไม่ต้องมี ฟิลเตอร์ กรองฮาร์โมนิกส์ที่ 5 และที่ 7 ซึ่งมีผลดีถ้าโรแนนซ์ของระบบเกิดขึ้นที่ความถี่ใกล้เคียงความถี่ค่านี สำหรับฮาร์โมนิกส์ลำดับสูงกว่าค่านีสามารถใช้แค่ตัวเก็บประจุธรรมดาที่เพียงพอแล้ว โดยต่อเข้ากับด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงลดแรงดัน หรืออาจจะใช้ไฮพาสฟิลเตอร์ ก็ได้ ส่วนเรื่องการก่อกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ภายใต้เงื่อนไขไม่สมดุล (unbalanced conditions) จะคล้ายคลึงกับการจัดเรียงแบบ 6 พัลซ์ (ดังในรูปที่ 4.10)



รูปที่ 4.12 การจัดเรียง ทิศีอาร์ เป็นแบบ 12-พัลซ์ โดยใช้หม้อแปลงที่มีขดลวดทุติยภูมิ 2 ชุด

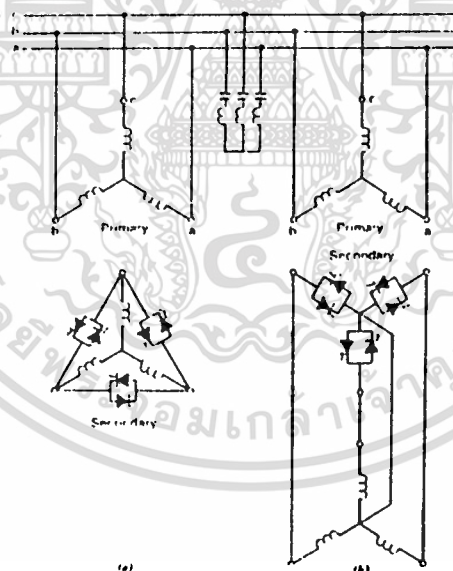
ในการใช้ 6-พัลซ์ และ 12-พัลซ์ ทิศีอาร์คอมเพนเซเตอร์ จะต้องพิจารณาว่าต้องการฟิเตอร์ หรือไม่ และมีการตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response) เป็นอย่างไร โดยคำนึงถึงความเป็นไปได้ของการเกิดสภาวะไม่สมดุล นอกจากนี้ส่วนชดเชย จะต้องสามารถกำจัดฮาร์โมนิกที่เกิดจากอิทธิพลของ ชุดคาปาซิเตอร์ และแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้า

ข้างเคียง โดยจะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณ และบางครั้งจะต้องครอบคลุมไปถึง ส่วนต่อเชื่อมระบบไฟฟ้าใหญ่ๆ (a large portion of the interconnected power system) ด้วย

นอกจากที่กล่าวมาแล้ว การต่อเชื่อมแบบ 12-พัลซ์ ยังมีข้อดีอีกคือถ้าเครื่องอันใดเสีย ไป อีกอันที่เหลือสามารถทำงานต่อไปได้ตามปกติ แต่มีข้อจำกัดคือระบบควบคุมจะต้องทำให้มุม ระหว่าง ทีซีอาร์ 2 ชุดเป็น 30° และจะต้องออกแบบให้มั่นใจได้ว่าสามารถกำจัด ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นได้ บางครั้งเราอาจออกแบบให้ 12-พัลซ์ ทีซีอาร์ ใช้หม้อแปลงแยกกัน 2 ชุด แทนหม้อแปลง 1 ตัวที่มีขดลวดทุกขุมมี 2 ขดได้

4.2.4 ไทริสเตอร์คอนโทรลทรานฟอร์มเมอร์

ทีซีอาร์ สามารถปรับปรุงเป็น ไทริสเตอร์คอนโทรลทรานฟอร์มเมอร์ (TCT , ดังรูป ที่(4.13)โดยแทนหม้อแปลงลดแรงดันแยกกันและรีแอคเตอร์เชิงเส้นด้วยหม้อแปลงที่ออกแบบให้มี ค่าลิกเกจ รีแอคแตนซ์ สูงๆโดยการใช้แกนที่มีช่องอากาศ (gapped core) และขดลวดทุกขุมจะถูกลัดวงจรผ่าน ส่วนไทริสเตอร์ และหม้อแปลงนี้จะ เป็นแบบที่ใช้หม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัว



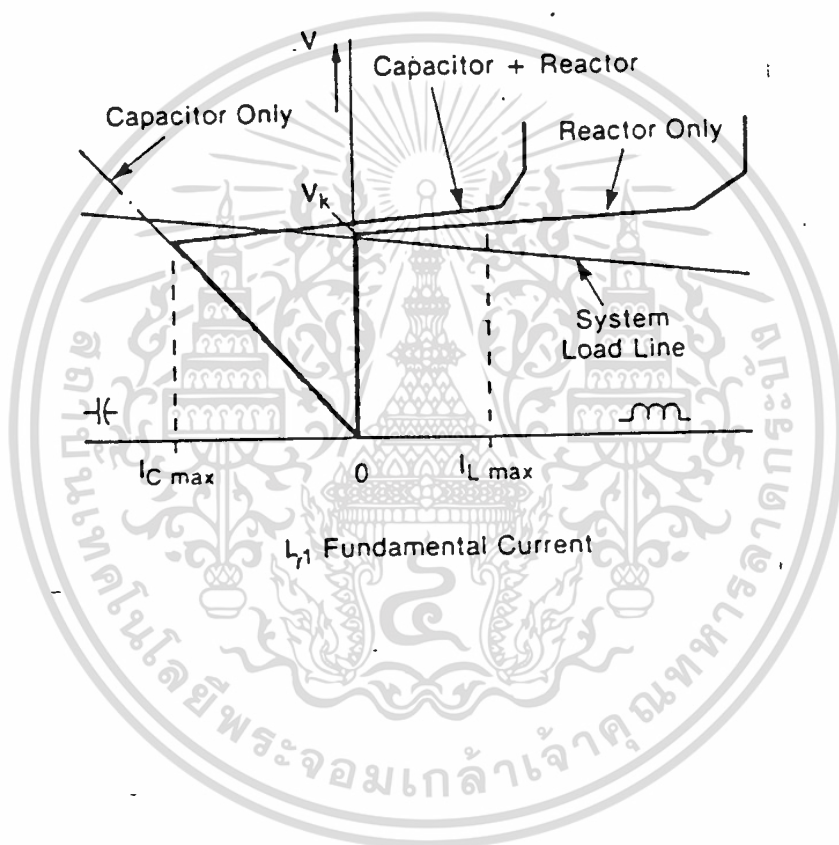
รูปที่ 4.13 การเรียงสลับกันของไทริสเตอร์คอนโทรลทรานฟอร์มเมอร์คอมเพนเซเตอร์

- รีแอคเตอร์ ที่ต่อกันแบบสตาร์ และไทริสเตอร์ควบคุม (thyristor controller) ที่ต่อแบบ เดลต้า
- รีแอคเตอร์ และไทริสเตอร์ควบคุมที่ต่อกันแบบสตาร์ (ใช้ในระบบ 3 เฟส 4 สาย)

มาต่อเป็นหม้อแปลง 3 เฟส ด้วยการต่อตามรูปที่ 4.13 จะไม่มีบัสทุติยภูมิ (secondary bus) และ คาปาซิเตอร์ขนานจะต้องต่อกับแรงดันปฐมภูมิ เว้นแต่จะหาหม้อแปลงลดแรงดันแยกกันมาใช้ ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหล สูงๆนี้จะช่วยป้องกันหม้อแปลงจากการลัดวงจรขณะเกิด ฟลด์ทางด้านทุติยภูมิ เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจำนวนมากและความเป็นเชิงเส้นของ ทีซีที ทำให้มันสามารถทนต่อระบบที่รับ (ดึง) กำลังไฟฟ้าเสมือนเกินพิกัดของมัน (โหลดที่ lagging เกินที่มันจะแก้ได้) ได้

4.2.5 ทีซีอาร์กับชั้นคาปาซิเตอร์(The TCR with Shunt Capacitors)

สิ่งสำคัญที่ต้องทราบคือกระแส ทีซีอาร์ (กระแส compensate) สามารถปรับค่าได้ อย่างต่อเนื่อง (linear , ไม่เป็นขั้นๆ) จากศูนย์จนถึงค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อนำกระแสเต็มคลื่น (full conduction) และกระแสนี้จะล่าหลัง (lagging) อยู่เสมอ เนื่องจากรับกำลังไฟฟ้าเสมือน อย่างไรก็ตาม ส่วนชดเชย ทีซีอาร์ สามารถชดเชยโดยคาปาซิเตอร์ขนาน ดังนั้นตัวประกอบกำลังรวมจึงเป็น นำหน้า และจะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบภายนอก ถ้าเพิ่มกระแสคาปาซิเตอร์ เข้าไปในกระแส ทีซีอาร์ ดังรูปที่ 4.8 จะทำให้กราฟลักษณะการควบคุม (control characteristic) เข้าไปสู่ควอร์นต์ที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ในระบบ 3 เฟสส่วนใหญ่มักจะต่อคาปาซิเตอร์ แบบ wye (ดังรูปที่ 4.10) กระแสในรูปที่ 4.14 จะเป็นพินดามีนทอลพัลซิทีฟซีเควันคอมพัวเน้น และถ้ามันอยู่ในช่วงระหว่าง I_{Cmax} กับ I_{Lmax} ลักษณะการควบคุมจะเป็นไปตามสมการที่ 4.6 อย่างไรก็ตามถ้าโวลเตจเรกูเรเตอร์เกิน ไม่เปลี่ยนแปลงความชันของความเหนี่ยวนำ X_s จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าคาปาซิเตอร์



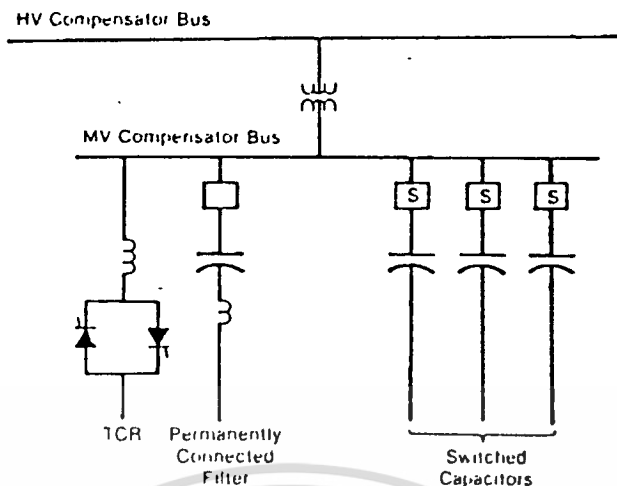
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของ ทีซีอาร์(TCR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไป คาปาซิเตอร์ขนาน มักจะแบ่งตัวเก็บประจุออกเป็นกลุ่ม 3 เฟสมากกว่า 1 กลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มจะแบ่งแยกกันโดยใช้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ดัดดอวเจอร์ กลุ่มตัวเก็บประจุสามารถปรับค่าความถี่โดยต่อ ตัวเหนี่ยวนำ เล็กๆอนุกรมเข้าไปในแต่ละเฟส ซึ่งจะช่วยกรองกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจาก ทีซีอาร์และป้องกันฮาร์โมนิกจากระบบอื่น ทางเลือกที่เป็นไปได้ทางหนึ่งคือให้มีกลุ่มที่ปรับความถี่ให้เป็นความถี่ฮาร์โมนิกที่ 5 และที่ 7 และจัดให้กลุ่มอื่นเป็นฟิลเตอร์ความถี่สูงผ่านแต่การต่อตัวเก็บประจุเป็นฟิลเตอร์จะต้องพิจารณาถึงการเกิดรีโซแนนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่จุดต่อด้วย

การใช้งานส่วนชดเชยจำเป็นต้องขยายการทำงานทั้งในช่วงล้าหลังและนำหน้า TCR ที่ต่อเข้ากับคาปาซิเตอร์แบบอยู่กับที่ไม่มีทางที่จะมีกระแสล้าหลัง (lagging current) นอกเสียจากกำลังไฟฟ้าเสมือนของ ทีซีอาร์ จะมีค่าเกินพิกัดของตัวเก็บประจุ พิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ส่วนชดเชย สามารถจ่ายได้จะเท่ากับผลต่างระหว่างพิกัดของ ทีซีอาร์ กับตัวเก็บประจุ ในกรณีที่พิกัดความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนของ ทีซีอาร์ มากเกินไป (เช่น การนำไปใช้งานในระบบสายส่งที่ต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนหลายร้อย MVA_r) ทำให้กำลังไฟฟ้าเสมือนรวมเป็น lagging และกระแส ปริมาณมากไหลวนอยู่ระหว่างทีซีอาร์ และตัวเก็บประจุ โดยไม่ได้ใช้ประโยชน์ใดๆเลยในระบบไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ตัวเก็บประจุจะถูกแบ่งเป็นกลุ่มย่อย เพื่อที่จะสามารถปรับคิกรี ของคาร์ปาซิทีฟไบอัส ในกราฟคุณลักษณะแรงดัน/กระแสได้ ซึ่งถ้าทำแล้วเราสามารถ ใช้ ทีซีอาร์ ที่มีขนาดเล็กลงได้ แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.15 ซึ่งมีการแบ่งชั้นคาร์ปาซิเตอร์ออกเป็น 3 กลุ่ม และจะต้องมีตัวควบคุมทีซีอาร์ เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมตามจำนวนของตัวเก็บประจุที่มาต่อ และต้องออกแบบให้ครอบคลุมกราฟคุณลักษณะของแรงดัน/กระแสทั้งหมดอย่างต่อเนื่อง เมื่อกลุ่มตัวเก็บประจุถูกตัดต่อ มุมช่วงนำกระแสก็จะถูกปรับพร้อมด้วยสัญญาณอ้างอิงอื่น ดังนั้นเมื่อกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นหรือลดลง ก็จะถูกทำให้สมดุลโดยการเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนแบบเหนี่ยวนำของทีซีอาร์ในปริมาณเดียวกัน ภายหลังจากนั้นมุมช่วงนำกระแสก็จะถูกปรับอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของระบบ จนกว่าจะมีการสับสวิชต์ตัวเก็บประจุอีก

การปฏิบัติงานของทีซีอาร์และคาปาซิเตอร์ขนานแบบสับสวิชต์ที่ต่อกันแบบ hybrid จะขึ้นอยู่กับเทคนิควิธีการสวิตช์ตัวเก็บประจุ วิธีการสวิตช์ที่ใช้ค่าใช้จ่ายถูกที่สุด คือ การใช้ เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบธรรมดา ซึ่งถ้าการปฏิบัติงานมีการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะแรงดัน/กระแสขึ้นๆลงๆ จะทำให้มีการสวิตช์บ่อยๆซึ่งทำให้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานหนัก ต้องซ่อมแซมบ่อย



รูปที่ 4.15 คอมเพนเซเตอร์แบบสายบริงที่มีการสวิตช์ตัวต่อตัวเก็บประจุและปรับ ที่ซีอาร์ สวิตช์เอส (s) อาจเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบกลไกหรือเป็นไครสเตอร์

และเสียบเร็ว นอกจากนี้การนำไปใช้งานในระบบสายส่ง ถ้าระบบเกิดฟอลต์ อย่างรุนแรง จะทำให้มีการสับสวิตช์เข้าออกซ้ำๆ ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุและ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ทำงานหนักมาก

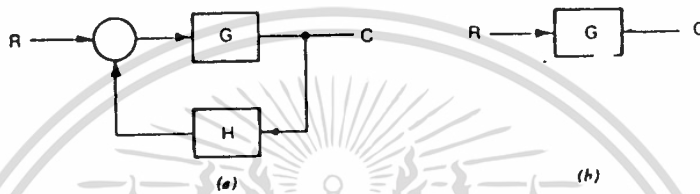
ปัญหานี้ ถ้าเกิดกับ ส่วนชดเชย ที่ใช้ ไครสเตอร์ ในการสวิตช์ตัวเก็บประจุแทน เซอร์กิตเบรกเกอร์ จะไม่ส่งผลกระทบมากนัก เนื่องจากไครสเตอร์สามารถสวิตช์ตัดต่อได้อย่างไม่จำกัดและสามารถสวิตช์ได้ด้วยเวลาที่แน่นอน จึงช่วยลดความรุนแรงในการสวิตช์เมื่อเกิดปัญหานี้ขึ้น ส่วนมากจำนวนกลุ่ม ของคาปาซิเตอร์ ในระบบสายส่งมักจะไม่เกิน 4 กลุ่ม

4.2.7 ลักษณะอื่นๆของตัวชดเชย ที่ซีอาร์

ความเร็วในการตอบสนอง

ในหัวข้อ 4.2.1 แสดงถึงมุมของการเหนี่ยวนำในเฟสใดๆของ ที่ซีอาร์ สามารถที่จะเปลี่ยนได้โดยระหว่างครึ่งไซเคิล ของความถี่ที่ป้อนเข้าไป ซึ่งกำหนดว่า σ จะเหลือน้อยกว่า 180° สุดท้ายผลตอบสนองที่รวดเร็วจะถูกต้องการประยุกต์ระบบแรงดันสูง เมื่อเสถียรภาพและความถูกต้องของระบบควบคุมมีความสำคัญมากกว่า ดังนั้นเวลาในการตอบสนองของที่ซีอาร์ ซึ่งใส่ตัวเก็บประจุสามารถจะเป็น 2 ไซเคิล เล็กๆของความถี่กำลัง สำหรับการจ่ายศักดาสูงสุดในการภาค

เตาเผา จะใช้ผลตอบสนองที่รวดเร็วเป็นสิ่งสำคัญ และผลตอบสนองทางธรรมชาติของทั้ง ทีซีอาร์ และ ทีเอสซี ของการชดเชย



รูป 4.16 การควบคุมแบบรวมการควบคุมแบบวงปิดและวงเปิดเข้าด้วยกัน

การควบคุมเฟสที่เป็นอิสระ

มันเป็นลักษณะประจำตัวของทีซีอาร์ ที่สำคัญซึ่งสามารถถูกควบคุม 3 เฟส ที่อิสระต่อกันและทีซีอาร์ สามารถทำให้เฟสสมมูลได้ดังในบทที่ 2 มีเพียงกำลังรีแอ็คเตอร์ที่เป็นไปได้ ความถูกต้องของเฟสสมมูลจะไม่ดีทีเดียว ตัวเก็บประจุขนาน ซึ่งใช้ทีซีอาร์ จะไม่จำกัดความสามารถในการสมมูลเฟส ในโครงข่ายชดเชยอาจมีความต้องการทำทุกอย่างทั้งการเหนี่ยวนำและการเก็บประจุนอกจากนี้ อิมพีแดนซ์ ในแต่ละเฟสและความไม่สมดุลของทีซีอาร์ อาจจะทำให้อิทธิพลของฮาร์โมนิกที่มากกว่าภายในเงื่อนไขที่สมมูล การเพิ่มตัวกรอง (Filter) เป็นสิ่งที่จำเป็นโดยฮาร์โมนิกจะปรากฏในกระแส ไลน์

ผลตอบสนองของสัปดาห์เงินและสัปดาห์ต่ำ

สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งของตัวชดเชยแบบสถิต (Static Compensator) คือ การแสดงพฤติกรรมภายใต้เงื่อนไขของสัปดาห์เงินที่สูงเกินไปและต่ำเกินไป การอ้างอิงสถานะคงตัว V/L_1 ในรูปที่ 3.8 ถ้าสัปดาห์เงินของระบบเพิ่มขึ้น มุมเหนี่ยวนำจะขึ้นสู่ค่าสูงสุดตามกันการควบคุมจะถูกจำกัดและกระแส มูลฐาน จะสัมพันธ์กับทีซีอาร์ ซึ่งปกติพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำ เป็นเชิงเส้น รีแอ็ค

แดนซ์ ของ ทีซีอาร์ จะมากขึ้นไปที่จะจำกัดการเพิ่มศักดาของระบบภายใต้เงื่อนไขสำคัญสุดท้ายนี้และมีความจำเป็นในการที่จะเริ่มลดมุมเหนียวน่าเพื่อป้องกันไทรสเตอร์จากความร้อนที่รอยต่อซึ่งสาเหตุมาจากกระแสที่สูงเข้ามาเกี่ยวข้อง

การควบคุมไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีผลจากอุณหภูมิ วงจรไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะทำให้เกิดอุณหภูมิที่รอยต่อที่สูงซึ่งเกิดจากศักดาที่สูง การกำจัดกระแสของการควบคุมถูกแสดงในรูปที่ 4.8 หม้อแปลงแปลงลงจะเริ่มอ้อมตัวและกระแสแมกนีโตซิ่ง จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ศักดาสูงๆ แต่มันจะมีตำแหน่งซึ่งเป็นผลในการช่วยยึดศกดาให้ลดลงเหมือนกับการประยุกต์ใน ทีซีที ศักดาในการอ้อมตัวของหม้อแปลงจะไม่ถูกตั้งให้ดำเนินไปมันจะมีปัญหาเกี่ยวกับเหล็กเกิดขึ้น ในระดับแรงดันที่สูงการวัดและการป้องกันในการที่จะใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์และอุปกรณ์ป้องกันเสร็จในการเกิด โหลดเกิน ขนาดใหญ่ ในช่วงการควบคุมปกติของ ทีซีอาร์ จะเป็นไปได้

เมื่อศักดาของระบบตกลงในช่วงของการควบคุมของตัวชดเชย มันมีพฤติกรรมเหมือนกับการใส่ตัวเก็บประจุ ไทรสเตอร์จะเป็น “เฟสออฟ” ถ้าตัวเก็บประจุแบบขนานขาดไปหรือปิดสวิทช์ ทีซีที จะไม่มีผล มันเป็นพฤติกรรมซึ่งศักดาสามารถกลับคืนหลังจากเคลียฟอลด์ไปสู่ค่าเริ่มต้น และในกรณีของ ทีซีอาร์จะเป็นตำแหน่งในการจำกัดศักดาเกิน มันจะถูกติดตั้งในจุดประสงค์นี้สำหรับการรีด และ แร็ก ของตัวชดเชย จะถูกใช้แคปซิทอร์เซอร์วิง และ ทีซีอาร์ควบคุมในการป้องกันกลับสัญญาณ

กำลังสูญเสีย

การสูญเสียกำลังโดยตัวชดเชยเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา เพราะว่าพลังงานมีราคาสูงค่าหลักของการสูญเสียสามารถถูกเปรียบเทียบกับราคาเมื่อมีตัวชดเชย ตัวชดเชยทีซีอาร์ ซึ่งใส่ชั้น ตัวเก็บประจุจะมีความสูญเสียเพิ่มขึ้นกับการเหนียวน่าในทีซีอาร์ ซึ่งแสดงใน รูปที่ 4.22 เหมือนเป็นเปอร์เซ็นต์ของอัตรากำลัง ตัวเหนียวน่า แบบตัวเก็บประจุมันรวมไปถึงความสูญเสียกับความต้านทานในรีแอ็กเตอร์ , การเหนียวน่า , สวิตซิ่ง , และความสูญเสียอื่นในระบบควบคุมไทรสเตอร์ (หม้อแปลงและความสูญเสียใน auxiliary ไม่ถูกนำมารวมใน รูปที่ 4.22) ความสูญเสียจะลดลงเมื่อเป็นกำลังรีแอ็กทีฟที่รีดคั้ง และความสูญเสียจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังเป็น รีแอ็กทีฟที่เร็กกิ้งแนวทางซึ่งตรงกันข้ามถูกทำได้โดยตัวชดเชยฮาบริจ เมื่อตัวเก็บประจุเป็นกลุ่มของสวิทช์ และขนาดเล็กกว่า ทีซีอาร์ ความสูญเสียสำหรับชนิดของตัวชดเชยเป็นไปตาม รูปที่ 4.23 ตัวอย่างคือตัวเก็บประจุไทรสเตอร์สวิทช์ ซึ่งตัวเก็บประจุใช้สวิทช์ทางกล ลักษณะจะเหมือนแบบตัวอย่างทั่วไป แต่ความสูญเสียในตัวเก็บประจุ (leading) จะลดลงมาก

บทที่ 5

ตัวกรองฮาร์โมนิกส์

5.1. การคำนวณหาค่าอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวกรองฮาร์โมนิก

ฮาร์โมนิกมีผลกับอุปกรณ์ต่างๆดังต่อไปนี้เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า (transformer), อุปกรณ์ตัดต่อวงจรไฟฟ้า (switchgear) คาปาซิเตอร์ (Capacitor) , ฟิวส์ (Fuse) และ รีเลย์ป้องกัน (protective relay) ซึ่งลักษณะต่างดังนี้

- สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ (motor) อุปกรณ์ตัดต่อวงจรไฟฟ้าอาจมีผลทำให้เกิดความสูญเสีย (losses) เพิ่มขึ้น และจะทำให้เกิดความร้อนซึ่งทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นด้วย

- สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) อาจจะทำให้เกิดการ ทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส (Subsynchronous speeds)

- สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) อาจจะทำให้การอินเตอร์รัป (interrupt) กระแสผิดพลาดได้

- สำหรับคาปาซิเตอร์ อาจเสื่อมสภาพก่อนกำหนดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเครียดที่เกิดขึ้นที่ฉนวน (dielectric Stress) และ ความร้อนที่เพิ่มขึ้น

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นตัวคอนเวอร์เตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลัง (electric power convertor) เป็นตัวที่ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส่วนใหญ่ในแบบอุตสาหกรรม ในการแก้ปัญหานั้นวิธีบางวิธีที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหาเนื่องจากการเกิดฮาร์โมนิกเช่น เฟสมัลติพิเคชัน (phase multiplication) ,ฮาร์โมนิกอินเจกชัน (harmonic injection) ชันฟิลเตอร์ (Shunt filters) และใช้เงื่อนไขการควบคุมการปฏิบัติงานของระบบวิธี ชันฟิลเตอร์ นั้นถูกพัฒนาให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดฮาร์โมนิกซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องการชดเชย รีเอ็กทีฟเพาเวอร์ (reactive poer) ซึ่งต่อไปนี้จะเป็นการอธิบายถึงรูปแบบและการออกแบบ ชันฟิลเตอร์ที่ใช้ในการกรองฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

5.2 การออกแบบฟิลเตอร์ (Filter design)

การป้องกัน ฮาร์โมนิกที่เราไม่ต้องการอาจจะป้องกันโดยใช้วิธีใดวิธีหนึ่งในสองวิธีดังต่อไปนี้

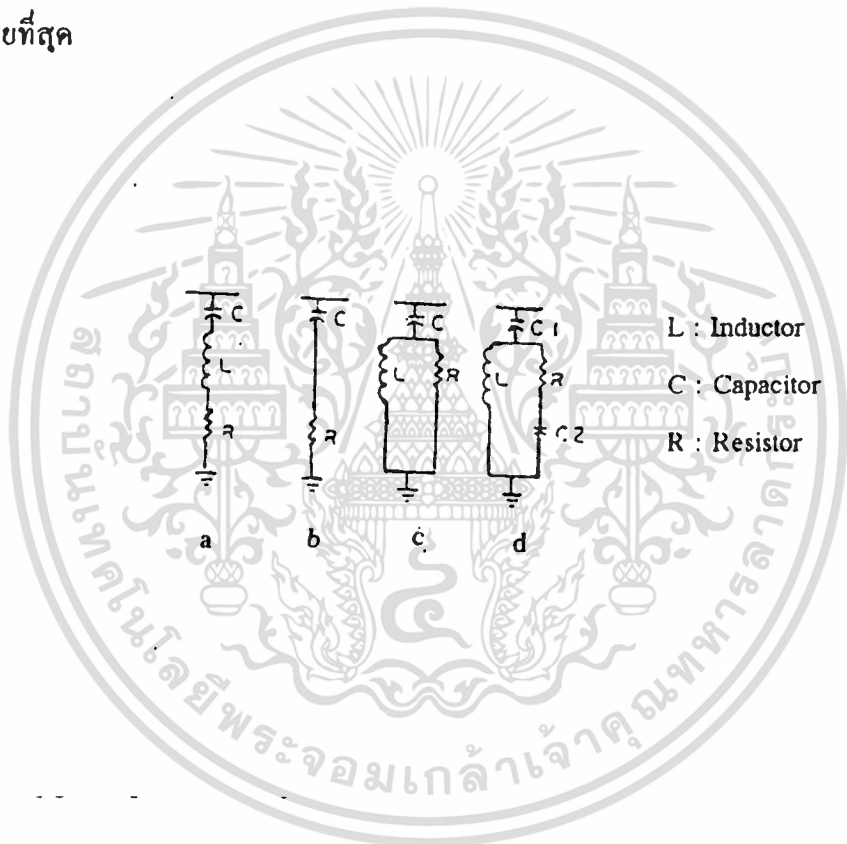
1. ใช้การต่ออนุกรมที่มีค่าความต้านทานสูงเพื่อกั้นฮาร์โมนิกเหล่านั้น

2. การลดฮาร์โมนิกส์โดยการใช้ส่วนของความต้านทานต่ำไปต่อขนาน

การใช้ฟิลเตอร์แบบอนุกรมจะต้องสามารถทนกระแสไหลลดเต็มพิกัดได้และจะต้องสามารถทนศักคของสายส่งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อแตกต่างระหว่าง ชั้นที่ฟิลเตอร์ (Shunt filter) กับซีรีส์ฟิลเตอร์ (Series Filter) คือ ชั้นที่ฟิลเตอร์จะรับกระแสเพียงเล็กน้อย แต่ซีรีส์ฟิลเตอร์จะต้องสามารถรับกระแสโหลดเต็มพิกัดได้และซีรีส์ฟิลเตอร์จะมีราคาสูงกว่าชั้นที่ฟิลเตอร์ และในทางปฏิบัติชั้นที่ฟิลเตอร์อาจจะเป็นตัวจ่าย รีเอ็กทีฟพาวเวอร์ (reactive power) ที่ความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) ส่วนใหญ่ในทางปฏิบัติในการนำฟิลเตอร์ไปใช้งานมักจะเลือกแบบชั้นที่ฟิลเตอร์ซึ่งชั้นที่ฟิลเตอร์นั้นสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทที่สำคัญได้แก่ ซิงเกิลเทินฟิลเตอร์ (single tuned filter) และแบบ ไฮพาสฟิลเตอร์ (high pass filter) ซึ่งทั้งสองแบบเป็นแบบที่ออกได้ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ต่าง ๆ น้อยที่สุด



รูปที่ 5.1 (a) Single tuned filter

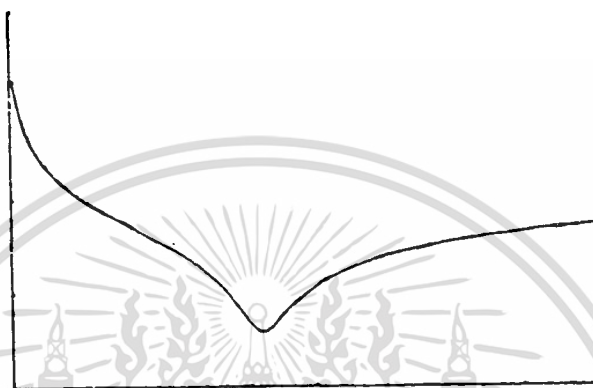
(b) First order high-pass filter

(c) Second order high-pass filter

(d) Third order high-pass filter

5.8. การออกแบบ ฟิลเตอร์ แบบ ไฮพาสฟิลเตอร์ (high pass filter)

ไฮพาสฟิลเตอร์ (high pass filter) ที่เรียกชื่อเช่นนี้เพราะมีลักษณะที่มีความต้านทานต่ำเหนือ ความถี่มุม (Corner frequency) ประเภทของความถี่ของไฮพาสฟิลเตอร์แสดงได้ดังรูป ฟิลเตอร์แบบนี้จะกรองฮาร์โมนิกส์ทั้งหมดที่ความถี่มุมหรือที่เหนือความถี่มุม



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะของความถี่ของไฮพาสฟิลเตอร์ (high-pass filter)

-สำหรับไฮพาสฟิลเตอร์ (high pass filter) หนึ่งตัวจะมีความถี่มุมค่าหนึ่งที่แสดงฮาร์โมนิกส์ที่ต่ำที่สุดซึ่งเป็นฮาร์โมนิกส์ที่ฟิลเตอร์ตัวนั้นที่จะกรอง

-สำหรับลำดับที่หนึ่ง (first order) นั้นจะมีค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ความถี่มุมฐานจึงไม่นิยมใช้

-สำหรับลำดับที่สอง (second order) เป็นฟิลเตอร์ที่ช่วยลดความสูญเสียที่ความถี่มุมฐานซึ่งเป็นฟิลเตอร์แบบที่นิยมใช้กัน

-สำหรับลำดับที่สาม (third order) นั้นมีความสามารถในการกรองฮาร์โมนิกส์ได้น้อยกว่าลำดับสอง

5.4. สมการแสดงค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ของ Second order high pass filter

สามารถกำหนดโดย

$$Z = (1/j\omega C) + [(1/R) + (1/j\omega L)]^{-1}$$

โดยที่ r คือความถี่ของแต่ละฟิลเตอร์ที่จะถูกจูน

ความถี่ที่ความถี่มุม (Corner frequency) กำหนดโดย

$$f = 1/2\pi(LC)^{1/2}$$

ค่า คอวลิตีแฟกเตอร์ (Quality Factor) : Q กำหนดโดย

$$Q = R/(L/C)^{1/2} = R/X_L = R/X_C$$

ค่าคักคาของคาปาซิเตอร์ กำหนดโดย

$$V_{cap} = [r^2 / (r^2 - 1)] * V_{yy}$$

ค่า r คือลำดับของฮาร์โมนิกส์ $r = 3, 5, 7, \dots$

V_{yy} คือค่าศักดาของระบบ

โดยที่ $r^2 = X_0 / X_1$

สำหรับ ไฮพาทพิลเตอร์ จะมีค่า Q อยู่ระหว่าง 0.5-2 สำหรับค่า Q เท่ากับ 2 พิลเตอร์จะทำงานได้เด่นชัดที่ความถี่มุม (Corner frequency) ระหว่างที่ความถี่สูงขึ้น ค่าความต้านทานของพิลเตอร์จะค่อนข้างคงที่ แต่สำหรับค่า Q ที่มีค่าต่ำ เช่น 0.5 ค่าของความถี่มุมจะเห็นได้ไม่เด่นชัดและเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้นค่าอิมพีแดนซ์จะไม่คงที่



บทที่ 6

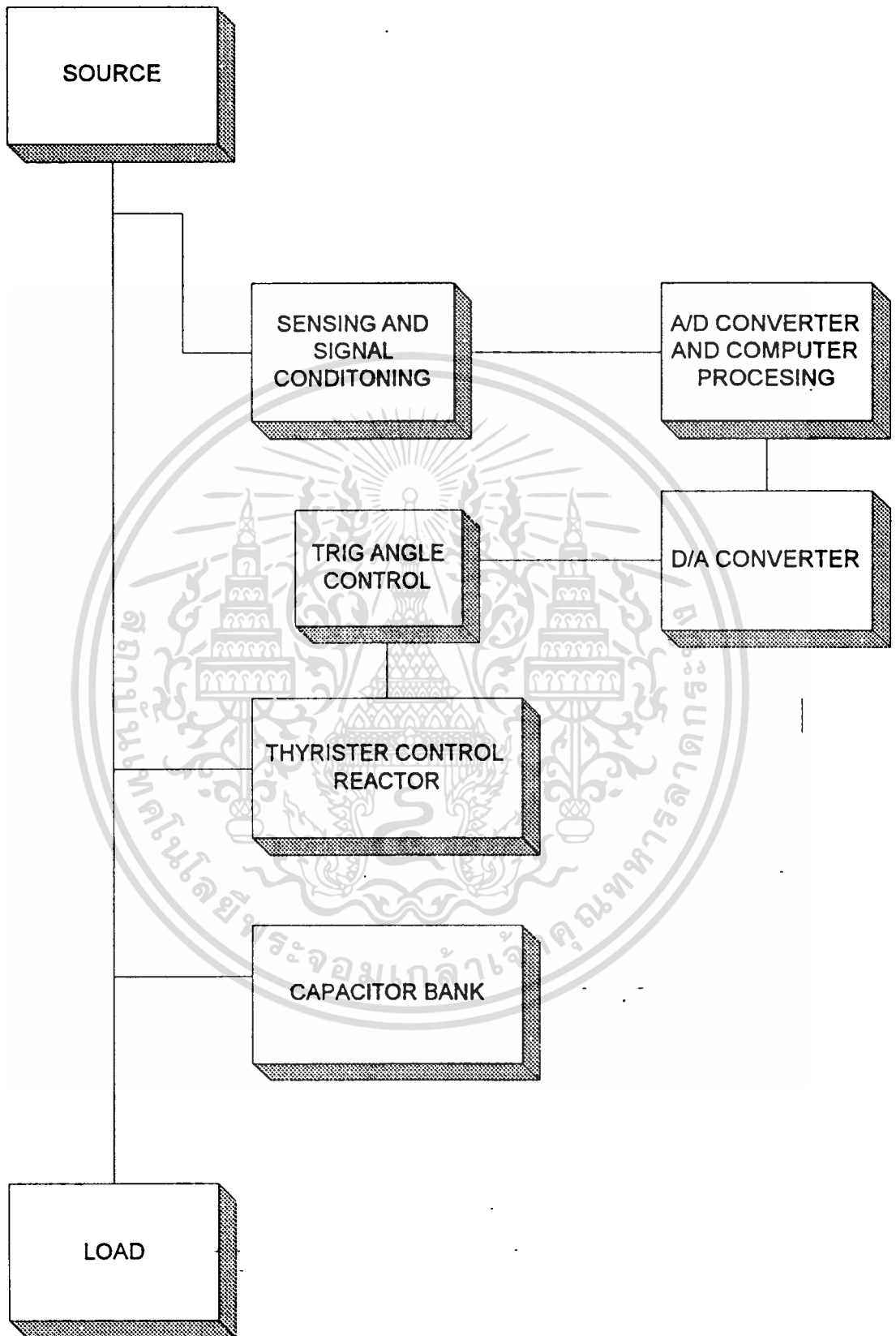
หลักการควบคุมชุดชุดเพอร์เอกทีฟเพาเวอร์

โครงสร้างของระบบ

ลักษณะโครงสร้างของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 6.2 จากรูปสามารถแยกระบบออกเป็นส่วนย่อยๆ ได้ดังต่อไปนี้

6.1 Sensing and Signal conditioning

การวัดกระแสและแรงดัน จะวัดที่ส่วนอินพุทเข้าสู่ระบบโดยกระแสจะทำการวัดผ่าน ซีทีความถี่สูง (สามารถรับความถี่ ได้ถึง 100KHz แล้วทำการผ่านวงจร แปลงกระแสเป็นแรงดัน ดังรูปที่ 6.1 แรงดันที่ได้ จะมีระดับแรงดัน ที่เหมาะสมสำหรับ การ์ด (A/D CARD) ได้ การแปลงสัญญาณ อานาลอก ขอบแรงดัน V_{ca} , I_a , I_b , I_c จะทำโดยการ์ด A/D PCL-818 ซึ่งเป็นการ์ด A/D ที่มีความละเอียด 12 bit โดยการใช้การแปลงแบบ ซักเซสซีฟ แอปพรอกซิเมชัน (successive approximation) การส่งถ่ายข้อมูล จากการ์ด สู่ เมมโมรี่ (memory) โดยจะการใช้การถ่ายโอนโดยใช้อินเตอร์รัพท์รoutines (Interrupt routine transfer)จากข้อมูลที่ รีจิสเตอร์ของ A/D (A/D register)

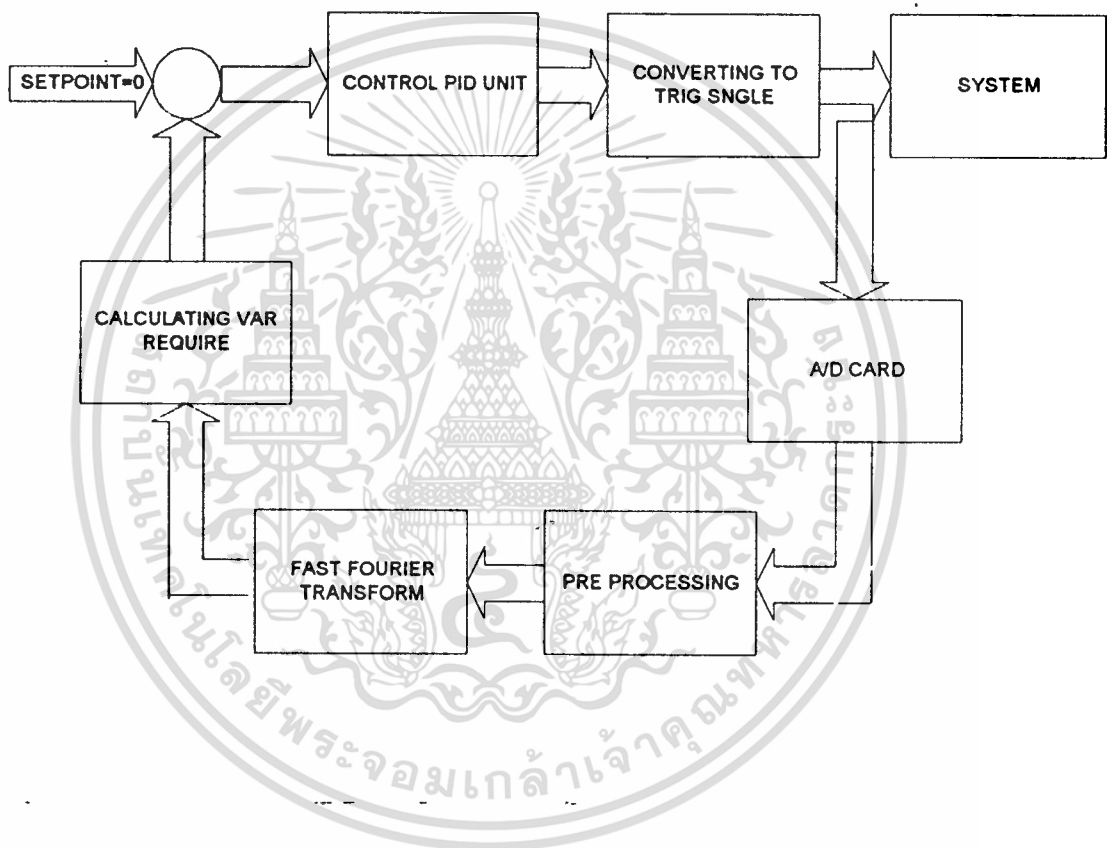


รูปที่ 6.1 แสดงระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การประมวลผลที่คอมพิวเตอร์ (COMPUTER PROCESING)

การประมวลผลของคอมพิวเตอร์จะสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

6.2.1 การคำนวณหารีแอกทีฟพาวเวอร์ที่ต้องการในแต่ละกิ่ง (branch)

จากบทที่ 2 ในสมการ 2.24, 2.25, 2.26 แสดงค่า

คอมเพนเซทีฟ ซัสเซพ

แตนซ์ (compensative susceptance) ได้ดังนี้

$$B_r^{ab} = -\frac{1}{3\sqrt{3}V} [\text{Im}I_{1(t)} + \text{Im}I_{2(t)} - \sqrt{3}\text{Re}I_{2(t)}]$$

$$B_r^{bc} = -\frac{1}{3\sqrt{3}V} [\text{Im}I_{1(t)} - 2\text{Im}I_{2(t)}]$$

$$B_r^{ca} = -\frac{1}{3\sqrt{3}V} [\text{Im}I_{1(t)} + \text{Im}I_{2(t)} + \sqrt{3}\text{Re}I_{2(t)}]$$

จากสมการข้างต้น นำ V^2 คูณตลอด เพื่อให้ได้ขนาดรีแอกทีฟพาวเวอร์
ที่ต้องชดเชยในแต่ละเฟสเป็น

$$Q_r^{ab} = -\frac{V}{3\sqrt{3}} [\text{Im}I_{1(t)} + \text{Im}I_{2(t)} - \sqrt{3}\text{Re}I_{2(t)}]$$

$$Q_r^{bc} = -\frac{V}{3\sqrt{3}} [\text{Im}I_{1(t)} - 2\text{Im}I_{2(t)}]$$

$$Q_r^{ca} = -\frac{V}{3\sqrt{3}} [\text{Im}I_{1(t)} + \text{Im}I_{2(t)} + \sqrt{3}\text{Re}I_{2(t)}]$$

โดยที่ $I_{1(t)}$ และ $I_{2(t)}$ สามารถหาได้จาก

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

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_a + hI_b + h^2I_c)$$

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_a + h^2I_b + hI_c)$$

เมื่อได้ขนาดของรีแอกทีฟพาวเวอร์ที่ต้องชดเชย ในแต่ละเฟส ก็นำเข้าส่วนป้อน
กลับหรือค่าขบวนการ (process value) ของชุดควบคุมแบบ พีไอดี (PID)

6.2.2 การควบคุมแบบ พีไอดี (PID)

การควบคุมแบบ พีไอดี เป็นการควบคุมที่ใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งเอาท์พุทที่ออกมา
จากส่วนควบคุม (controller) จะเปลี่ยนแปลงอย่างเรียบๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด
จากค่าเซ็ทพอยท์ (setpoint) ซึ่งระบบควบคุมแบบพีไอดี จะนำมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ิก ของ
scr ให้มีค่าความต้องการรีแอกทีฟพาวเวอร์ ต่ำที่สุด โดยจะปรับตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด
ระบบควบคุม พีไอดี จะประกอบไปด้วย

-Proportional control Mode

ลักษณะของโหมดนี้จะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$P = k_p E_p + P_0$$

โดยที่

K_p เป็นค่าคงที่แบบ proportional เป็นอัตราส่วนระหว่าง error กับ controller output

P_0 เป็นค่า controller output ที่ไม่มีข้อผิดพลาด

-Integral control Mode

ลักษณะของโหมดนี้จะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$P(t) = K_I \int_0^t E_p(t) dt + P(0)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่า ค่า controller output จะขึ้นอยู่กับ ความผิดพลาดจาก เซ็ทพอยท์ จากการคำนวณครั้งก่อนๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ค่า K_I ค่ามากๆจะทำให้ error น้อยๆ จะทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ ค่า output value มีการเปลี่ยนแปลงมาก

-Derivative control Mode

ลักษณะของโหมดนี้จะสามารถแทนได้ด้วยสมการ

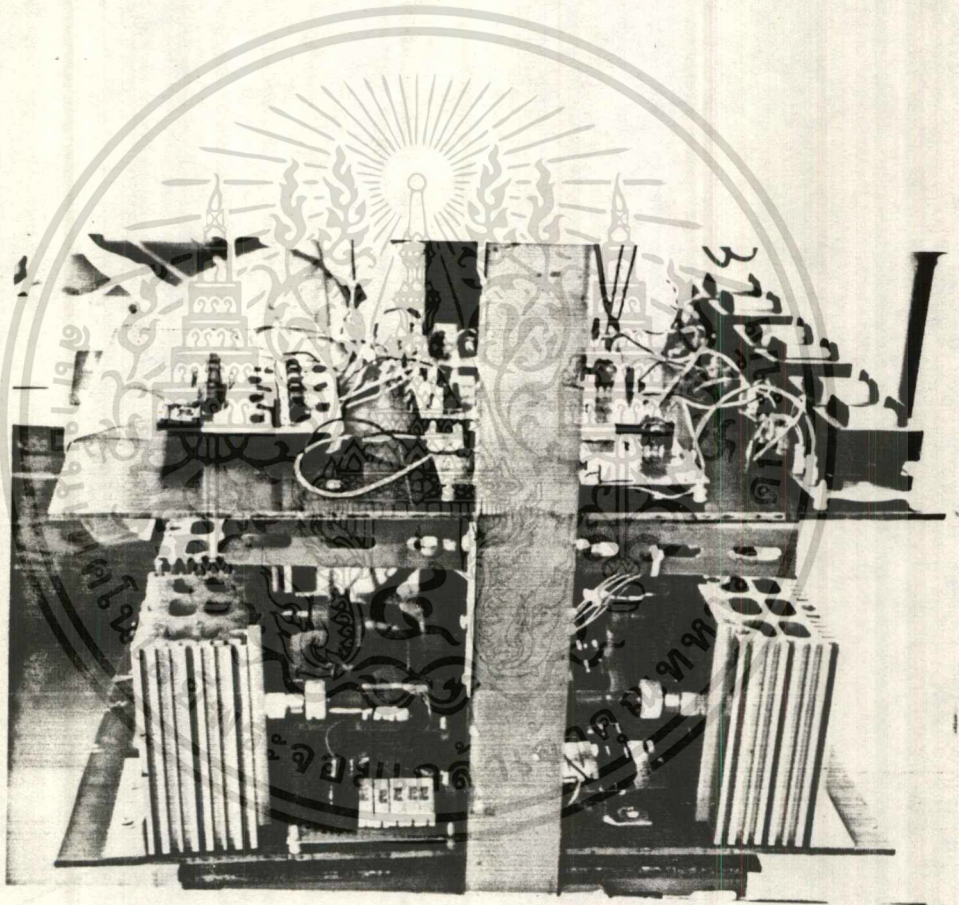
$$P = K_d \frac{dE_p}{dt} + P_0$$

ค่า K_d หรือ ค่า derivative gain ส่วนใหญ่จะบอกเป็นวินาที

ค่าที่ ระบบควบคุมแบบ พีไอดี จะมีเอ้าท์พุทออกมาเป็น 0-100% จากนั้นจึงแปลง เป็นมุม หรือ 90-180 องศา การตอบสนองของระบบจะเร็วถ้า ค่าเกน(gain) ที่หาได้จากค่า proportional band (gain = 100/PB) แต่การเพิ่มเกน มากจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ เพราะ ฉะนั้น การปรับค่า P ,I ,D จะต้องทำการปรับที่ค่าที่เหมาะสมกับระบบด้วย

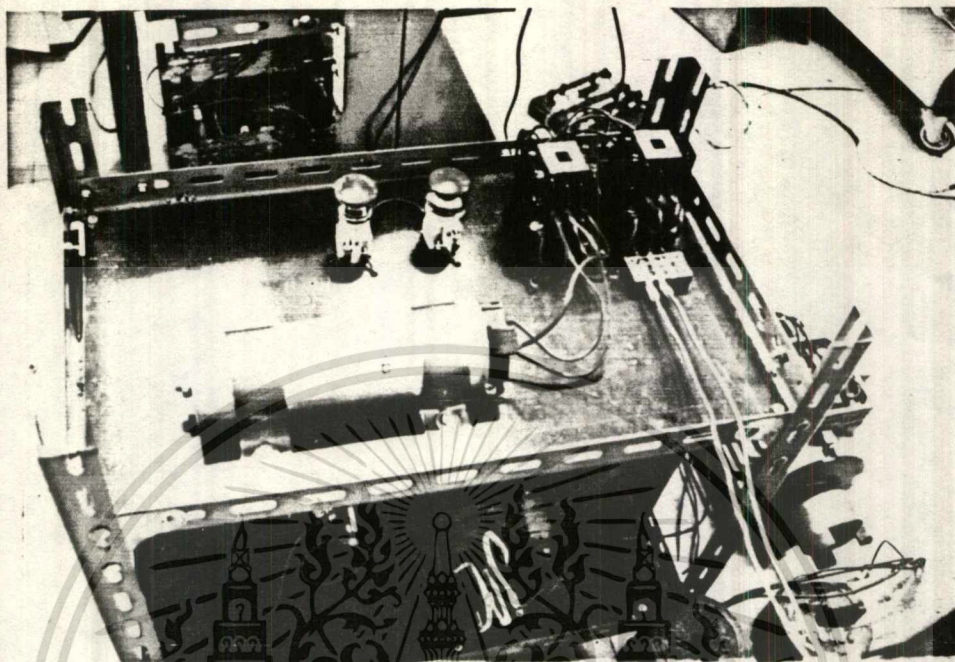
บทที่ 7

การทดสอบและผลการทดลอง

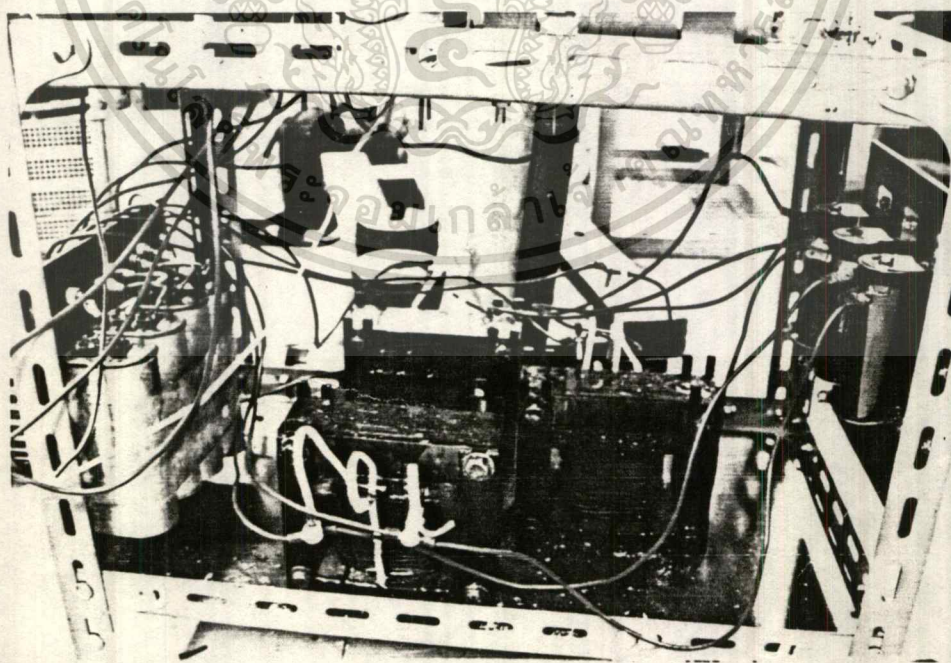


รูปที่ 7.1 แสดงชุดทดลองส่วนที่เป็นวงจร ทิธีอาร์ (TCR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

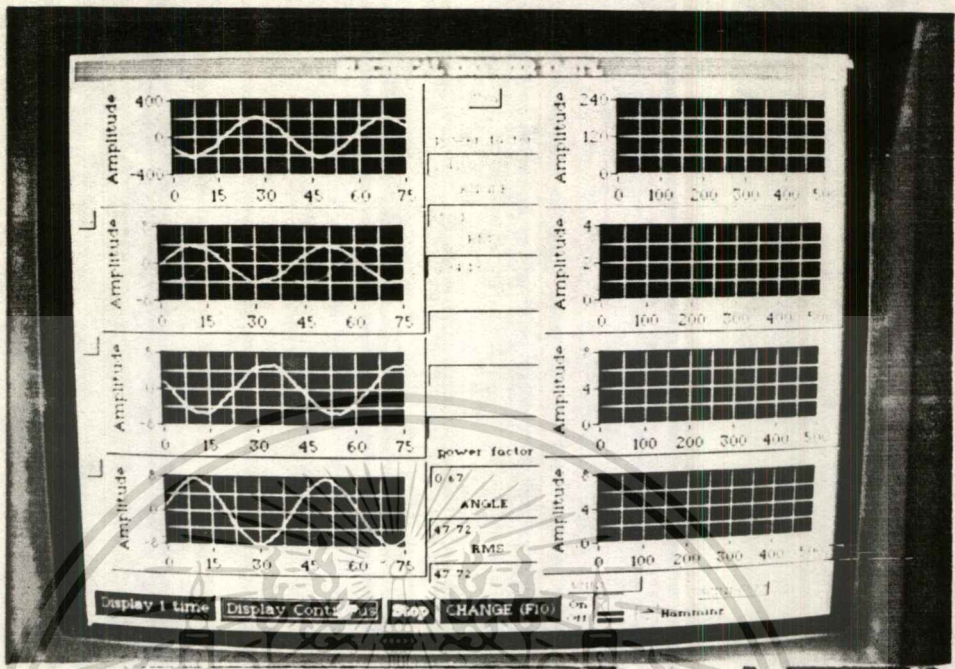


รูปที่ 7.2 แสดงกาปาซิเตอร์แบงก์

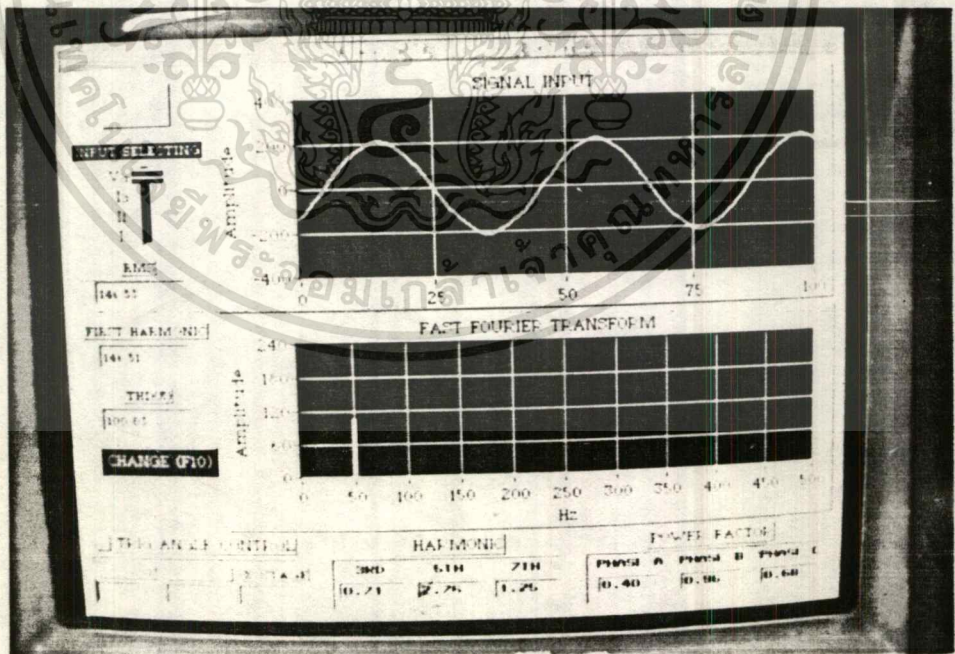


รูปที่ 7.3 แสดงส่วนของฮาร์โมนิกส์ฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

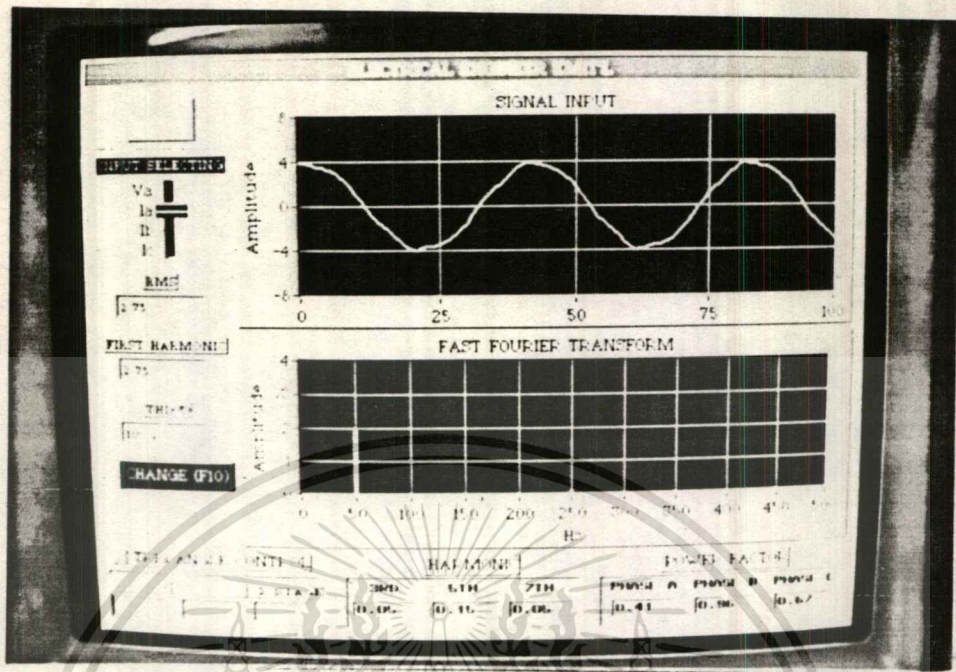


รูปที่ 7.4 แสดงผลขณะใส่โหลดหลอดไฟและ โหลดมอเตอร์เมื่อ ไม่มีการใช้เครื่อง

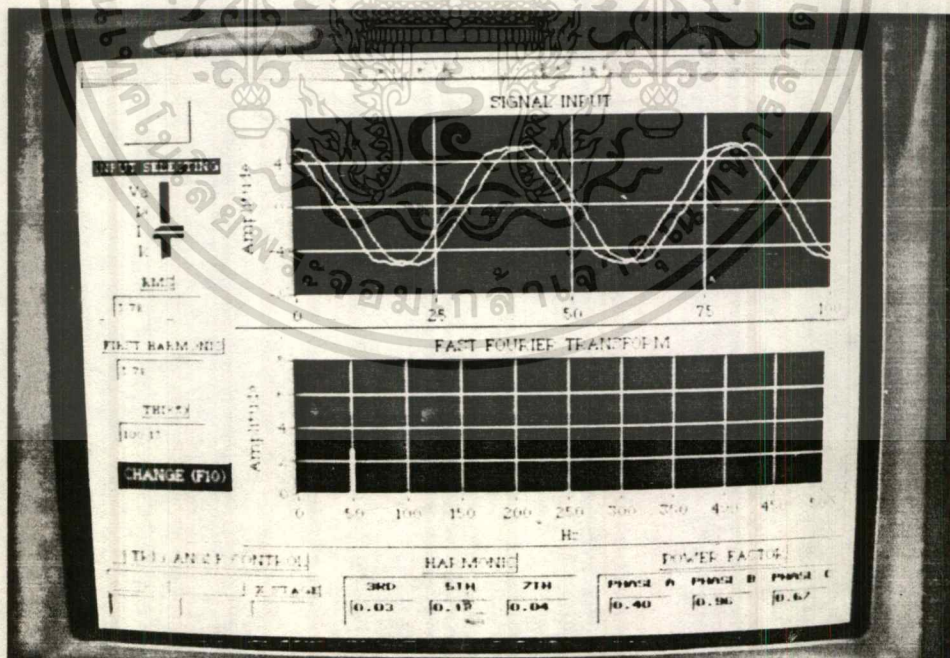


รูปที่ 7.5 แสดงลักษณะของแรงดันเมื่อโหลดเป็นมอเตอร์และหลอดไฟก่อนใช้เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

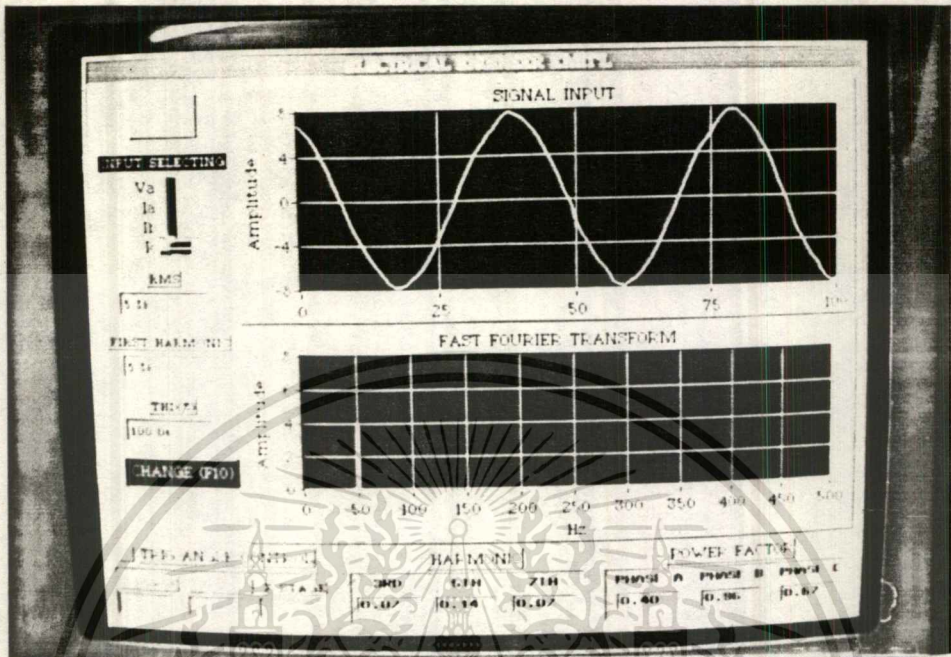


รูปที่ 7.6 แสดงลักษณะของกระแสในเฟส a เมื่อโหลดเป็นมอเตอร์และโหลดไฟก่อนใช้เครื่อง

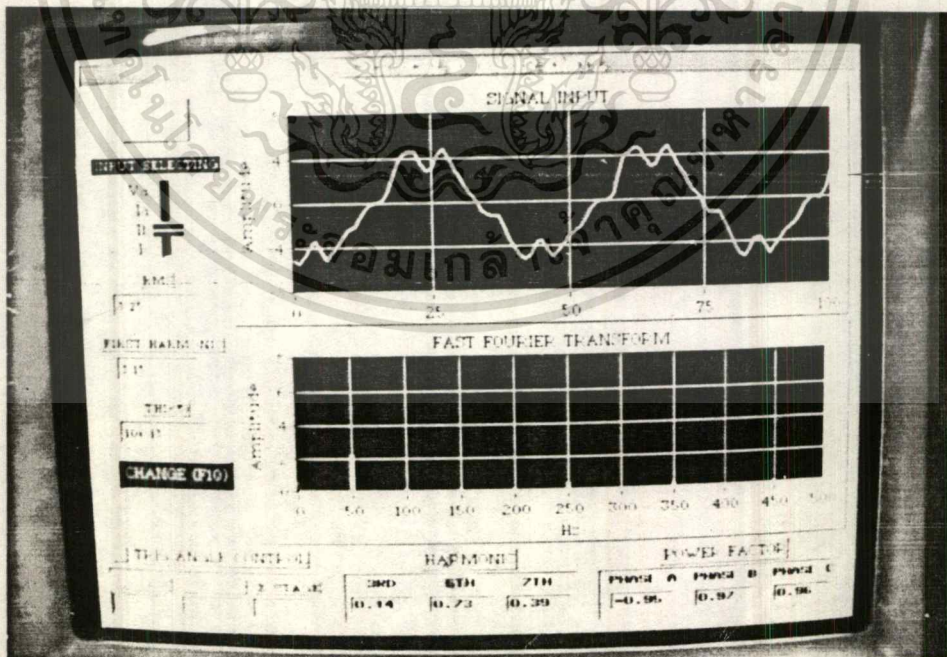


รูปที่ 7.7 แสดงลักษณะของกระแสในเฟส b เมื่อโหลดเป็นมอเตอร์และโหลดไฟก่อนใช้เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

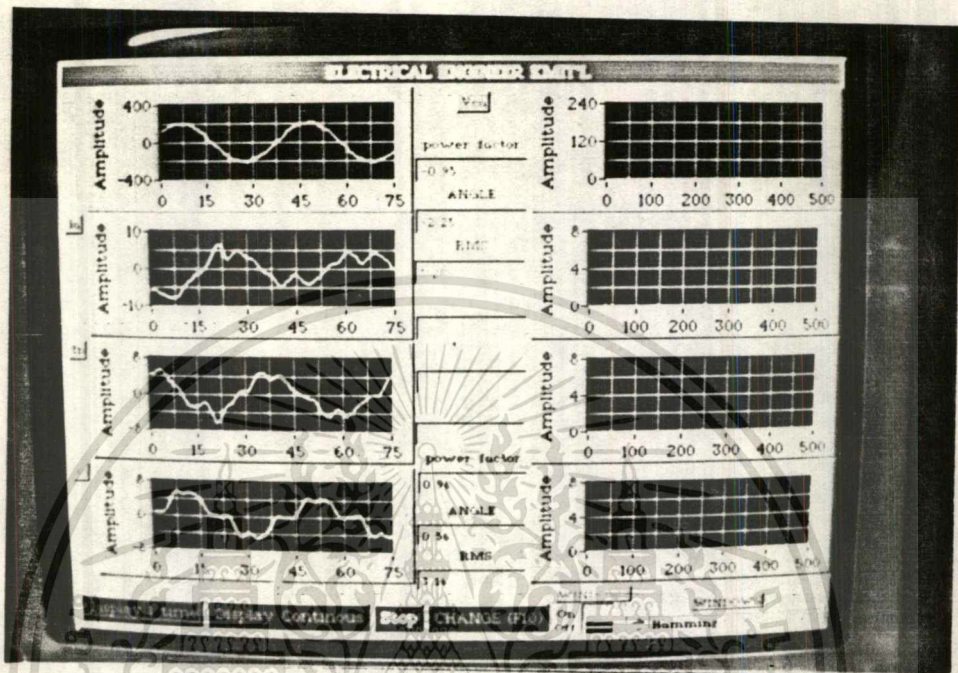


รูปที่ 7.8 แสดงลักษณะของกระแสในเฟส c โหลดเป็นมอเตอร์และโหลดไฟก่อนใช้เครื่อง

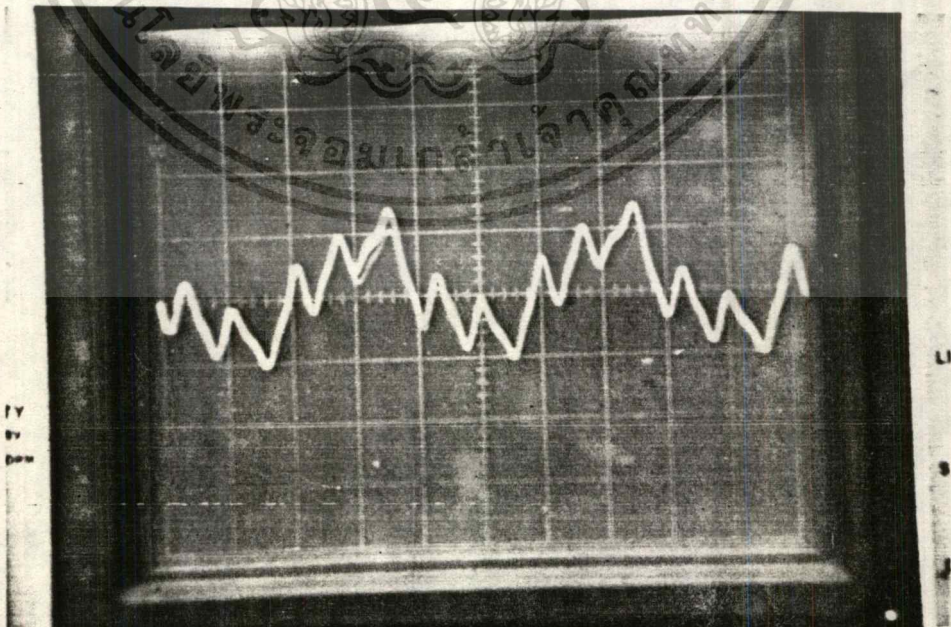


รูปที่ 7.9 แสดงลักษณะของกระแสในเฟส c โหลดเป็นมอเตอร์และโหลดไฟหลังใช้เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

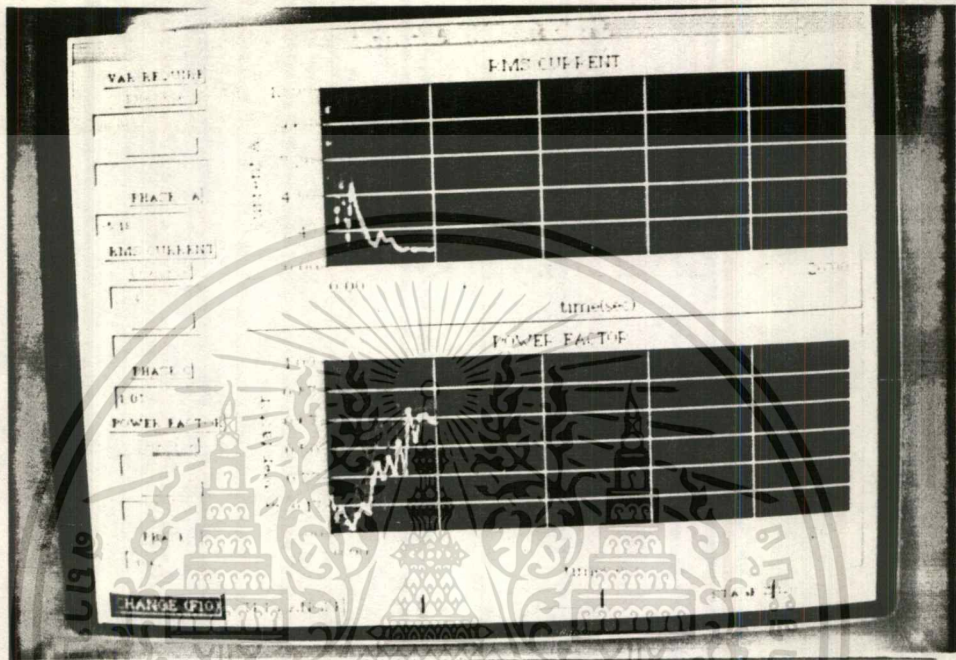


รูปที่ 7.12 แสดงผลของระบบเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อโหลดเป็นมอเตอร์และโหลดไฟ

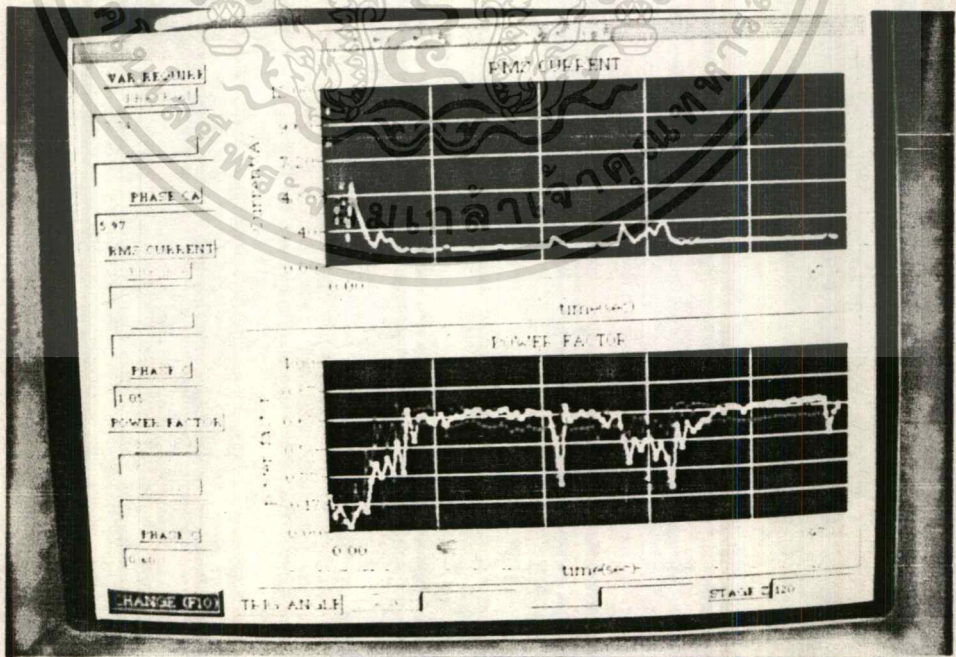


รูปที่ 7.13 แสดงลักษณะของกระแสเมื่อวัดจากสโกปเมื่อโหลดเป็นมอเตอร์และโหลดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

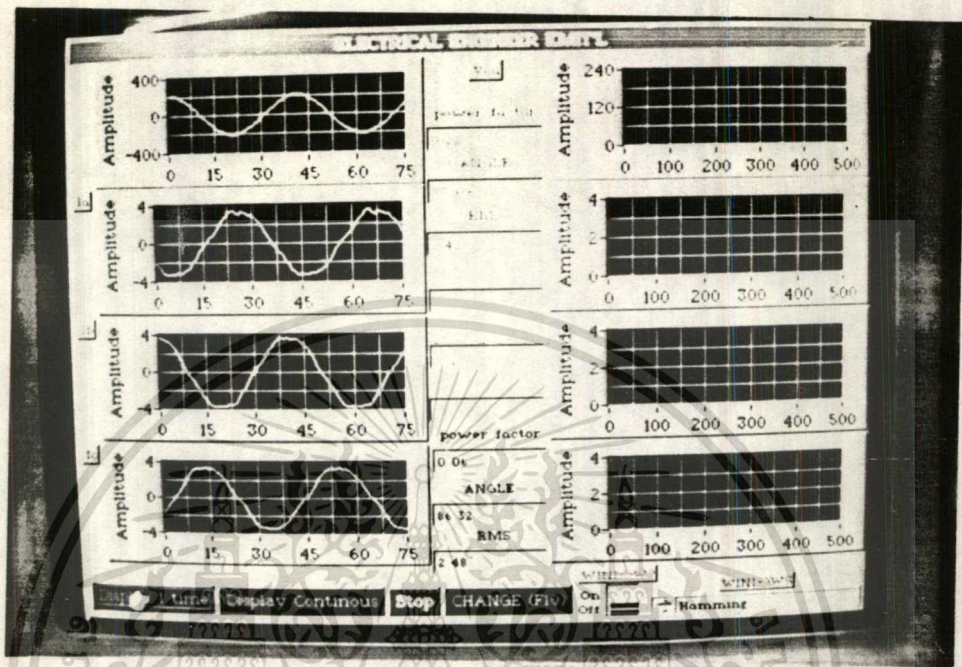


รูปที่ 7.10 แสดงสถานะของระบบเมื่อเริ่มต้นไซเคิลเครื่องเมื่อโหลดเป็นมอเตอร์และโหลดไฟ

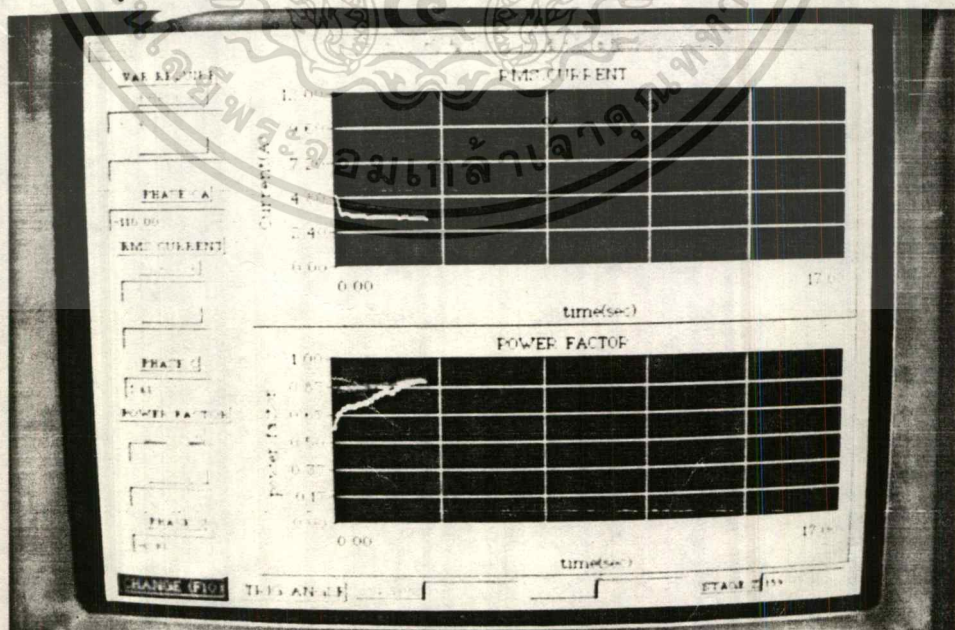


รูปที่ 7.11 แสดงสถานะของระบบเมื่อเข้าสู่สถานะสมดุลเมื่อโหลดเป็นมอเตอร์และโหลดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

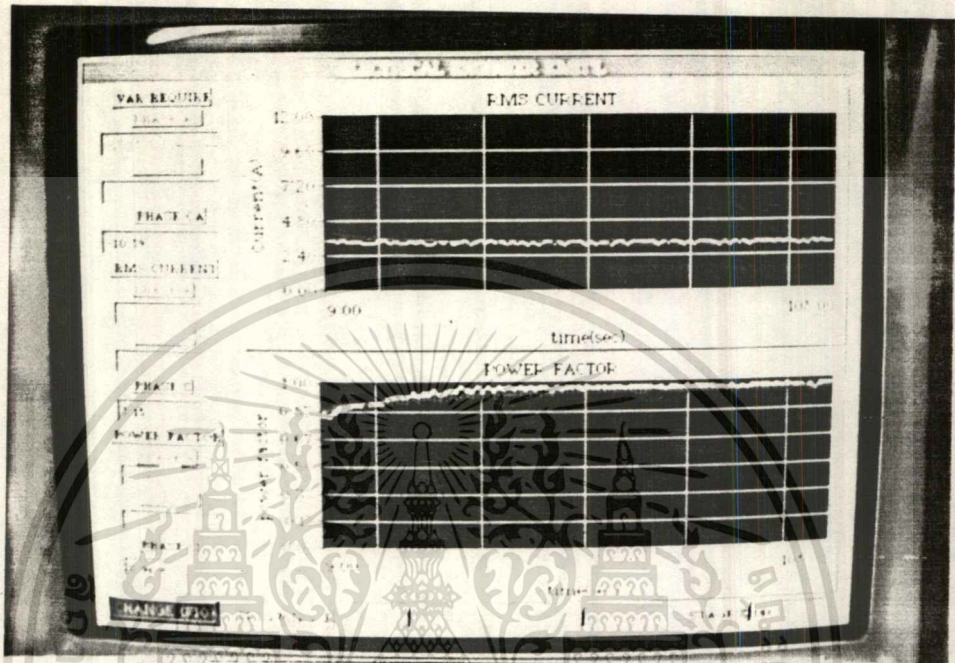


รูปที่ 7.14 แสดง ลักษณะของระบบโหลดเป็นมอเตอร์ก่อนใช้เครื่อง

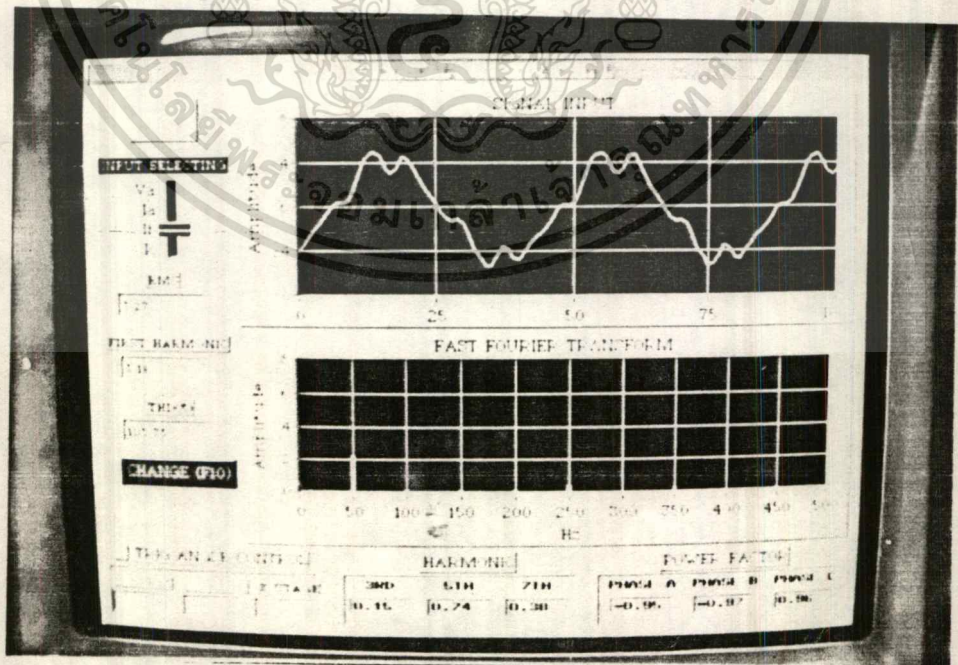


รูปที่ 7.15 แสดงสถานะของระบบเมื่อเริ่มต้นใช้เครื่องโหลดเป็นมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

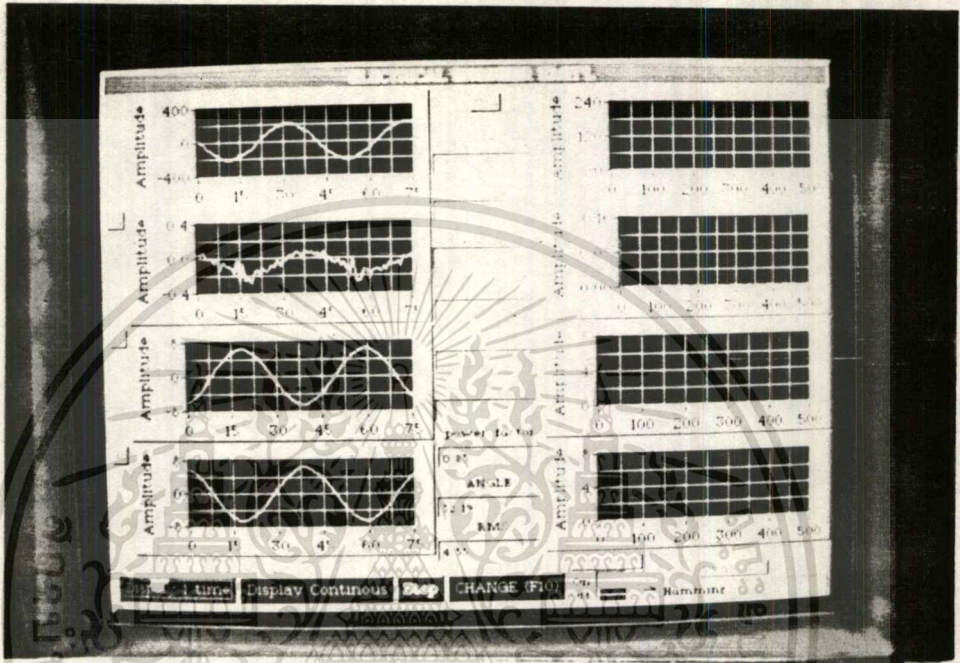


รูปที่ 7.16 แสดงสถานะของระบบเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยโหลดเป็นมอเตอร์

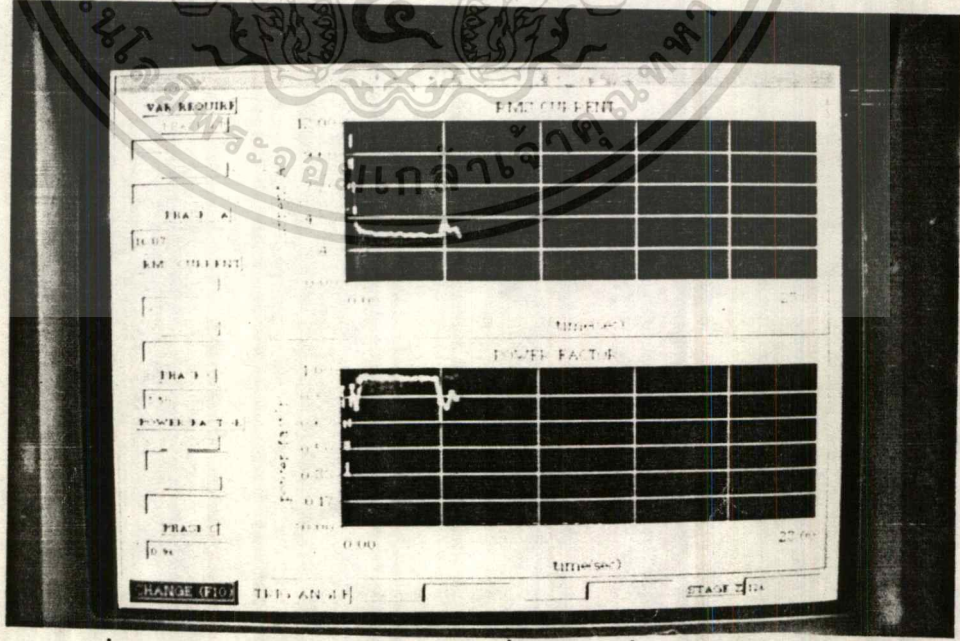


ปที่ 7.17 แสดงผลของระบบเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วโหลดเป็นมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

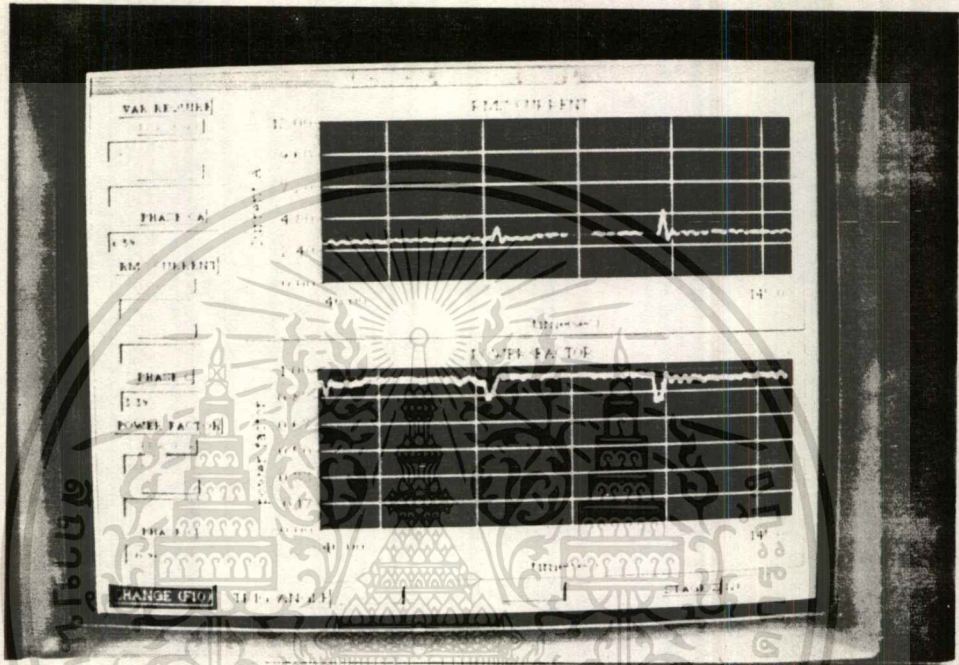


รูปที่ 7.18 แสดงลักษณะของโหนดไม่สมดุลก่อนการใช้เครื่อง



รูปที่ 7.19 แสดงสถานะของระบบขณะเริ่มต้นใช้เครื่องโหนดไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.20 แสดงสถานะของระบบเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้วโดยโหลดไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดลอง																		
	ก่อนใส่เครื่องชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์									หลังใส่เครื่องชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์								
	กระแสในระบบ			ตัวประกอบกำลัง			รีแอกทีฟเพาเวอร์			กระแสในระบบ			ตัวประกอบกำลัง			รีแอกทีฟเพาเวอร์		
	Ia	Ib	Ic	A	B	C	A	B	C	Ia	Ib	Ic	A	B	C	A	B	C
โหลดมอเตอร์ 3 เฟส	2.41	2.83	2.56	-0.2	-0.2	-0.1	346	408	-376	0.77	0.67	0.72	-0.7	-0.73	-0.72	-0.7	-17	-18
ที่กระแสไม่สมดุล																		
ไมใส่ Filter																		
V=150 Vline to line																		
First harmonic	2.41	2.82	2.56							0.51	0.58	0.48						มุม TRIG
third harmonic	0.02	0.04	0.04							0.13	0.12	0.24				134	130	127
fifth harmonic	0.14	0.12	0.12							0.38	0.29	0.12						
seventh harnois	0.03	0.02	0.02	V=147 V line to line						0.45	0.42	0.46	V=149V line to line					
โหลดหลอดไฟ	0	4.56	4.56	0	-0.9	0.89	0	308	308	3.24	3.23	3.12	0.92	-0.92	0.96	-0.8	4.17	-1.3
ค่อแบบ 2 เฟส																		
ไมใส่ Filter																		
V=150 Vline to line																		
First harmonic	0	4.56	4.56							3.04	2.92	2.91						มุม TRIG
third harmonic	0	0.03	0.03							0.83	0.36	1.09				119	133	180
fifth harmonic	0	0.04	0.05							1.49	1.76	0.48						
seventh harnois	0	0	0	V=148 Vline to line						0.69	0.4	0.3	V=149 Vline to line					
โหลดหลอดไฟ	0	4.56	4.56	0	-0.9	0.89	0	308	308	3.32	3.34	3.31	0.97	0.98	-0.99	29	30	29
ค่อแบบ 2 เฟส																		
ใส่ Filter																		
V=150 Vline to line																		
First harmonic	0	4.56	4.56							3.24	3.28	3.28						มุม TRIG
third harmonic	0	0.03	0.03							0.8	0.62	0.3				100	110	127
fifth harmonic	0	0.04	0.05							0.33	0.23	0.34						
seventh harnois	0	0	0	V=148 Vline to line						0.29	0.2	0.1	V=149 Vline to line					
โหลดหลอดไฟ	2.64	3.85	5.23	0.44	1	0.66	344	174	570	3.28	3.3	3.52	0.97	0.98	0.99	29	30	29
ค่อแบบ 2 เฟส กับ																		
มอเตอร์ 3 เฟส																		
ที่ไม่สมดุล																		

	ก่อนใส่เครื่องชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์									หลังใส่เครื่องชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์									
	กระแสในระบบ			ตัวประกอบกำลัง			รีแอกทีฟเพาเวอร์			กระแสในระบบ			ตัวประกอบกำลัง			รีแอกทีฟเพาเวอร์			
	Ia	Ib	Ic	A	B	C	A	B	C	Ia	Ib	Ic	A	B	C	A	B	C	
ไม้ไฟ Fiber																			
V=150 Vline to line																			
First harmonic	2.62	3.84	5.22							2.98	3.2	3.44				มุม TRIG			
third harmonic	0.04	0.02	0.04							11.7	0.63	1.09				119	133	180	
fifth harmonic	0.08	0.01	0.07							1.28	0.92	0.31							
seventh harnoic	0.01	0	0	V=145 Vline to line									V=148 Vline to line						
โหลดหลอดไฟ	2.64	3.85	5.23	0.44	1	0.66	344	174	570	3.44	3.44	3.28	0.98	0.98	0.97	0.82	-54	-12	
ค้อแบบ 2 เฟส กับ																			
มอเตอร์ 3 เฟส																			
ที่ไม่สมดุล																			
ไฟ Fiber																			
V=150 Vline to line																			
First harmonic	2.62	3.84	5.22							3.38	3.39	3.21				มุม TRIG			
third harmonic	0.04	0.02	0.04							0.79	0.14	0.8				111	112	142	
fifth harmonic	0.08	0.01	0.07							0.41	0.4	0.21							
seventh harnoic	0.01	0	0	V=145 Vline to line									V=150 Vline to line						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปผลและวิจารณ์

-จากผลการทดลองต่อโหมคมอเตอร์ 3 เฟสที่ไม่สมดุลอย่างเฉียว โดยไม่ต่อผ่าน เครื่องชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์ จะเห็นว่ากระแสแต่ละเฟสจะมีค่าไม่เท่ากัน(ไม่สมดุล)ยิ่งไปกว่านั้น ค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) มีค่าต่ำมากและรีแอกทีฟเพาเวอร์ (reactive power) ก็มีค่าสูงมากด้วย แต่เมื่อต่อมอเตอร์ตัวนี้ผ่านเครื่องรีแอกทีฟเพาเวอร์จะทำให้กระแสที่ไม่สมดุลกลับสมดุลได้โดยมีค่าต่ำมาๆและเท่ากันทุกเฟสอีกด้วย ถ้าตัวประกอบกำลังมีค่าสูงมากขึ้นด้วยจึงทำให้ค่ารีแอกทีฟเพาเวอร์มีค่าต่ำมาก ค่าโวลเตจเรกกูเรชันก็ดีขึ้นมาก

-จากผลการทดลองต่อหลอดไฟ 2 เฟสเข้ากับกับระบบ 3 เฟสซึ่งทำให้กระแส โหลดจากแหล่งจ่ายเพียง 2 เฟสทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุลมาๆ แต่เมื่อนำมาต่อผ่านเครื่องชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์ กระแสจะไหลสมดุลทุกเฟสและค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเกือบหนึ่งทุกเฟสอีกด้วย โวลเตจเรกกูเรชันมีค่ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

-จากผลการทดลองต่อหลอดไฟ 2 เฟสและต่อมอเตอร์ที่ไม่สมดุลทั้ง 3 เฟสเข้าด้วยกัน กระแสจะมีค่าไม่สมดุลมาก ค่าตัวประกอบกำลังก็มีค่าต่ำและค่ารีแอกทีฟเพาเวอร์มีค่าสูง แต่เมื่อก่อนเข้าเครื่องชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์จะเห็นว่ากระแสมีค่าลดลงและสมดุลเท่ากันทุกเฟส ค่าตัวประกอบกำลังก็มีค่าใกล้เคียง 1 ทำให้ค่ารีแอกทีฟเพาเวอร์มีค่าน้อยมาก

-จากการทดลองข้างต้นจะเห็นว่ามีการใช้ฮาร์โมนิกต่างๆ โดยเฉพาะฮาร์โมนิกที่ 5 แต่เมื่อต่อ ฟิลเตอร์(Filter) เข้าไปฮาร์โมนิกลดลงไปมาก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องชดเชยรีแอกทีฟเพาเวอร์สามารถช่วยแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าได้หลายอย่างดังนี้

- 1.แก้ไขสภาวะไม่สมดุลของกระแส (Unbalance current) ให้สมดุลได้เป็นอย่างดี
- 2.ช่วยเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังให้ใกล้เคียง 1 ได้มากที่สุดไม่จำกัดว่าจะเป็นโหลดชนิดใด
- 3.ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้เป็นอย่างมาก
- 4.ช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้นานมากขึ้น
- 5.ช่วยยี่ห้อแหล่งจ่ายจ่ายโหลดได้เพิ่มขึ้น
- 6.การควบคุมเป็นการแบบควบคุมอัตโนมัติ แสดงผลทางจอคอมพิวเตอร์สามารถทราบผล

ของสถานะระบบไฟฟ้าได้อย่างละเอียด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์เป็นเครื่อง สเปกตรัมอะนาไลเซอร์ (Spectrum Analyser)

ภาคผนวก

ตอนที่ 1 วงจรควบคุมเฟสคอนโทรล

เฟสคอนโทรล (phase control) ที่ถูกควบคุมโดยไทรสเตอร์ทั่วไปจะทำการเปลี่ยนไฟ AC แบบเฟสเดียวหรือสามเฟสเป็น DC ทั้งยังควบคุมกำลังในเวลาเดียวกันด้วย ในการควบคุม thyristor แบบนี้อุปกรณ์ชนิดพิเศษที่ช่วยลดเวลาในการสร้างวงจรควบคุมได้อย่างมาก คือ TCA 785 เป็นวงจรที่ใช้ในการควบคุมเฟสโดยได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อจุดประสงค์นี้เท่านั้น โดยเลือกหรือกำหนดจุดที่จะทริก thyristor ด้วยอุปกรณ์ภายนอก มันได้ทำการรวมหน้าที่ต่างๆ มากมายที่จะต้องใช้ไว้ในตัวมันซึ่งถ้าเราใช้อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์อื่นที่ไม่ใช่ TCA 785 จะต้องสิ้นเปลืองอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายสูงมากกว่า

ลักษณะเฉพาะของ TCA 785 ดังต่อไปนี้

- ใช้งานได้อย่างกว้างขวางเพราะว่าสามารถต่อกับแหล่งจ่ายไฟ 6-8 โวลต์
- กินกระแส 4.8-10 mA
- LS₁ compatible ดังนั้นสามารถควบคุมโดย ความเร็วต่ำได้ ปลอดภัยจากสัญญาณรบกวน ด้วยระดับลอจิกสัญญาณถึง 15 โวลต์
- มีสองเอาต์พุต กระแสทริกสามารถจ่ายได้ถึง 250 mA
- อีกสองเอาต์พุตที่มีสัญญาณกลับกันกับ 2เอาต์พุตแรก
- ฟังก์ชันในการหยุด เป็นการหยุดสัญญาณทริกไม่ให้มีเอาต์พุตออกไปโดยปราศจากการ arc
- ปรับความกว้างของ pulse โดยการต่อ Capacitor ภายนอก
- การตรวจจับที่ตำแหน่งศูนย์ (zero crossing) เป็นที่ยอมรับไว้อย่างดี
- ป้องกันการหยุดๆหายๆของสัญญาณทริกซึ่งทั้งสามวงจร โดยเฉพาะสำหรับการทำงานแบบ 6 พัลส์ ซึ่งใช้ สวิตซ์การตรวจจับตำแหน่งศูนย์ และ โวลต์ พัลส์ วิตต์ คอนเวอเตอร์ (Voltage pulse width converter)

หน้าที่การทำงานต่างๆของ TCA 785

ส่วนหลักของ IC ตัวนี้คือแหล่งจ่ายที่จ่ายให้เพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันภายใน U_{rr} ประมาณ 3.1 โวลต์ ดังนั้นตัวแปรหลักนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับ แหล่งจ่ายไฟตรงและสามารถใช้แรงดันได้กว้างถึง 8-18 โวลต์

สัญญาณ ซิงค์ (sync) ใ้จาก โวลต์หลัก ผ่านตัวต้านทานค่าสูงๆ U_{sync} ค่อยอยู่ระหว่างขา 5 กับกราวด์ที่ขา 1 มีความไวสูงในการตรวจจับตำแหน่งศูนย์ เพื่อทำการ ซิงค์ และถูกส่งต่อไปยัง

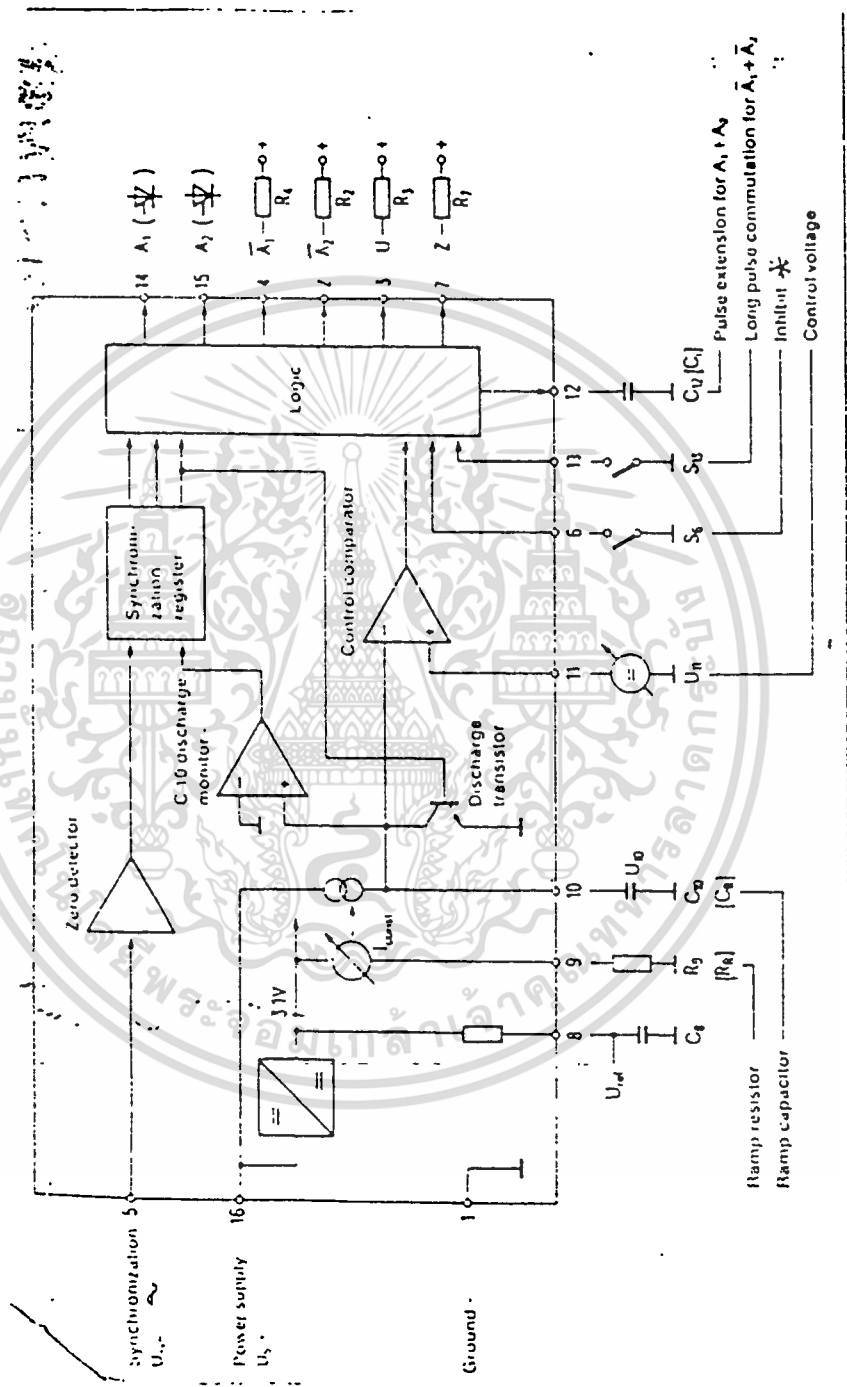
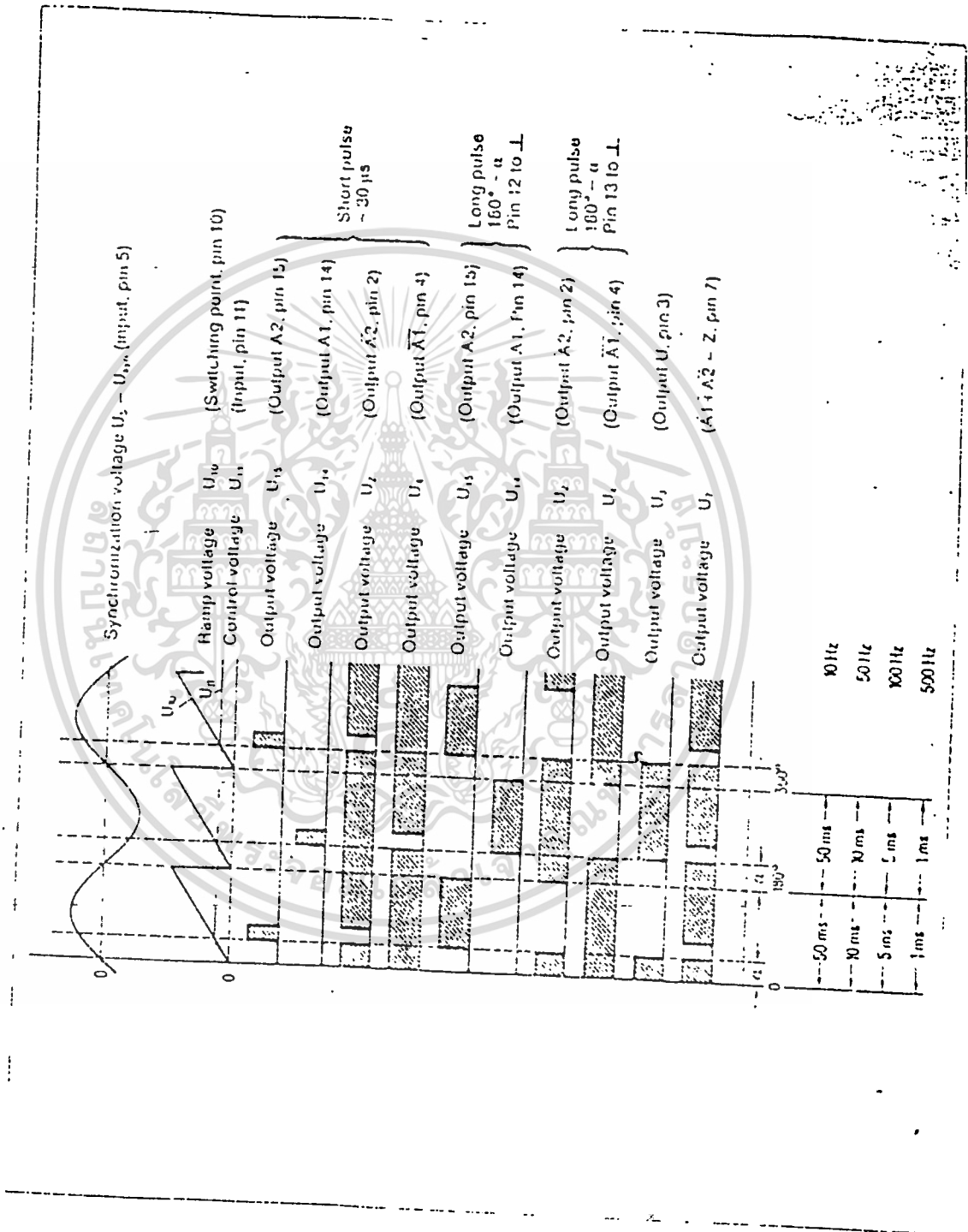


Fig. 1 Block diagram of integrated phase control ICA 780

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 2 Pulse level diagram of TCA 780



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิงค์ รีจิสเตอร์ (sync register) ซึ่งควบคุมตัวกำหนดสัญญาณ แรมป์(ramp) ส่วนประกอบสำคัญของ แหล่งจ่ายกระแสคงที่ (constant current source) I_{con} ซึ่งจะถูกอับประจะด้วยตัวเก็บประจุภายนอก C10 หรือ Cr เป็นส่วนสัดกับเวลาผ่านขา 10 ซึ่ง C10 จะมีค่าอยู่ประมาณ 500pF ถึง 1 μ F เสมอ สิ่งที่ต้องจดจำก็คือว่า ซอว์ทูท ฟลายแบค ไทม์ (sawtooth flyback times) จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับค่าของ C10

กระแส I_{con} ถูกปรับได้โดยตัวต้านทานภายนอก Ra หรือ Rr = 3-300k Ω ผ่านค่า 9RC network R9,C10 นั้นจะเป็นตัวกำหนดความชันในการขึ้นของ แรมป์ โวลเตจ (ramp voltage) U10 ของ zerocrossing และสัญญาณแรมป์คาปาซิเตอร์ C10 ผ่าน ทานซิเตอร์ คิสซาจ (discharge transistor) ภายในวงจร ซิงค์ รีจิสเตอร์ (sync register) จะทำการส่งข้อมูลการตรวจพบแรงดัน 0 ไปวงจรต่อไปเพียงอย่างเดียว

รูปแบบการทริกไทรสเตอร์ (thyristor trigger module)

การควบคุม ไทรสเตอร์ใน ไลน์ คอมมิวเตชัน (line commutation) หรือ นอน คอมมิวเตตติ้ง เคอเรนต คอนเวอร์เตอร์ (non-commutating current converter) ต้องการทริกเฉพาะรูปแบบ ไทรสเตอร์ ถูกทริกโดยกระแสพัลส์บวกระหว่าง เกท(gate) และ คาโทด(cathode) โดยทำการควบคุม พัลส์ ให้อยู่คงที่จนกว่ากระแสจะถูกล็อกอยู่ (latching current) และ ไทรสเตอร์ จะถูกปิดสวิทช์ โดยทำการลดลงของ กระแสเมน (main current) ที่ไหลระหว่าง แอนโอด และ คาโทด ที่ต่ำกว่า โฮลดิ้ง กระแส (holding current) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ต่างๆ ที่ใช้ในกาทรริก ไทรสเตอร์จะขึ้นอยู่กับโหลดและการออกแบบวงจร

ตัวอย่างการใช้งานของ TCA 785

1). การควบคุมโดยตรงสำหรับไทรสเตอร์ที่มีกำลังต่ำ (Directed controlling low power thyristor with line current) ในรูปแสดงเฟสคอนโทรลที่ใช้ TCA 785 สำหรับ การควบคุมโดยตรง โดยที่มุมทริกของ การควบคุมเฟส สามารถปรับมุมทริกได้ระหว่าง 0องศา ถึง 180 องศา และ กำลังที่โหลดมีค่าระหว่าง 0-400W

IC จะรับแรงดันที่ขา 16 ลากผ่านตัวต้านทานอนุกรม R1 ทำการกรองโดยผ่านไดโอด D1 และทำการรักษาระดับแรงดันไว้ที่ 15โวลท์ โดย Z-diode D₂

อิเล็กโทรไลติก คาปาซิเตอร์ (Electrolytic capacitor) C₁ ทำหน้าที่กรองแรงดันตรง ที่ได้มาจากการกรองแบบครึ่งคลื่นให้ราบเรียบขึ้น ในกรณีของแหล่งจ่ายของวงจรได้มีการระบุค่าสูงสุดที่เหมาะสมในการกินกระแส (เมื่อไม่มี โหลด) เท่ากับ 10mA และแรงดันแหล่งจ่าย ต่ำสุด U₁ คือ 8

โวลต์ (จะต้องไม่ต่ำกว่านี้) ซึ่งโครโนเซชัน อินพุท (ขา 5) จะต่ออยู่กับ เฟส R ผ่านตัวต้านทาน $220k\Omega$ และต่อเทียบกับศักย์กับ กราวด์ แบบทูปแบบ ไคโอด(D2,D3)ซึ่ง ไคโอดจะทำการจำกัด แรงดันที่ ซึ่งอินพุท ประมาณ ± 6 โวลต์

ตัวกำเนิดความถี่สัญญาณจะถูกกำหนดโดยการตรวจนับค่าศูนย์นั้นคือทุกๆครั้งที่ค่าแรงดัน ศูนย์ตกคร่อมใน โลน์ (หมายถึง zero Crossing) โวลต์พื้นเล็ยก็จะเริ่มเกิดขึ้น ณ จุดนั้น แรมปี คาปาซิเตอร์ $C_R = 47nF$ และ แรมปริจิสเตอร์ $R_R = 100k\Omega$ จะเป็นตัวปรับแรงดันของ ออฟ สเตจ โวลเตอร์ ในวงจรนี้ สัญญาณพื้นเล็ยมีการขยาย 7 โวลต์ โดย P_1, U_1 จะต้องไม่เกินกว่าแรมปีโวล เตอร์สูงสุด (ค่าแรงดัน แรมปีสูงสุด) U_{10} ดังนั้นมุมในการนำกระแสจะสามารถเลือกได้ระหว่าง 0- 180 องศา ซึ่งในการควบคุมวงจรแบบครึ่งลูกกลืน เราจะใช้เพียง เอ้าท์พุทขา 15 ที่จะต่อกับเกต ของ ไทรสเตอร์ โดยจะทริกเป็นพัลส์บวกให้กับคลื่นลบแต่ไม่ได้มีในวงจรนี้ และความกว้างของ พัลส์ขึ้นอยู่กับ คาปาซิเตอร์ C_1 ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 โดยความกว้างของพัลส์ของ TCA 785 (Pulse Width Capacitor C_1) คือ $620 \mu S/nF$ เป็นต้น

ไทรสเตอร์ในวงจรแสดงในรูป จะถูกทริกโดยพัลส์ความกว้าง $205 \mu S$ กับกระแสทริก $47 mA$

สัญญาณการเปิดปิดสวิทซ์ไทรสเตอร์

พัลส์บวกที่ใช้ในการทริกไทรสเตอร์ จะกำเนิดอยู่ในช่วงระหว่างครึ่งบวกเพียงอย่างเดียว เมื่อแรงดันที่ขา 6 เกินกว่า $+4$ โวลต์ ดังนั้น ตัวต้านทาน $10 k\Omega$ ถูกต่อกับขา 16 ที่เป็นขับ พลาซเพื่อให้มันทำงานที่แรงดันขา 6 ต่ำลงกว่า 2.5 โวลต์ ก็จะไม่มีพัลส์ปรากฏที่เอ้าท์พุทใดๆ

การเปิดวงจรที่ขา 6 กับกราวด์ อาจทำได้โดยการใช้สวิทซ์ ซึ่งการปิดของโหลด ไม่เกี่ยวกับสถานะของ TCA 785

เนื่องจากระดับสัญญาณที่ขา 6 ไม่มีพัลส์ อาจจะต้องเอาใจใส่เป็นพิเศษเมื่อทำการกำเนิด พัลส์ให้ไทรสเตอร์ เพราะว่าจะต้องการพลังงานมาก ทำให้เกิดความสูญเสียในตัวต้านทานที่ อนุกรมอยู่ จะทำให้ไอซีหยุดทำงานเนื่องจากกำลังไม่พอจ่าย

```

/*
.....
.....
* Program : svc_1.cpp
*
* Description : program for PCL-818 pacer trigger A/D
*
* conversion with interrupt data transfer.
*
* fast fourier transform to create frequency domain
*
* control tcr to correlation power factor and
*
* balancing phase current
*
* Revision : 1.0
*
* Date : 15/03/95 static var compensator
.....
.....
*/
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#include <alloc.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include "D:\LW\INCLUDE\wssystem.h"
#include "D:\LW\INCLUDE\utility.h"
#include "D:\LW\INCLUDE\ormatio.h"
#include "D:\LW\INCLUDE\wserint.h"
#include "D:\LW\INCLUDE\graphics.h"
#include "D:\LW\INCLUDE\analysis.h"
#include "D:\LW\NSTR\pid.h"
#include "fast5.h"
#include "df11.h"
#define NUMPTS 1024*2
#define P_A 0
#define P_B 1
#define P_C 2
#define MAX_VAR 10000/3

extern pcl818(int, unsigned int *);

unsigned int param[60]; /* If two boards installed, need to
declare
the second parameter array */
unsigned int far * dat;
unsigned int far * dat1;
unsigned int far * card;
unsigned char far * digit;
float far * plot;
float far * dis;
COMPLEX far * samp;
static COMPLEX far * w;
static int m;
int panel_hdl,panel1_hdl;
int panel2_hdl;
double theta,rms;
int sysflag;
double funda,thd;
double three,five,seven;
unsigned static int data_z,data_y,data_x;
double v_a_angle,i_a_angle,i_b_angle,i_c_angle;
double v_a_rms,i_a_rms,i_b_rms,i_c_rms;
double real,una;
double pf_a,pf_b,pf_c;
double var_ab,var_bc,var_ca;
unsigned int trig_a,trig_b,trig_c;
double max_var;

void initfft(int );
void fft(COMPLEX *);
void do_fft(int plotnum);
void main_panel(void);
void second_panel(void);
void third_panel(void);
void win(int x);
void digit_out(void);
void stand_digit_out(void);
double convert(double);
double find_pf(int,double);
void ctrl_triger(void);

/*=====main program
here=====*/
void main(void)
{
unsigned int i,j;

float databuf;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int     ctrl;
int     handle;
int     plohandle[10];
int     winflag;
int     flag.flag1,flag2,flag4;
int     plotnum,selectw;
double  a, tempfit;
double  xmax,xmin,ymax,ymin;
int     channel;
double  vs_angle;

plotnum=NUMPTS;
card = (unsigned int *) farcalloc(NUMPTS*4 ,sizeof(int));
if(!card)
{
    ConfirmPopup(" Could not allocate samplings memory.");
    GetUserEvent(1,&handle,&ctrl);
    exit(1);
}
digit = (unsigned char *) farcalloc(10 ,sizeof(char));
if(!digit)
{
    ConfirmPopup(" Could not allocate digital output memory.");
    GetUserEvent(1,&handle,&ctrl);
    exit(1);
}

samp = (COMPLEX *) farcalloc(plotnum, sizeof(COMPLEX));
if(!samp)
{
    ConfirmPopup(" Could not allocate sample memory.");
    GetUserEvent(1,&handle,&ctrl);
    exit(1);
}
w = (COMPLEX *) farcalloc (plotnum,sizeof(COMPLEX));
if(!samp)
{
    ConfirmPopup(" Could not allocate working memory.");
    GetUserEvent(1,&handle,&ctrl);
    exit(1);
}
plot = (float *)farcalloc(plotnum, sizeof(float));
if(!plot)
{
    ConfirmPopup(" Could not allocate plotting memory.");
    GetUserEvent(1,&handle,&ctrl);
    exit(1);
}

}

dis = (float *)farcalloc(plotnum*10, sizeof(float));
if(!dis)
{
    ConfirmPopup(" Could not allocate display memory.");
    GetUserEvent(1,&handle,&ctrl);
    exit(1);
}

for(i=0;i<plotnum*10;i++)dis[i]=0;
SetMouseCursor (4);
mitffit((int)log2(plotnum));
pid_config (P_A, 1, 65.0, 0.1, 0, 0, 0, 1, 0);
pid_config (P_B, 1, 65.0, 0.1, 0, 0, 0, 1, 0);
pid_config (P_C, 1, 65.0, 0.1, 0, 0, 0, 1, 0);
pid_setpoint (P_A, 0);
pid_setpoint (P_B, 0);
pid_setpoint (P_C, 0);
data_z=220;
data_y=220;
data_x=220;
sysflag=1;
while(sysflag!=0)
{
    switch(sysflag)
    {
        case 1:
            panel_hdl=LoadPanel("fast5.uir",fast);
            DisplayPanel(panel_hdl);
            main_panel();
            break;
        case 2:
            panel1_hdl=LoadPanel("fast5.uir",zoom);
            DisplayPanel(panel1_hdl);
            second_panel();
            break;
        case 3:
            panel2_hdl=LoadPanel("fast5.uir",stand);
            DisplayPanel(panel2_hdl);
            thurd_panel();
            break;
    }
}

void main_panel(void)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

(
    unsigned int ij;
    float   databuf;
    int     ctrl;
    int     handle;
    int     plothandle[10];
    int     winflag;
    int     flag,flag1,flag2,flag4;
    int     plotnum,selectw;
    double  a, tempfit;
    double  xmax,xmin,ymax,ymin;
    int     channel;
    double  va_angle;

    flag=1;flag1=1;
    plotnum=NUMPTS;
    while(flag)
    {
        param[0] = 0; /* Board number */
        param[1] = 0x300; /* Base I/O address */
        param[4] = 2; /* IRQ level : IRQ2 */
        param[5] = 122; /* Pacer rate = 10M / (param[5]*param
[6]) */
        param[6] = 40;
        param[7] = 0; /* Trigger mode, 0 : pacer trigger */
        param[8] = 0; /* Non-cyclic */
        param[10] = FP_OFF(card); /* Offset of A/D data buffer A */
        param[11] = FP_SEG(card); /* Segment of A/D data buffer A */
        param[12] = 0; /* Data buffer B address, if not used, */
        param[13] = 0; /* must set to 0. */
        param[14] = NUMPTS*4; /* A/D conversion number */
        param[15] = 0; /* A/D conversion start channel */
        param[16] = 3; /* A/D conversion stop channel */
        param[17] = 0; /* Overall gain code, 0 +/- 5V */

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

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

        pci818(3, param); /* Func 3 : Hardware initialization
        */
        if (param[45] != 0)
        {
            ConfirmPopup("DRIVER INITIALIZATION FAILED !");
            exit(1);
        }
        pci818(100, param); /* Func 100 : A/D initialization
        */
        if (param[45] != 0)
        {
            ConfirmPopup("A/D INITIALIZATION FAILED !");
            exit(1);
        }
        flag2=1;
        while(flag1)
        {
            stand_digit_out();
            /* Block channel scan function 105 is very similar to function
            9.
            The only difference is block channel scan function 105 scans
            all input channels (specified by param[15] and param[16])
            on each trigger pulse, and the function 9 scans one channel
            on each trigger pulse. */
            pci818(105, param); /* Func 105 : Pacer trigger A/D
            conversion */
            if (param[45] != 0)
            { /* with interrupt data transfer */
                ConfirmPopup(" A/D INTERRUPT BLOCK DATA TRANSFER
                FAILED !");
                exit(1);
            }
            do
            {
                pci818(106, param); /* Func 106: Check interrupt
                status */
            }while((param[46] & 1) != 0); /* 0 : not active, 1 : active
            */
            for(j = 0;j < 4;j++)
    
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
for (i = 0; i < NUMPTS; i++){plot[i]=0;samp[i].real=0;};
for (i = 0; i < NUMPTS; i++)
{
databuf = card[i*4+j] & 0xFFF;
if(j==0)databuf = ( 25 - (-25) ) *databuf / 4096 + (-25);
if(j==1)databuf = ( 380 - (-380) ) *databuf / 4096 + (-380);
samp[i].real=(double)databuf;
plot[i]=databuf;
};

switch(j)
{
case 0:
plothandle[0]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH1,
plot,plotnum,3,0,0,15,14);
win(0);
do_fft(plotnum);
rms=0;
v_a_angle=theta;
plothandle[4]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH5,
dis,plotnum,3,0,0,15,13);
break;

case 1:
plothandle[1]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH12,
plot,plotnum,3,0,0,15,14);
win(0);
do_fft(plotnum);
pf_a =find_pf(0,theta);
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_pf_a,pf_a);
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_angle_a,convert(v_a_angle-150-
theta));
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_rms_a,rms);
rms=0;
plothandle[5]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH6,
dis,plotnum,3,0,0,15,13);
break;

case 2:
plothandle[2]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH3,
plot,plotnum,3,0,0,15,14);
win(0);
do_fft(plotnum);
pf_b =find_pf(1,theta);
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_pf_b,pf_b);
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_angle_b,convert(v_a_angle+90-
theta));

SetCtrlVal(panel_hdl,fast_rms_b,rms);
rms=0;
plothandle[6]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH7,
dis,plotnum,3,0,0,15,13);
break;

case 3:
plothandle[3]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH4,
plot,plotnum,3,0,0,15,14);
win(0);
do_fft(plotnum);
pf_c=find_pf(2,theta);
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_pf_c,pf_c);
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_angle_c,convert(v_a_angle-30-theta));
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_rms_c,rms);
rms=0;
plothandle[7]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH8,
dis,plotnum,3,0,0,15,13);
break;

);
}
}
GetUserEvent(1,&handle,&ctrl);
switch(ctrl)
{
case fast_stop:
flag1=0;
flag2=0;
flag3=0;
sysflag=0;
break;

case fast_dis_cont:
flag1=0;
flag2=1;
break;

case fast_change:
flag1=0;
flag2=0;
sysflag=2;
UnloadPanel(panel_hdl);
break;
}
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH1 ,plothandle[0] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH2 ,plothandle[1] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH3 ,plothandle[2] ,0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH4 ,plohandle[3] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH5 ,plohandle[4] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH6 ,plohandle[5] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH7 ,plohandle[6] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH8 ,plohandle[7] ,0);
}

/*=====
=====*/

while(flag2)
{
/* Block channel scan function 105 is very similar to function 9.
The only difference is block channel scan function 105 scans
all input channels (specified by param[15] and param[16])
on each trigger pulse, and the function 9 scans one channel
on each trigger pulse. */

pcl818(105, param); /* Func 105 : Pacer trigger A/D
conversion */
if (param[45] != 0)
{ /* with interrupt data transfer */
ConfirmPopup(" A/D INTERRUPT BLOCK DATA TRANSFER
FAILED !");
exit(1);
}
do
{
pcl818(106, param); /* Func 106: Check interrupt status
*/
}while((param[46] & 1) != 0); /* 0 : not active, 1 : active
*/

for(j = 0; j < 4; j++)
{
for (i = 0; i < NUMPTS; i++){plot[i]=0;samp[i].real=0.};
for (i = 0; i < NUMPTS; i++) /* Display data */
{
databuf = card[i*4+j] & 0xFFFF;
if(j!=0)databuf = (25 - (-25)) * databuf / 4096 + (-25);
if(j==0)databuf = (380 - (-380)) * databuf / 4096 + (-380);
samp[i].real=(double)databuf;
plot[i]=databuf;
};
switch(j)
{
case 0:
plohandle[0]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH1,
plot,plotnum/3,0,0,15,14);
win(0);
do_fft(plotnum);
rms=0;
v_a_angle=theta;
plohandle[4]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH5,
dis,plotnum,3,0,0,15,13);
break;
case 1:
plohandle[1]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH2,
plot,plotnum,3,0,0,15,14);
win(0);
do_fft(plotnum);
pf_a=find_pf(0,theta);
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_pf_a,pf_a);
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_angle_a,convert(v_a_angle-150-
theta));
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_rms_a,v_a_angle-150-theta);
rms=0;
plohandle[5]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH6,
dis,plotnum,3,0,0,15,13);
break;
case 2:
plohandle[2]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH3,
plot,plotnum,3,0,0,15,14);
win(0);
do_fft(plotnum);
pf_b=find_pf(1,theta);
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_pf_b,pf_b);
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_angle_b,convert(v_a_angle+90-
theta));
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_rms_b,v_a_angle+90-theta);
rms=0;
plohandle[6]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH7,
dis,plotnum,3,0,0,15,13);
break;
case 3:
plohandle[3]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH4,
plot,plotnum,3,0,0,15,14);
win(0);
do_fft(plotnum);
pf_c=find_pf(2,theta);
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_pf_c,pf_c);
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SetCtrlVal(panel_hdl,fast_angle_c,convert(v_a_angle-30-
theta));
SetCtrlVal(panel_hdl,fast_rms_c,v_a_angle-30-theta);
rms=0;
plothandle[7]=PlotY(panel_hdl,fast_GRAPH8,
dis,plotnum_3,0,0,15,13);
break;

};
}
stand_digit_out();
GetUserEvent(0,&handle,&ctrl);
switch(ctrl)
{
case fast_stop:
flag2=0;
flag=0;
sysflag=0;
break;
case fast_dis_1_t:
flag2=0;
flag1=1;
break;
case fast_change:
flag1=0;
flag=0;
flag2=0;
sysflag=2;
UnloadPanel(panel_hdl);
break;
}

DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH1 ,plothandle[0] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH2 ,plothandle[1] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH3 ,plothandle[2] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH4 ,plothandle[3] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH5 ,plothandle[4] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH6 ,plothandle[5] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH7 ,plothandle[6] ,0);
DeleteGraphPlot (panel_hdl,fast_GRAPH8 ,plothandle[7] ,0);
}

/*=====
=====*/
}
}

void second_panel()
{
int ctrl,handle;
int flag=1;
int channel=0;
int i,j;
float databuf;
int temps;
unsigned char buf;
int plotnum=NUMPTS;
int plothandle[3];
int control;

//=====initial A/D board
param[0] = 0; /* Board number */
param[1] = 0x300; /* Base I/O address */
param[4] = 2; /* IRQ level : IRQ2 */
param[5] = 122; /* Pacer rate = 10M / (param[5]*param
[6]) */
param[6] = 40;
param[7] = 0; /* Trigger mode, 0 : pacer trigger */
param[8] = 0; /* Non-cyclic */
param[10] = FP_OFF(card); /* Offset of A/D data buffer A */
param[11] = FP_SEQ(card); /* Segment of A/D data buffer A */
param[12] = 0; /* Data buffer B address, if not used, */
param[13] = 0; /* must set to 0. */
param[14] = NUMPTS*4; /* A/D conversion number */
param[15] = 0; /* A/D conversion start channel */
param[16] = 3; /* A/D conversion stop channel */
param[17] = 0; /* Overall gain code, 0 : +/- 5V */

pcl818(3, param); /* Func 3 : Hardware initialization */
if (param[45] != 0)
{
ConfirmPopup("DRIVER INITIALIZATION FAILED !");
exit(1);
}
pcl818(100, param); /* Func 100 : A/D initialization */
if (param[45] != 0)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ConfirmPopup("A/D INITIALIZATION FAILED !");
exit(1);
}
// SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_p_a, (data_x/220)*180);
// SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_p_b, (data_y/220)*180);
// SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_p_c, (data_x/220)*180);
// digit_out();

//=====
while(flag!=0)
{
GetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_trig, &control);
if(control)
    digit_out(); //control trig angle
else stand_digit_out();
/* Block channel scan function 105 is very similar to function 9.
The only difference is block channel scan function 105 scans
all input channels (specified by param[15] and param[16])
on each trigger pulse, and the function 9 scans one channel
on each trigger pulse. */
pcl818(105, param); /* Func 105. Paer trigger A/D
conversion */
if (param[45] != 0)
{ /* with interrupt data transfer */
ConfirmPopup(" A/D INTERRUPT BLOCK DATA TRANSFER
FAILED !");
exit(1);
}
do
{
pcl818(106, param); /* Func 106. Check interrupt status
*/
}
while((param[46] & 1) != 0); /* 0 not active, 1 : active
*/

// convert data to specify range
for(j=0; j<4; j++)
{
for (i = 0; i < NUMPTS; i++) {plot[i]=0; samp[i].real=0;};
for (i = 0; i < NUMPTS; i++) /* Display data */
{
databuf = card[i*4+j] & 0xFFFF;
if(j!=0)databuf = ( (25 - (-25)) * databuf / 4096) + (-25);
if(j==0)databuf = ( (380 - (-380)) * databuf / 4096) + (-380);
samp[i].real=(double)databuf;
plot[i]=databuf;
};
do_fft(plotnum);
if(j==0)v_a_angle=theta;
else
{
switch(j)
{
case 1:
SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_pf_a, find_pf(j-1, theta));
break;
case 2:
SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_pf_b, find_pf(j-1, theta));
break;
case 3:
SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_pf_c, find_pf(j-1, theta));
break;
}
}
if(j==channel)
{
plothandle[0]=PlotY(panel1_hdl, zoom_sig_m,
plot, plotnum, 3, 0, 0, 15, 14);
SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_fund, funda);
SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_rms, rms);
SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_thd, thd);
SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_tree, three);
SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_five, five);
SetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_seven, seven);
plothandle[1]=PlotY(panel_hdl, zoom_fft,
dis, plotnum, 3, 0, 0, 15, 13);
}
rms=0;
}
GetUserEvent(0, &handle, &ctrl);
switch(ctrl)
{
case zoom_change:
flag=0;
sysflag=3;
UnloadPanel(panel1_hdl);
break;
case zoom_in_sel:
GetCtrlVal(panel1_hdl, zoom_in_sel, &channel);
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

// convert data to specify range
for(j=0;j<4;j++)
{
for (i = 0; i < NUMPTS; i++){plot[i]=0;samp[i].real=0;}
for (i = 0; i < NUMPTS; i++) /* Display data
*/
{
databuf = card(1*4+j) & 0xFF;
if(j==0)databuf = ( 25 - (-25)) * databuf / 4096 + (-25);
if(j==0)databuf = ( 380 - (-380)) * databuf / 4096 + (-380);
samp[i].real=(double)databuf;
plot[i]=databuf;
}
//harris(samp,plotnum);
do_fft(plotnum);
if(j!=0)
i_array[j-1]=rms;
if(j==0){v_a_angle=theta;v_a_rms=rms;}
else
{
switch(j)
{
case 1:
pf_a = find_pf(0,theta);
pf_array[0]=fabs(pf_a);
i_a_angle =v_a_angle-150-theta;
i_a_rms=rms;
break;
case 2:
pf_b = find_pf(1,theta);
pf_array[1]=fabs(pf_b);
i_b_angle =v_a_angle-150-theta;
i_b_rms=rms;
break;
case 3:
pf_c = find_pf(2,theta);
pf_array[2]=fabs(pf_c);
i_c_angle =v_a_angle-150-theta;
i_c_rms=rms;
break;
}
}
rms=0;
}
ctrl_trigger();

SetCtrlVal(panel2_hdl,stand_rms_a,i_a_rms);
SetCtrlVal(panel2_hdl,stand_rms_b,i_b_rms);
SetCtrlVal(panel2_hdl,stand_rms_c,i_c_rms);
SetCtrlVal(panel2_hdl,stand_pf_a,pf_a);
SetCtrlVal(panel2_hdl,stand_pf_b,pf_b);
SetCtrlVal(panel2_hdl,stand_pf_c,pf_c);
PlotStripChart (panel2_hdl, stand_amp,i_array, 4, 0, 0, 4);
PlotStripChart (panel2_hdl, stand_pf,pf_array, 4, 0, 0, 4);

GetUserEvent(0,&handle,&ctrl);
switch(ctrl)
{
case stand_change:
flag = 0;
sysflag = 1;
UnloadPanel(panel2_hdl);
break;
}
void fft(COMPLEX *x)
static int n = 1; /* length of fft stored for future */
COMPLEX u,temp,tm;
COMPLEX far *xi,*xip,*xj,*wptr;
int i,j,k,l,le,windex;

/* n = 2**m = fft length */
n = 1 << m;
lc = n/2;

/* start fft */

le = n;
windex = 1;
for (l = 0; l < m; l++)
{
le = le/2;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/* first iteration with no multiplies */
for(i = 0 ; i < n ; i = i + 2*le)
{
xi = x + i;
xip = xi + le;
temp.real = xi->real + xip->real;
temp.imag = xi->imag + xip->imag;
xip->real = xi->real - xip->real;
xip->imag = xi->imag - xip->imag;
*xi = temp;
}

/* remaining iterations use stored w */
wptr = w + windex - 1;
for (j = 1 ; j < le ; j++)
{
u = *wptr;
for (i = j ; i < n ; i = i + 2*le)
{
xi = x + i;
xip = xi + le;
temp.real = xi->real + xip->real;
temp.imag = xi->imag + xip->imag;
tm.real = xi->real - xip->real;
tm.imag = xi->imag - xip->imag;
xip->real = tm.real*u.real - tm.imag*u.imag;
xip->imag = tm.real*u.imag + tm.imag*u.real;
*xi = temp;
}
wptr = wptr + windex;
}
windex = 2*windex;

/* rearrange data by bit reversing */
j = 0;
for (i = 1 ; i < (n-1) ; i++)
{
k = n/2;
while(k <= j)
{
j = j - k;
k = k/2;
}
j = j + k;
}

if (i < j)
{
xi = x + i;
xj = x + j;
temp = *xj;
*xj = *xi;
*xi = temp;
}

void initfft(int k)
{
static int n=1;
int j,le;
COMPLEX far *xj;
double
arg,w_real,w_imag,wrecur_real,wrecur_imag,wtemp_real;
/* n = 2**m = fft length */
m = k;
n = 1 << m;
le = n/2;
/* calculate the w values recursively */
arg = 4.0*atan(1.0)/le; /* PI/le calculation */
wrecur_real = w_real = cos(arg);
wrecur_imag = w_imag = -sin(arg);
xj = w;
for (j = 1 ; j < le ; j++) {
xj->real = (float)wrecur_real;
xj->imag = (float)wrecur_imag;
xj++;
wtemp_real = wrecur_real*w_real - wrecur_imag*w_imag;
wrecur_imag = wrecur_real*w_imag + wrecur_imag*w_real;
wrecur_real = wtemp_real;
}
}

void do_fft(int plotnum)
{
double a, tempfft;
int r;
double i_dis;
for(i=0;i<plotnum;i++)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

dis[i]=0;

fft(samp);
theta=atan(fabs(samp[50].imag/samp[50].real));
theta=theta*180/3.1416;
if(samp[50].real<=0&& samp[50].imag>=0)
theta=180-theta;
else if(samp[50].real<=0&& samp[50].imag<=0)
theta=theta-180;
else if(samp[50].real>=0&& samp[50].imag<=0)
theta*=-1;
a = 4.0/((double)plotnum * plotnum);
for (i = 0 ; i < plotnum ; i++)
{
tempflt = samp[i].real * samp[i].real;
tempflt += samp[i].imag * samp[i].imag;
tempflt *= a;
samp[i].real =sqrt(fabs(tempflt));
dis[i]=samp[i].real;
if(i==50)funda=samp[i].real/sqrt(2);
if(i==150)three=samp[i].real;
if(i==250)five=samp[i].real;
if(i==350)seven=samp[i].real;
if((i%50)==0)rms+=(dis[i]*dis[i]);
samp[i].real=0;
samp[i].imag=0;
};
i_dis=sqrt(fabs(rms-funda*funda));
rms=sqrt(rms)/sqrt(2);
thd=(i_dis/funda)*100;
}

double find_pf(int phase,double phi)
{
double temp;
double distort;
double pf;
int sign;
switch(phase)
{
case 0:// phase a
temp = v_a_angle-150-phi;
temp = convert(temp)*3.14/180;
distort = funda/(rms+0.000001);
pf = distort*cos(temp);
break;

case 1:// phase b
temp = v_a_angle+90-phi;
temp = convert(temp)*3.14/180;
distort = funda/(rms+0.000001);
pf = distort*cos(temp);
break;

case 2://phase c
temp = v_a_angle-30-phi;
temp = convert(temp)*3.14/180;
distort = funda/(rms+0.000001);
pf = distort*cos(temp);
break;
}
sign= temp/fabs(temp);
return(sign*pf);
}

double convert(double value)
{
double temp;
double sign;
double aux;
sign = value/fabs(value); //sign of value
temp = value/sign; //no sign of value
if(temp>0 && temp<=90)
aux=temp;
else if(temp>90 && temp<=180)
aux=(180-temp);
else if(temp>180 && temp <=270)
aux=(temp-180);
else if(temp>270 && temp <=360)
aux=(360-temp);
else if(temp>360 && temp <=450)
aux=(temp-360);
else if(temp>450 && temp <=540)
aux=(540-temp);
if(temp>180&&temp<360)
return(-1*sign*aux);
else
return(sign*aux);
}

void win(int x)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int plotnum=NUMPTS;
int winflag,selectw;
switch(x)
{
case 0:
GetCtrlVal(panel_hdl,fast_win,&winflag);
if(winflag)
{
GetCtrlVal(panel_hdl,fast_wins,&selectw);
switch(selectw)
{
case 1:
han(samp,plotnum);
break;
case 2:
han(samp,plotnum);
break;
case 3:
triang(samp,plotnum);
break;
case 4:
black(samp,plotnum);
break;
case 5:
harris(samp,plotnum);
break;
}
}
break;
}
}

void digit_out(void)
{
unsigned int dummy;
unsigned int channel;
unsigned int baseI;
int i;

//initial digital output
// outportb(baseI+3,0);
// outportb(baseI+11,0);
baseI=param[1];

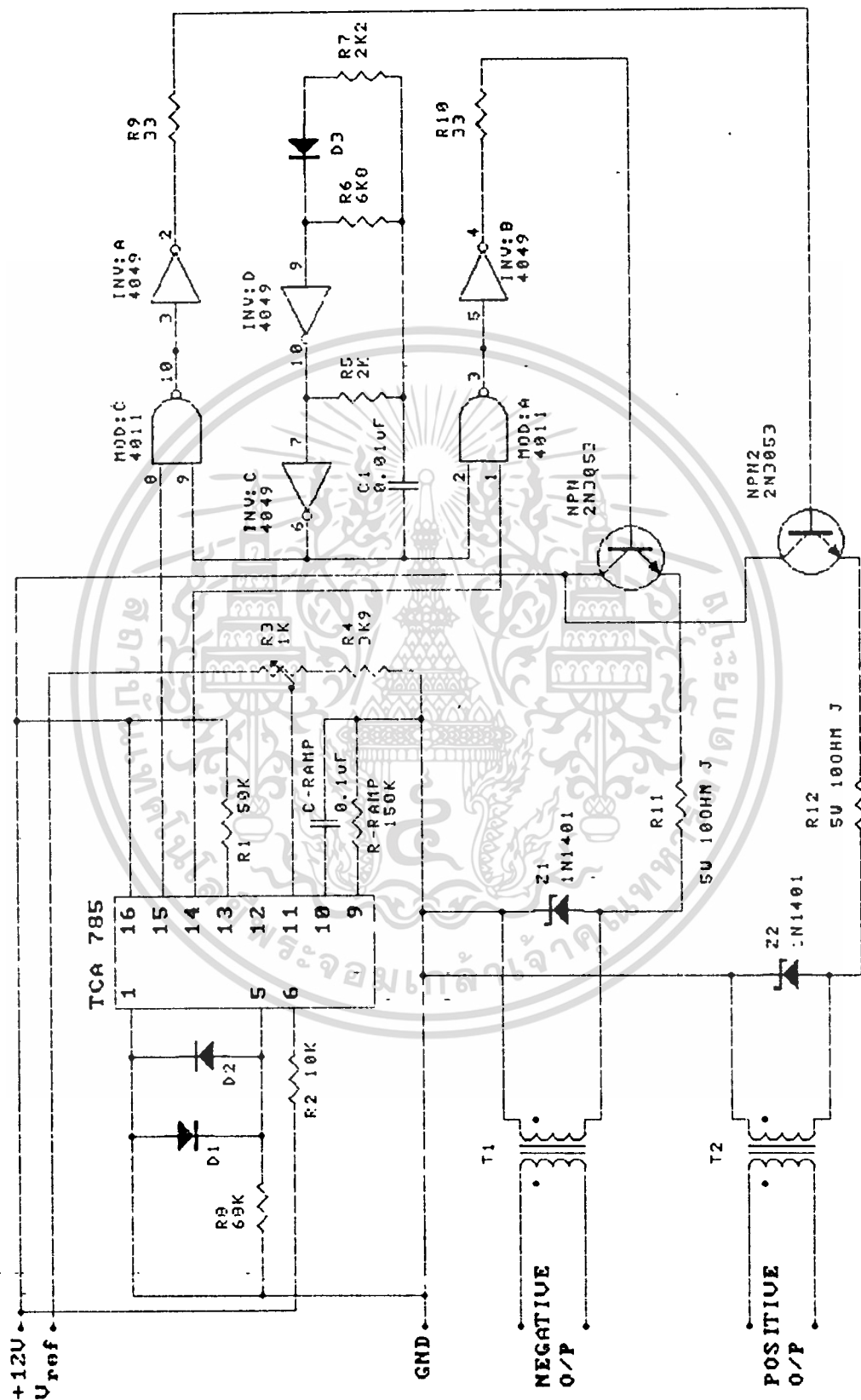
//write output
for(i=0;i<3;i++)
{
switch(i)
{
case 0:
channel=0x00; // z stage
outportb(baseI+11,channel);
outportb(baseI+3,data_z);
break;
case 1:
channel=0x01; // y stage
outportb(baseI+11,channel);
outportb(baseI+3,data_y);
break;
}
}
}

void stand_digit_out(void)
{
unsigned int channel;
unsigned int baseI;
int i;

baseI=param[1];
//write output
for(i=0;i<3;i++)
{
switch(i)
{
case 0:
channel=0x00; // z stage
outportb(baseI+11,channel);
outportb(baseI+3,data_z);
break;
case 1:
channel=0x01; // y stage
outportb(baseI+11,channel);
outportb(baseI+3,data_y);
break;
}
}
}

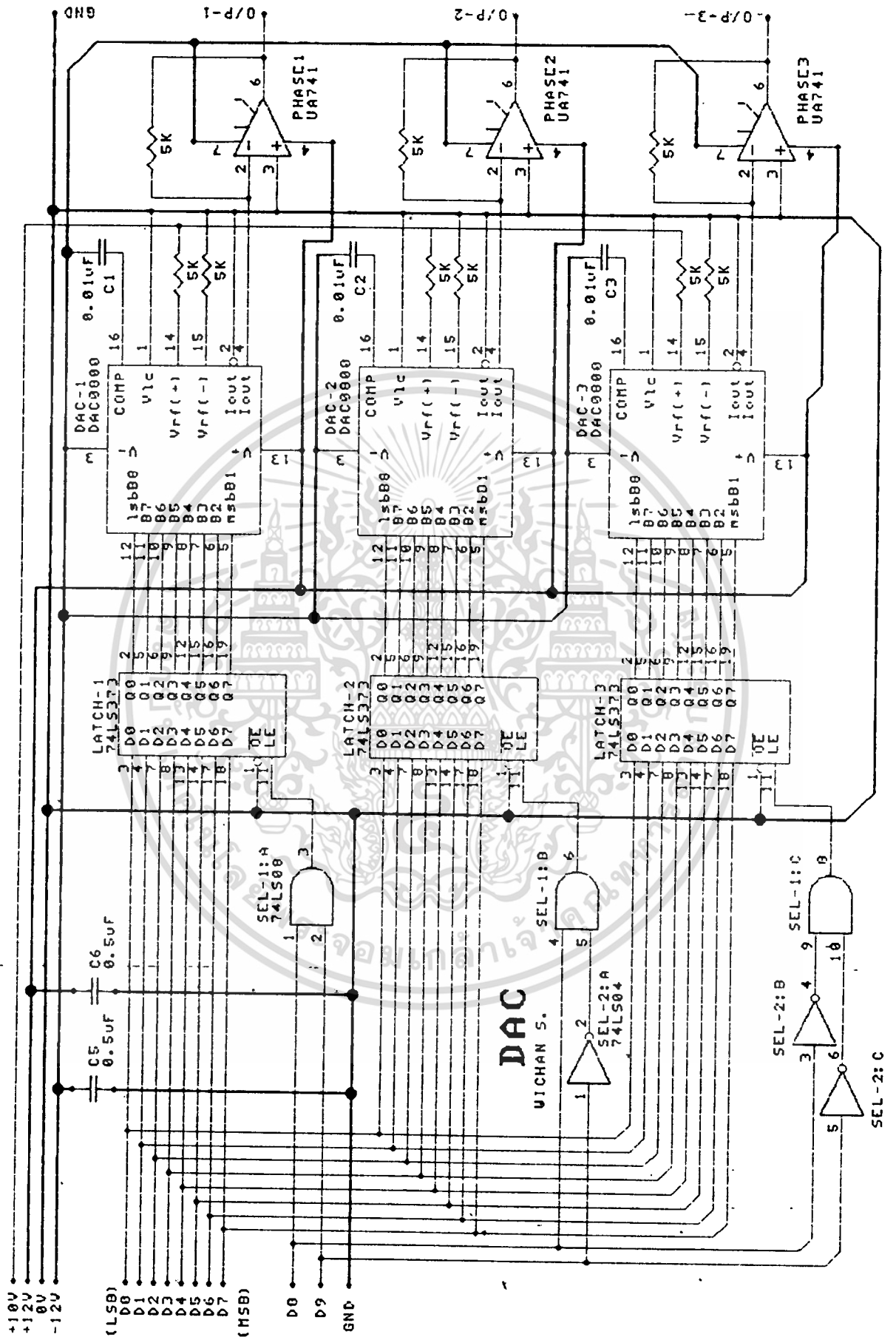
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพ วงจรจุดขนานไร้อัตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. L .A. Paziuk ,R.Hackman,Fellow"An expert microprocessor controlled Voltage Regulator for energy conservation and demand reduction in distributed feeders" ,IEEE trans.on Power Delivery,Vol 4,No 4,October,1989
2. Colonel Wn. T. Mclyman, "Tranformer and Inductor Design Handbook",Marcel Pekker,Inc ,1988
3. Damian A. Gonzalez, John C. Mccall " Design Of Filter to Reduce Harmonics Distortion in Industrial Power Systems", IEEE trans. on IA . Vol. 23 No3 May ,1987
4. T.J.E miller,"reactive power control in electric systems " John willey and sons,1982
5. วิมลภ สุรคำพลธร , ศ.ดร. " การประมวลผลสัญญาณเชิงเลข" ,ไคน่าพรินซ์ จำกัด, หน้า 116-125,2533
6. กิตติพงษ์ นามวงศ์ , จริพงษ์ ธนพัฒน์ชัยพงศ์, ชีรพล เปี่ยมวิริยะ, อภิสิทธิ์ ตรงศิริวัฒน์ ," แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง", ปรียญานิพนธ์ภาควิศวกรรมไฟฟ้า ตจล. 2536.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะ รศ.ดร. วิริยะ พิเชษฐจำเริญ และ อาจารย์ สมภพ ผลไม้ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา เป็นผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ และเอื้อเฟื้ออุปการณ์ ขอบขอบคุณ คุณศักดิ์ชัย บัวมุต ที่ช่วยเสนอแนวคิดพร้อมทั้งขอบขอบคุณ น้องบาส น้องชาญและน้องคัน ที่ช่วยกันสร้างชิ้นงาน พร้อมทั้งเพื่อนๆที่ช่วยให้กำลังใจในการทำงานอย่างเต็มที่ เพื่อให้งานสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายที่วางไว้

สุดท้ายหวังว่าปริญญาบัตรฉบับนี้ คงเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางสำหรับรุ่นน้องๆ และผู้ที่ต้องการศึกษาที่จะพัฒนาโครงการนี้ต่อไปในอนาคต

