สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

HV.DC. TRANSMISSION SYSTEM CONTROL WITH PC COMPUTER

โดย

นางสาวดารานี้อย นารีพล

นายดำรงค์เกียรติ รักษาสิริพงศ์

นางสาวทัศญา บุณยวานิชกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 34138
วัน, เดือน, ปี - 6 ต.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2541

การควบคุมระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
HV.DC. SYSTEM CONTROL WITH PC COMPUTER

โดย

นางสาวดารานี้อย นารีพล

นายดำรงค์เกียรติ รักษาสิริพงศ์

นางสาวทัศญา บุญยวานิชกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

ผู้จัดทำ

1. นางสาวดารานี้อย นารีพล
2. นายดำรงค์เกียรติ รักษาสิริพงศ์
3. นางสาวทัศญา บุญยวานิชกุล

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

นางสาวดารานัย นารีพล
นายดำรงค์เกียรติ รักษาสิริพงศ์
นางสาวทัศญา บุณยวานิชกุล
รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการพัฒนาการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมาแทนที่การควบคุมด้วยมือ เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของการเชื่อมโยงระบบกระแสสลับด้วยการเชื่อมโยงด้วยกระแสตรง ซึ่งการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์นี้จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าและทำการควบคุมได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลทางไฟฟ้าของระบบมาแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ได้ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงในโครงงานนี้จะเป็นแบบ 12 พัลส์ บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ 2 ชุด โดยต่ออนุกรมกันอยู่ทางด้านแรงดันกระแสตรงและต่อขนานกันทางด้านแรงดันกระแสสลับ ชุดหม้อแปลงซึ่งมีคุณลักษณะเหมือนกันจะต่อกันแบบสตาร์ – สตาร์ และ สตาร์ - เดลต้า ทำให้มุมของแรงดันเฟสของหม้อแปลงทั้ง 2 ชุดห่างกัน 30 องศา เพื่อช่วยลดผลของฮาร์โมนิคส์ เมื่อทำการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จะใช้การควบคุมมุมจุดชนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ให้ด้านส่งกำลังไฟฟ้าทำงานในโหมดเร็คติฟายและด้านรับกำลังไฟฟ้าทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HV.DC. SYSTEM CONTROL WITH PC COMPUTER

Daranoi Nareepon

Damrongkiet Raksasiripong

Tusya Bunyawanitkul

Vice Prof.Siriwat Pothiwechakul

1998

Abstract

This project purpose to develop the control technique of HV.DC. electrical power transmission by replacing manual control with personal computer and study the properties of linking AC systems by using DC links. The PC controller should increase the stability of system and make the controlling easier. Also , it will include PC monitor display for electrical data of system. The HV.DC. transmission system is a 12 pulse bride converter parallelled at the AC sides. The identical transformer sets connected star-star and star-delta creating a 30° phase shift to reduce the effects of harmonics. When electric power flow is in progress, the sending side is controlled to operate in rectifying mode and the receiving side is controlled to operate in inverting mode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 คำนำ	1
1.2 ขอบเขตการทำโครงงาน	1
1.3 วัตถุประสงค์	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยโครงงาน	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	5
2.1 ชนิดของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง	5
2.2 เปรียบเทียบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ	7
2.3 หลักการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	10
2.4 ส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากระแสตรง	11
2.5 การสร้างสัญญาณกระตุ้นคอนเวอร์เตอร์ด้วยไอซี TCA 785	12
2.6 คอนเวอร์เตอร์	14
2.7 ตัวประกอบกำลัง	23
บทที่ 3 การเชื่อมต่อชุดจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง	25
3.1 ภาคการรับข้อมูล	25
3.2 ภาคการแสดงผลข้อมูลจากการประมวลผล	27
3.3 ภาคการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างสองสถานีไฟฟ้าจำลอง	29
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	33
4.1 การทดลองที่ 1 ส่งกำลังไฟฟ้าที่แรงดันเท่ากัน ความถี่เท่ากัน	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
4.2 การทดลองที่ 2 ส่งกำลังไฟฟ้าที่แรงดันต่างกัน ความถี่เท่ากัน	60
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	84
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

บทที่ 1

รูปที่ 1.1 ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 4

บทที่ 2

รูปที่ 2.1 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว 6 พัลส์ 5

รูปที่ 2.2 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว 12 พัลส์ 6

รูปที่ 2.3 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียวร่วมกัน 6

รูปที่ 2.4 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว 6 พัลส์ 7

รูปที่ 2.5 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว 12 พัลส์ 7

รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ของระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า 9

รูปที่ 2.7 วงจรระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 10

รูปที่ 2.8 ลักษณะภายในของ ไอซี TCA 785 12

รูปที่ 2.9 สัญญาณที่ขาต่าง ๆ ของ ไอซี TCA 785 13

รูปที่ 2.10 สามเฟสฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์ 14

รูปที่ 2.11 ลำดับการทำงานของไทริสเตอร์ที่มุมจุดชนวน 60 องศา 15

รูปที่ 2.12 สัญญาณแรงดันทางด้าน DC ขณะปรับมุมการนำกระแสตั้งแต่ 0-180 17

รูปที่ 2.13 กระแสไลน์ของคอนเวอร์เตอร์ 18

รูปที่ 2.14 สัญญาณกระแสเมื่อเทียบกับแรงดันเฟสขณะปรับมุม α = 0-180 องศา 20

รูปที่ 2.15 รูปสัญญาณกระแสแบบ Quasi-Step 20

รูปที่ 2.16 รูปสัญญาณกระแสแบบ Six-Step 21

รูปที่ 2.17 คอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ 22

รูปที่ 2.18 แสดงแรงดันด้าน DC ของชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ 23

รูปที่ 2.19 แสดงกระแสทางด้านแหล่งจ่ายของชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ 23

บทที่ 3

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล 25

รูปที่ 3.2 วงจรพรีซิสชั่นฟูลเวฟเรคติฟายเออร์ 26

รูปที่ 3.3 วงจรอนาลอกทูดิจิตอล (Analog to Digital หรือ ADC) 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 แสดงหน้าจอปกติของโปรแกรม 28
รูปที่ 3.5 แสดงกราฟแรงดันที่บันทึกค่าไว้ 29
รูปที่ 3.6 แสดงการส่งค่าจากคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณทริก 30
รูปที่ 3.7 แสดงหน้าจอสภาวะส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากสับสเตชั่น A ไป
สับสเตชั่น B 30
รูปที่ 3.8 Control Panel 31
รูปที่ 3.9 แสดงหน้าจอสภาวะส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากสับสเตชั่น B ไป
สับสเตชั่น A 32

บทที่ 4

รูปที่ 4.1 วิธีการต่อวงจรเพื่อทำการทดลองการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า 34
รูปที่ 4.2 รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง) 37
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง) 37
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง) 37
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง) 37
รูปที่ 4.6 รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน ,ก่อนส่ง) 38
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน ,ก่อนส่ง) 38
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B (V เท่ากัน ,ก่อนส่ง) 38
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน B (V เท่ากัน ,ก่อนส่ง) 38
รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง) 39
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง) 39
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน , ก่อนส่ง) 39
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน , ก่อนส่ง) 39
รูปที่ 4.14 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน ,ก่อนส่ง) 40
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ด้าน A
(V เท่ากัน ,ก่อนส่ง) 40
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน ,ก่อนส่ง) 40
รูปที่ 4.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ด้าน B
(V เท่ากัน ,ก่อนส่ง) 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.18 รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B) 45
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B) 45
รูปที่ 4.20 รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน A
(V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B) 45
รูปที่ 4.21 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน A
(V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B) 45
รูปที่ 4.22 รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B) 46
รูปที่ 4.23 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B) 46
รูปที่ 4.24 รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B) 46
รูปที่ 4.25 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B) 46
รูปที่ 4.26 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B) 47
รูปที่ 4.27 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B) 47
รูปที่ 4.28 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B) 47
รูปที่ 4.29 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B) 47
รูปที่ 4.30 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B) 48
รูปที่ 4.31 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ด้าน A
(V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B) 48
รูปที่ 4.32 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B) 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.33 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B) 49
รูปที่ 4.34 แรงดันกระแสตรงด้าน A (V เท่ากัน, หลังส่ง A ไป B) 49
รูปที่ 4.35 แรงดันกระแสตรงด้าน B (V เท่ากัน, หลังส่ง A ไป B) 49
รูปที่ 4.36 แรงดันคร่อมเอสซีอาร์ด้าน A (V เท่ากัน, หลังส่ง A ไป B) 50
รูปที่ 4.37 แรงดันคร่อมเอสซีอาร์ด้าน B (V เท่ากัน, หลังส่ง A ไป B) 50
รูปที่ 4.38 รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A) 54
รูปที่ 4.39 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A) 54
รูปที่ 4.40 รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน A
(V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A) 54
รูปที่ 4.41 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน A
(V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A) 54
รูปที่ 4.42 รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A) 55
รูปที่ 4.43 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไปA) 55
รูปที่ 4.44 รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A) 55
รูปที่ 4.45 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A) 55
รูปที่ 4.46 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A) 56
รูปที่ 4.47 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A) 56
รูปที่ 4.48 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A) 56
รูปที่ 4.49 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A) 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.50 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A) 57
รูปที่ 4.51 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ด้าน A
(V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A) 57
รูปที่ 4.52 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A) 57
รูปที่ 4.53 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ด้าน B
(V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A) 58
รูปที่ 4.54 แรงดันกระแสตรงด้าน A (V เท่ากัน, หลังส่ง B ไป A) 58
รูปที่ 4.55 แรงดันกระแสตรงด้าน B (V เท่ากัน, หลังส่ง B ไป A) 58
รูปที่ 4.56 แรงดันคร่อมเอสซีอาร์ด้าน A (V เท่ากัน, หลังส่ง B ไป A) 59
รูปที่ 4.57 แรงดันคร่อมเอสซีอาร์ด้าน B (V เท่ากัน, หลังส่ง B ไป A) 59
รูปที่ 4.58 รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน ,ก่อนส่ง) 63
รูปที่ 4.59 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน ,ก่อนส่ง) 63
รูปที่ 4.60 รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B (V ต่างกัน ,ก่อนส่ง) 63
รูปที่ 4.61 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์โหลดด้าน B (V ต่างกัน , ก่อนส่ง) 63
รูปที่ 4.62 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน , ก่อนส่ง) 64
รูปที่ 4.63 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน , ก่อนส่ง) 64
รูปที่ 4.64 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน , ก่อนส่ง) 64
รูปที่ 4.65 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน , ก่อนส่ง) 64
รูปที่ 4.66 รูปคลื่นกระแสและแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน , ก่อนส่ง) 65
รูปที่ 4.67 รูปคลื่นกระแสและแรงดันคอนเวอร์เตอร์ด้าน B
(V ต่างกัน , ก่อนส่ง) 65
รูปที่ 4.68 รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B) 65
รูปที่ 4.69 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B) 69
รูปที่ 4.70 รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B) 69
รูปที่ 4.71 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน A
(V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B) 69
รูปที่ 4.72 รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B) 70
รูปที่ 4.73 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B) 70
รูปที่ 4.74 รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B
(V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B) 70
รูปที่ 4.75 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน B
(V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B) 70
รูปที่ 4.76 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B) 71
รูปที่ 4.77 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B) 71
รูปที่ 4.78 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B) 71
รูปที่ 4.79 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B) 71
รูปที่ 4.80 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B) 72
รูปที่ 4.81 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ด้าน A
(V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B) 72
รูปที่ 4.82 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B) 72
รูปที่ 4.83 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ด้าน B
(V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B) 73
รูปที่ 4.84 แรงดันกระแสตรงด้าน A (V ต่างกัน, หลังส่ง A ไป B) 73
รูปที่ 4.85 แรงดันกระแสตรงด้าน B (V ต่างกัน, หลังส่ง A ไป B) 73
รูปที่ 4.86 แรงดันคร่อมเอสซีอาร์ด้าน A (V ต่างกัน, หลังส่ง A ไป B) 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.87 แรงดันคร่อมเอสซีอาร์ด้าน B (V ต่างกัน, หลังส่ง A ไป B) 74
รูปที่ 4.88 รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A) 78
รูปที่ 4.89 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A) 78
รูปที่ 4.90 รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน A
(V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A) 78
รูปที่ 4.91 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน A
(V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A) 78
รูปที่ 4.92 รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A) 79
รูปที่ 4.93 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A) 79
รูปที่ 4.94 รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B
(V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A) 79
รูปที่ 4.95 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน B
(V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A) 79
รูปที่ 4.96 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A) 80
รูปที่ 4.97 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน, หลังส่ง B ไป A) 80
รูปที่ 4.98 รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A) 80
รูปที่ 4.99 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A) 80
รูปที่ 4.100 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A) 81
รูปที่ 4.101 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ด้าน A
(V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A) 81
รูปที่ 4.102 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งกำเนิดด้าน B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A) 81
รูปที่ 4.103 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ด้าน B
(V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A) 82
รูปที่ 4.104 แรงดันกระแสตรงด้าน A (V ต่างกัน, หลังส่ง B ไป A) 82
รูปที่ 4.105 แรงดันกระแสตรงด้าน B (V ต่างกัน, หลังส่ง B ไป A) 82
รูปที่ 4.106 แรงดันคร่อมเอสซีอาร์ด้าน A (V ต่างกัน, หลังส่ง B ไป A) 83
รูปที่ 4.107 แรงดันคร่อมเอสซีอาร์ด้าน B (V ต่างกัน, หลังส่ง B ไป A) 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 4

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองก่อนส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้าน Substation A (แรงดันเท่ากัน) 35
ตารางที่ 4.2 ค่าของกระแสและแรงดันก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A (แรงดันเท่ากัน) 35
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองก่อนส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้าน Substation B (แรงดันเท่ากัน) 36
ตารางที่ 4.4 ค่าของกระแสและแรงดันก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B (แรงดันเท่ากัน) 36
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A (ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B) 42
ตารางที่ 4.6 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้านSubstation A (ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B) 42
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B (ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B) 43
ตารางที่ 4.8 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้านSubstation B (ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B) 43
ตารางที่ 4.9 ค่ากระแสและแรงดันในสายส่งขณะส่งถ่ายกำลังงาน จาก Substation A ไป Substation B 50
ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A (ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A) 51
ตารางที่ 4.11 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้านSubstation A (ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A) 51
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B (ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A) 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้านSubstation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A) 52
ตารางที่ 4.14 ค่ากระแสและแรงดันในสายส่งขณะส่งถ่ายกำลังงาน
จาก Substation B ไป Substation A 53
ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองก่อนส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้าน Substation A
(แรงดัน ต่างกัน) 61
ตารางที่ 4.16 ค่าของกระแสและแรงดันก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน
Substation A (แรงดันต่างกัน) 61
ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองก่อนส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้าน Substation B
(แรงดันต่างกัน) 62
ตารางที่ 4.18 ค่าของกระแสและแรงดันก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน
Substation B (แรงดันต่างกัน) 62
ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B) 66
ตารางที่ 4.20 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้านSubstation A
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B) 66
ตารางที่ 4.21 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B) 67
ตารางที่ 4.22 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้านSubstation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B) 67
ตารางที่ 4.23 ค่ากระแสและแรงดันในสายส่งขณะส่งถ่ายกำลังงาน
จาก Substation A ไป Substation B 68
ตารางที่ 4.24 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A) 75
ตารางที่ 4.25 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้านSubstation A
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A) 75
ตารางที่ 4.26 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A) 76
ตารางที่ 4.27 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้านSubstation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A) 76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.28 ค่ากระแสและแรงดันในสายส่งขณะส่งถ่ายกำลังงาน
จาก Substation B ไป Substation A 76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 คำนำ

เนื่องจากการเจริญเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมและการขยายตัวของชุมชนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้ระบบผลิตและระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจำเป็นที่จะต้องแบกรับภาระสูงขึ้น ในขณะที่ทรัพยากรต่าง ๆ ที่เรานำมาแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าก็ลดลงไปตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของการใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ให้มีประโยชน์สูงสุด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาระบบผลิตและระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ในปัจจุบันจะทำการส่งจ่ายด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับแต่ยังมีจุดด้อยอยู่หลายประการ เช่น ค่าการสูญเสียขณะส่งจ่ายด้วยระยะทางไกล ๆ ประสิทธิภาพและการเชื่อมโยงระบบเอซีสองระบบที่มีความถี่แตกต่างกัน จึงได้มีการพัฒนาระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นมาใช้งาน

ในโครงงานนี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ ซึ่งแต่เดิมควบคุมระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงด้วยบุคคล (manual operation) การควบคุมด้วยวิธีนี้ทำให้การดำเนินงานยุ่งยาก ขาดความแน่นอน และอาจทำให้เกิดอันตรายแก่บุคคล จึงได้มีการพัฒนาการควบคุมระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล(PC Computer) ขึ้นมาแทนที่ เพื่อให้เกิดความสะดวกสบายขณะดำเนินงาน และทำให้การควบคุมระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.2 ขอบเขตการทำโครงงาน

เพื่อทำการศึกษา ค้นคว้า พัฒนา และสร้างชุดควบคุมแบบจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเป็นตัวควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า โดยการเชื่อมโยงระบบกระแสสลับสองระบบเข้าด้วยกัน และสามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มาแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ได้

1.3 วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาเทคนิคการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบสองควอร์ดแรนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เพื่อศึกษาการควบคุมระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
3) เพื่อศึกษาการเชื่อมโยง (Interfacing) ระหว่างอุปกรณ์ภายนอกกับคอมพิวเตอร์ โดยมีการรับข้อมูลระดับแรงดันและกระแสเป็นสัญญาณอนาลอก มาแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ และสามารถควบคุมมุมจุดชนวนให้เอสซีอาร์ทำงานโดยผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้
4) เพื่อศึกษาการส่งจ่ายพลังงานระหว่างสองแหล่งจ่ายที่มีความถี่แตกต่างกัน
5) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง
6) เพื่อเป็นพื้นฐานในการวิจัยและพัฒนาระบบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยโครงงาน

1) เป็นการนำเอาอิเล็คทรอนิคส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานกับระบบส่งไฟฟ้ากำลัง
2) เป็นแนวทางที่จะพัฒนาระบบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
3) เป็นการนำเอาคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมาประยุกต์ใช้งานเป็นส่วนควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังได้
4) เป็นแนวทางในการนำคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมาประยุกต์ใช้งานเป็นส่วนควบคุมของระบบอื่น ๆ ได้
5) สามารถใช้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นข้อมูลอ้างอิงได้สำหรับผู้ที่สนใจการควบคุมระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

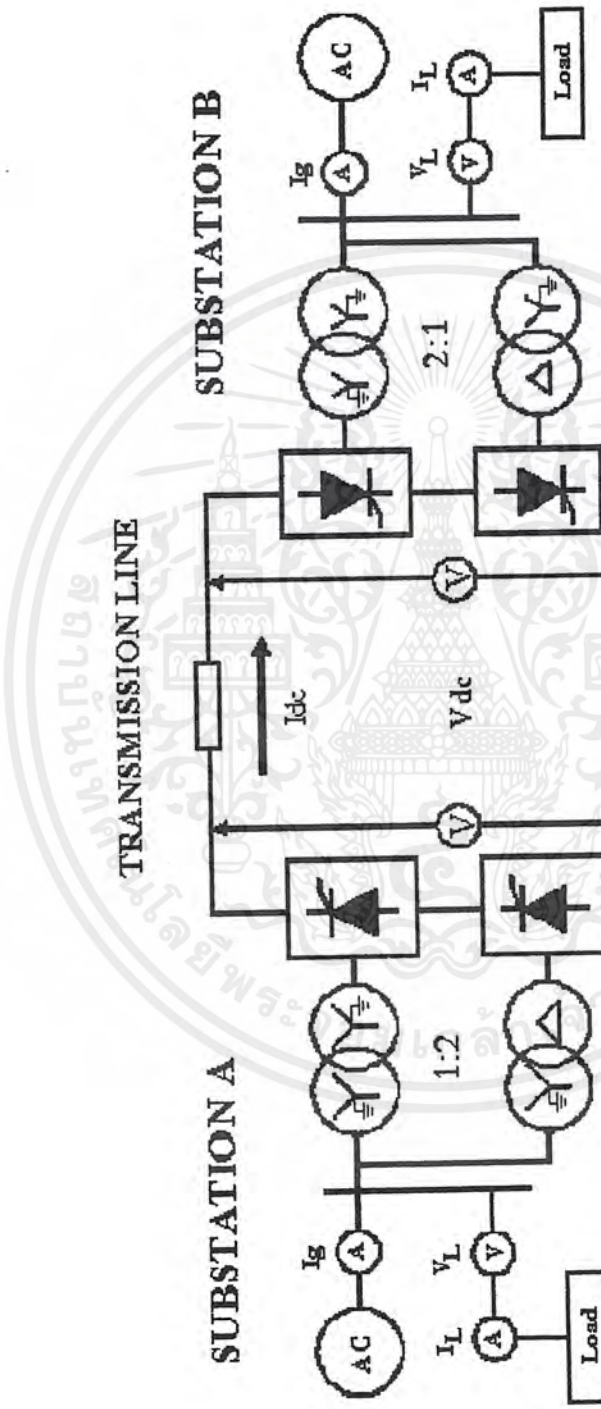
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1) ศึกษาการทำงานของชุดจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง
2) ศึกษาการทำงานของชุดจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์
3) ศึกษาการเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
4) ศึกษาวงจรอนาลอกทูดิจิตอล (A/D) วงจรดิจิตอลทูอนาลอก (D/A) วงจรฟูลเวฟเรคติฟายร์และภาษาเดลไฟล์ (Delphi) เพื่อใช้เขียนโปรแกรมควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) สร้างวงจรอนาลอกทูดิจิตอล (A/D) วงจรดิจิตอลทูอนาลอก (D/A) วงจรฟูลเวฟ เรคติฟายร์ ชุดตรวจจับสัญญาณกระแส ชุดตรวจจับสัญญาณแรงดัน และเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน
6) ทดลองจ่ายโหลด
7) บันทึกผลการทดลอง และนำผลการทดลองไปวิเคราะห์
7) สรุปผลการทดลอง พร้อมทั้งระบุให้เห็นปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะในการพัฒนาระบบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

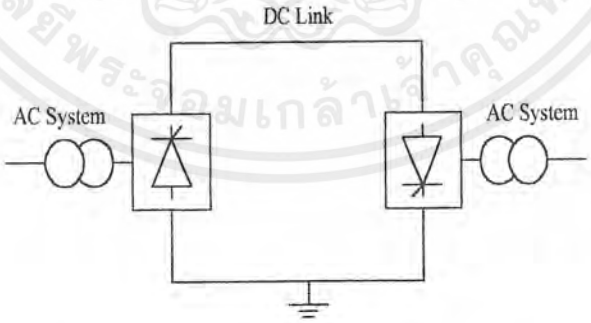
ในบทนี้ได้กล่าวถึงชนิดและรูปแบบต่าง ๆ ของระบบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์และ 12 พัลส์ รวมทั้งข้อดีข้อเสียของการเชื่อมโยงระบบดีซีเมื่อเทียบกับระบบเอซีที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันและอธิบายลำดับขั้นตอนของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในสภาวะต่าง ๆ อย่างละเอียด

2.1 ชนิดของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสามารถ แบ่งได้เป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ ดังนี้

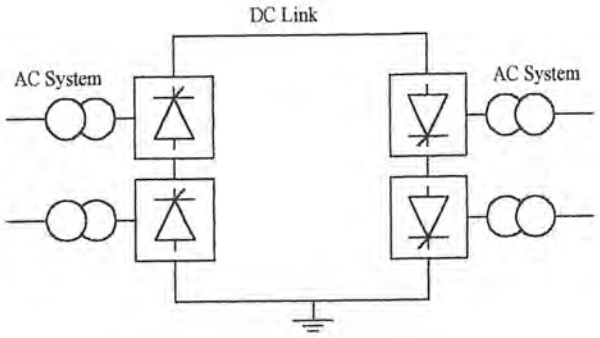
2.1.1 ระบบขั้วเดียว (Monopolar Link)

ในระบบนี้จะมีสายส่งที่เป็นตัวนำเพียงเส้นเดียวซึ่งส่วนมากจะใช้สายส่งกำลังแบบ Overhead Line หรือสายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine) หรือใช้ทั้งสองแบบรวมกันและจะใช้พื้นดินหรือทะเลเป็นตัวส่งกลับ โดยส่วนใหญ่จะมีศักดาทางไฟฟ้าที่สายส่งกำลังเป็นลบดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นการส่งด้วยคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ และรูป 2.2 เป็นการส่งด้วยคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์



รูปที่ 2.1 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว 6 พัลส์

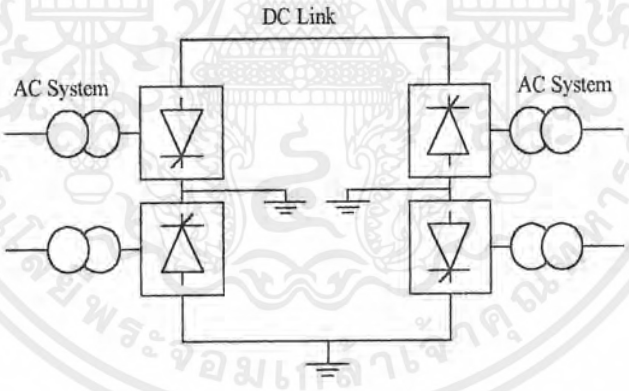
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว 12 พัลส์

2.1.2 ระบบขั้วเดียวร่วมกัน (Homopolar Link)

ในระบบนี้ใช้สายส่งตัวนำสองตัว ซึ่งมีศักดาไฟฟ้าเป็นลบ (-) ทั้งสองเส้น แล้วใช้พื้นดินเป็นทางเดินกลับ ถ้าหากเกิดมีเหตุเสียหรือข้อผิดพลาด (Fault) บนตัวนำใดตัวนำหนึ่ง ตัวนำที่เหลืออยู่จะทำหน้าที่จ่ายโหลดเต็มพิกัดแทนตัวนำที่เสียไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3

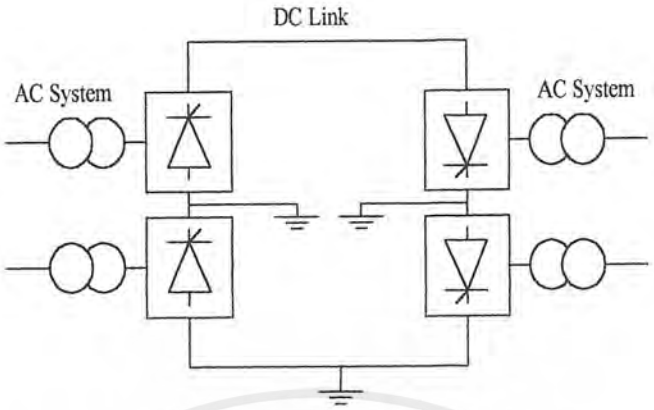


รูปที่ 2.3 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียวร่วมกัน

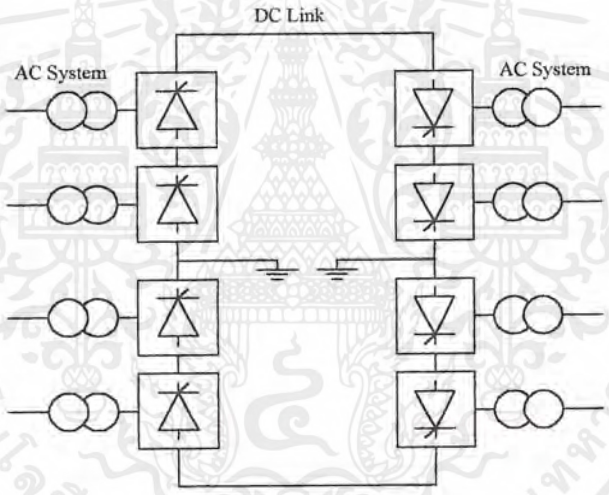
2.1.3 ระบบสองขั้ว (Bipolar Link)

ในระบบนี้จะมีตัวนำอยู่สองตัวนำโดยตัวนำแต่ละตัวจะมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวก (+) และลบ (-) ซึ่งแต่ละขั้วจะมีชุดคอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นอิสระต่อกัน เมื่อเกิดเหตุเสียใด ๆ ขึ้นบนตัวนำใดตัวนำหนึ่งตัวนำที่เหลือก็จะทำการจ่ายโหลดเพียงครึ่งหนึ่งของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว (6 พัลส์)



รูปที่ 2.5 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว (12 พัลส์)

2.2 เปรียบเทียบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

ข้อดี

1) เมื่อใช้สายตัวนำรวมเท่ากัน ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะสามารถส่งจ่ายพิกัดกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการส่งด้วยระบบไบโพลา (Bipolar) จะมีสายส่งตัวนำเส้นหนึ่งมีศักดาไฟฟ้าเป็นขั้วบวกเทียบกับกราวน์และอีกเส้นหนึ่งมีศักดาไฟฟ้าเท่ากันแต่มีขั้วศักดาไฟฟ้าเป็นลบหรือเรียกอีกอย่างว่าระบบสองขั้ว ทำให้มีค่าระดับแรงดันเป็น $\pm V_{dc}$ และยังสามารถใช้สายตัวนำเพียงเส้นเดียวในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าโดยมีทางเดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับด้วยพื้นดินได้ เป็นผลให้ค่าความต้านทานของระบบกระแสตรงต่ำกว่ากระแสสลับ ซึ่งเรียกว่าระบบขั้วเดียว (Monopolar) โดยมีค่าแรงดันเป็น $+V_{dc}$ หรือ $-V_{dc}$

2) การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง จะมีประสิทธิภาพและโวลท์เตจเรคกูเลชั่นดีกว่าระบบจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อพิจารณาถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรจะพบว่าสำหรับการส่งจ่ายกำลังงานด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ

AC JOULE LOSSES PER CIRCUIT

$$3I^2R \times \text{Length}$$

เมื่อ

$$I = \frac{power}{\sqrt{3}V(0.9)}$$

เมื่อส่งจ่ายด้วยระบบการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงระบบสองขั้ว

AC JOULE LOSSES PER BIPOLE

$$2I^2R \times \text{Length}$$

เมื่อ

$$I = \frac{power}{V1-V2}$$

R = Bundle resistance/km

สำหรับโวลท์เตจเรคกูชั่นของระบบส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรง จะมีค่าต่ำเพราะว่าผลของแรงดันไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่งจะมีผลจากความต้านทานเพียงอย่างเดียว เนื่องมาจาก $\omega=0$ จึงไม่มีผลของค่าความเหนี่ยวนำมาเกี่ยวข้อง และปัญหาที่เกิดจากผลของค่าความจุไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าอัดประจุ (Charging Current) ก็จะไม่เกิดขึ้นในระบบการส่งจ่ายกำลังงานด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

3) ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง จะมีความน่าเชื่อถือสูงในด้านความมั่นคงของการส่งกำลังงานไฟฟ้าเนื่องจากระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้วจะมีความสามารถส่ง

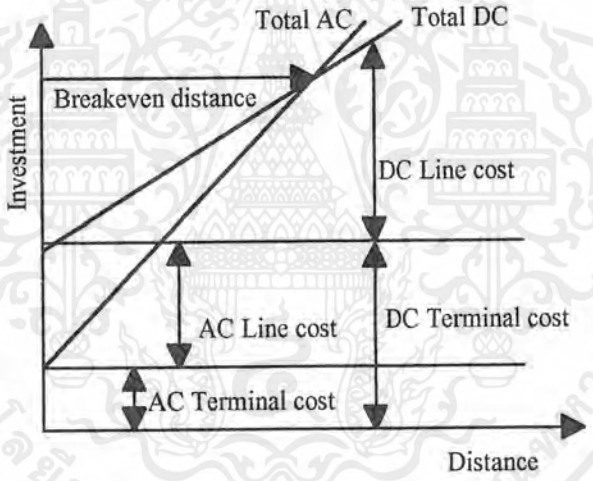
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งถ้าเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบสองขั้ว สายตัวนำหนึ่งในสองของระบบสองขั้วจะถูกต่อลงกราวด์ ระบบสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้โดยระบบขั้วเดียวแทน

4) ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะสามารถเชื่อมโยงระบบที่มีความถี่แตกต่างกันได้ เนื่องจากไม่ต้องมีระบบการซิงโครไนซ์ (Synchronization)

ข้อเสีย

1) ราคาของอุปกรณ์ชุดคอนเวอร์เตอร์ยังมีราคาแพง ซึ่งทำให้ไม่คุ้มทุนเมื่อเทียบกับระบบไฟกระแสสลับ แต่ที่ระยะทางไกล (เกินกว่า 800 กม.) ค่าใช้จ่ายของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะมีราคาถูกกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ของระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

2) ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ยังไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าระดับแรงดันได้เหมือนระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง(Power Transformer) ซึ่งมีกำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงน้อยมาก

3) ยังไม่มีอุปกรณ์ตัดตอนที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง เนื่องจากระบบไฟฟ้ากระแสตรงจะมีกระแสไหลต่อเนื่องตลอดเวลาซึ่งจะทำให้เกิดการอาร์ค (Arc) ได้ง่ายและรุนแรง ขณะที่หน้าสัมผัสของอุปกรณ์ตัดตอนแยกออกจากกันขณะมีโหลด ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนานำเอาสารกึ่งตัวนำมาใช้เป็นสวิทซ์

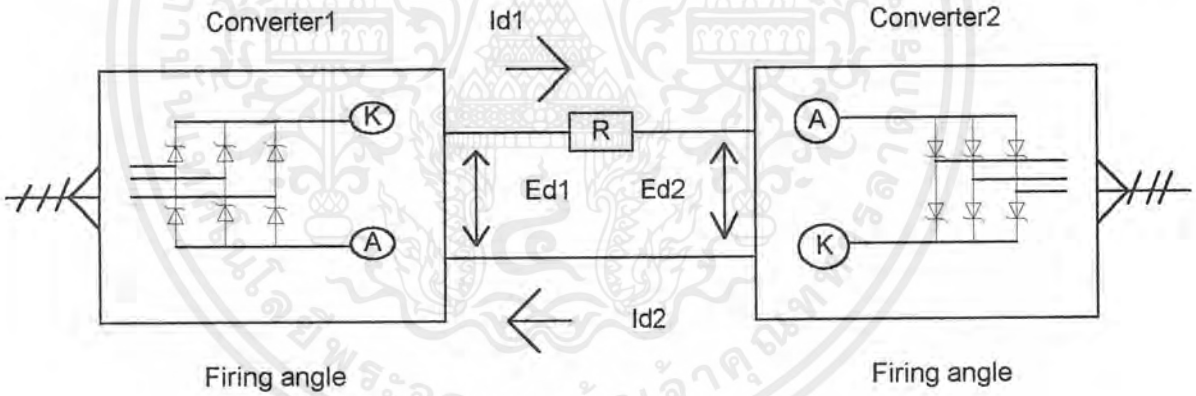
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เนื่องจากมีฮาร์โมนิคส์ (Harmonics) เกิดขึ้นภายในระบบ ทำให้ต้องเพิ่มชุดเอซีและดีซีฟิลเตอร์ (AC & DC Filter) เข้าไป ดังนั้นค่าใช้จ่ายในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจึงเพิ่มสูงขึ้น

5) การควบคุมมีความซับซ้อนมากกว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

2.3 หลักการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

เราสามารถเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งที่อยู่ห่างไกลกันเข้าด้วยกันโดยผ่านทางสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งมีชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ปลายด้านหนึ่งของสายส่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (AC/DC Converter) เพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เรียกว่า เรคติฟายเออร์ ในขณะที่มีคอนเวอร์เตอร์อีกชุดหนึ่งต่ออยู่ทางด้านปลายสายส่ง ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงกลับไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (DC/AC Converter) เพื่อนำไฟฟ้ากระแสสลับไปใช้งานต่อไป เรียกว่า อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.7 วงจรระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

จากรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นลักษณะของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าต้องการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากโครงข่าย 1 ไปยังโครงข่าย 2 จะต้องปรับมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ทางด้านส่งให้ทำงานในโหมดเร็คติฟายเออร์ ซึ่งประกอบด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ 2 ชุดต่ออนุกรมกัน โดยคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 จะมีแรงดันเอาท์พุทล้าหลังคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 อยู่ 30 องศา เนื่องจากหม้อแปลงทางด้านอินพุทของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 ต่อแบบ YD11 ซึ่งจะเป็นผลให้แรงดันเอาท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พุทที่สายส่งมีการกระเพื่อม (Ripple) ความถี่ 12 เท่าของความถี่ของไฟเอซี และกำลังไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะถูกส่งผ่านไปโดยระบบสายส่งสองเส้น จากนั้นจะต้องปรับมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ทางด้านรับให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะทำการเปลี่ยนกลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเชื่อมต่อกับโครงข่าย 2 จะเห็นได้ว่าการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งสามารถมีความถี่ที่แตกต่างกันได้ ทิศทางการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสามารถกลับทางการส่งได้โดยเปลี่ยนลักษณะการควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์

2.4 ส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากระแสตรง

อุปกรณ์ในระบบประกอบด้วย

1) ชุดคอนเวอร์เตอร์12 พัลส์

ทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรือไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งขึ้นอยู่กับการควบคุมมุมจุดชนวน

2) หม้อแปลง

หม้อแปลง พิกัด 1 kVA 1 เฟส จำนวน 6 ตัว ต่อแบบสตาร์/สตาร์ อัตราส่วน 1:2 และจำนวน 6 ตัว ต่อแบบสตาร์/เดลต้า อัตราส่วน $1:2\sqrt{3}$

3) สมูทติ้งรีแอคเตอร์

ลดอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสในขณะที่ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ และจำกัดค่ายอดของกระแสในวงจรเรคติไฟเออร์ที่เกิดจากการลัดวงจรในสายส่ง

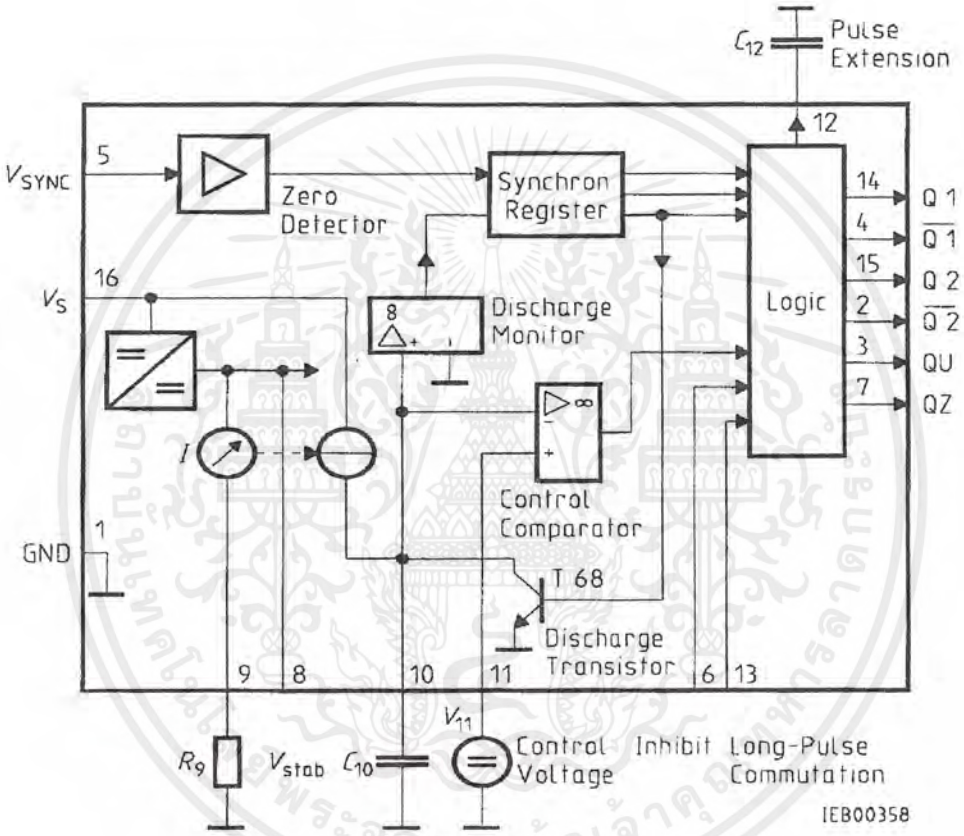
4) วงจรสนับเบอร์

ทำหน้าที่จำกัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวไทริสเตอร์ในขณะที่เกิดสภาวะ turn-off transient จำกัดกระแสที่จ่ายให้กับตัวไทริสเตอร์ในขณะที่เกิดสภาวะ turn-on transient จำกัดอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส (di/dt) และอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดัน (dv/dt) รวมทั้งกำหนดทิศทางการไหลของกระแสที่ผ่านตัวอุปกรณ์ในขณะที่ turn-on และ turn-off

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การสร้างสัญญาณกระตุ้นคอนเวอร์เตอร์ด้วยไอซี TCA 785

ในส่วนของวงจรการสร้างสัญญาณกระตุ้นใช้ไอซี TCA 785 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับระดับแรงดันควบคุมและได้สัญญาณทริกขาเกตของไทริสเตอร์เพื่อควบคุมการปิด - เปิดวาล์วของคอนเวอร์เตอร์

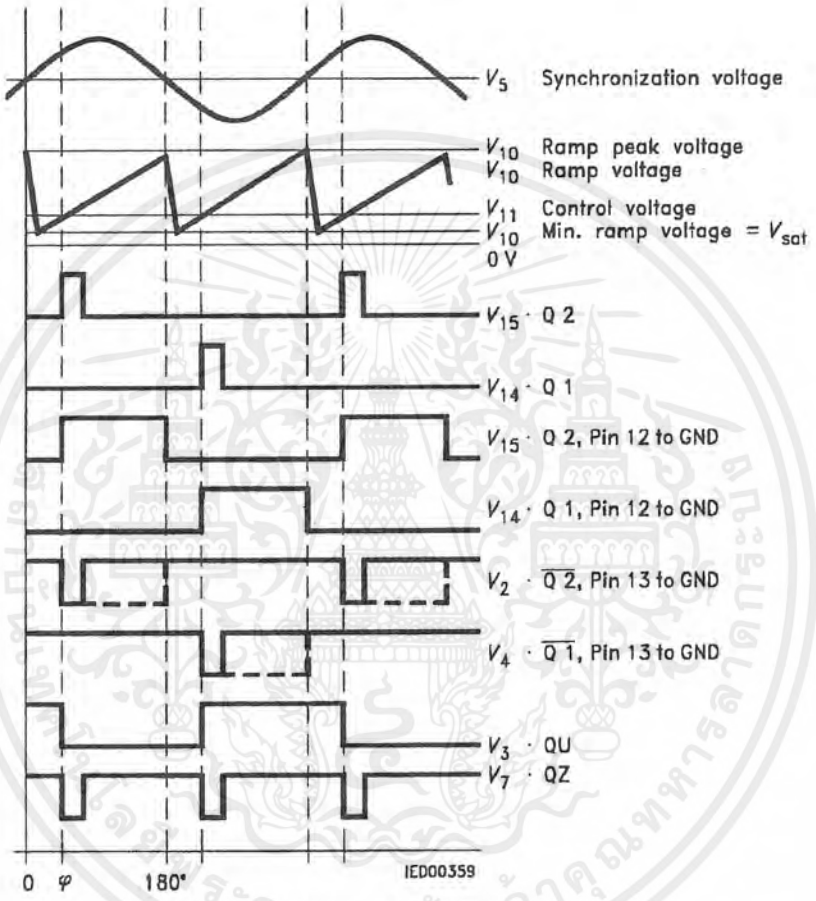


รูปที่ 2.8 ลักษณะภายในของไอซี TCA 785

เริ่มด้วยการนำสัญญาณซิงค์ จากแหล่งจ่ายที่ต้องการควบคุมด้วยคอนเวอร์เตอร์มาจำกัดกระแสให้เหมาะสมแล้วต่อเข้าที่ขา 5 ของไอซี จากนั้นสัญญาณจะผ่านวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์ไปยังส่วนของวงจรซิงโครไนซ์รีจีสเตอร์ ซึ่งควบคุมการสร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เกิดจากการเก็บประจุของ C_{10} ด้วยกระแสคงที่ ซึ่งกำหนดความชันของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมด้วย R_3 แล้วนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปเปรียบเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าทางขา 11 และสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบจะถูกนำไปสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อนำไปควบคุมเอสซีอาร์ สัญญาณพัลส์ที่ได้จะต่างเฟสกัน 180 องศา ในโครงงานต้องการใช้สัญญาณกระตุ้นถึง 12 ชุด เพื่อนำไปควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ จำนวน 2 ชุด ให้สามารถทำงานได้



รูปที่ 2.9 สัญญาณที่ขาต่าง ๆ ของไอซี TCA 785

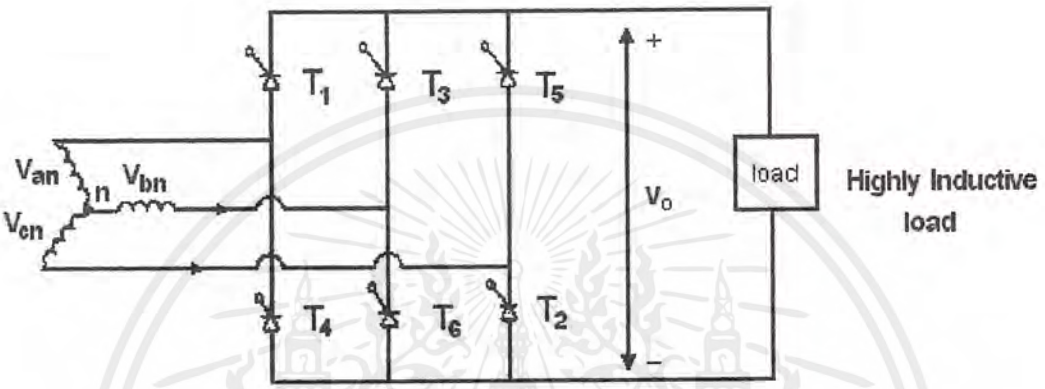
2.6 คอนเวอร์เตอร์

ในการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรง สิ่งที่สำคัญในการแปลงระบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงหรือแปลงจากระบบไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับก็คือชุดคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งในการทำโครงงานนี้ใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส ฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้อุปกรณ์ไทริสเตอร์ (SCR) เป็นอุปกรณ์สวิทชิ่ง ในการทำงานของคอนเวอร์เตอร์นี้สามารถทำงานได้สองโหมดคือโหมดเรคติฟายเออร์และโหมดอินเวอร์เตอร์ โดยในส่วนนี้จะอธิบายถึงการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 12 พัลส์ รวมไปถึงผลกระทบต่าง ๆ ที่มีผลต่อระบบอาทิเช่น ผลกระทบจากฮาร์โมนิคส์และการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณกระแสและแรงดันทางด้านระบบเอซี

2.6.1 ชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์

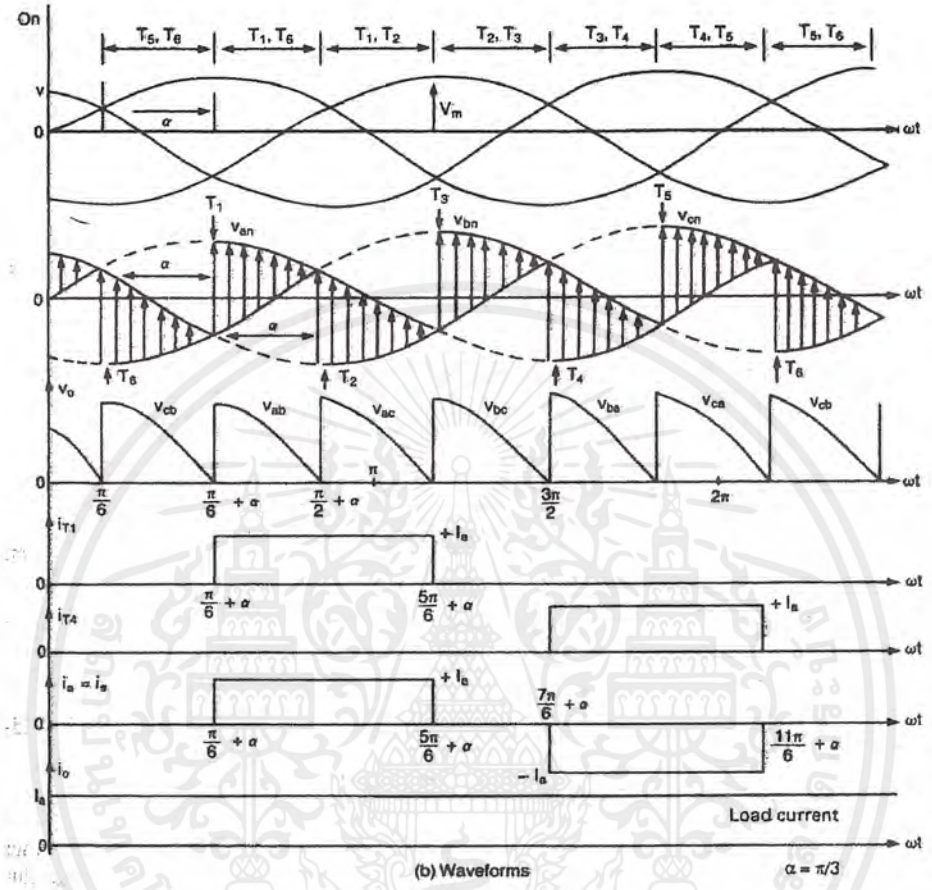


รูปที่ 2.10 สามเฟส ฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์

ในการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์สามเฟส สามารถควบคุมการทำงานของไทริสเตอร์ได้สองโหมด คือ โหมดเรคติฟายเออร์และโหมดอินเวอร์เตอร์ โดยที่การทำงานในโหมดเรคติฟายเออร์จะต้องปรับมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์อยู่ระหว่าง 0 องศาถึง 90 องศาและในกรณีที่ต้องการให้ชุดคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์จะต้องปรับมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ที่มุมระหว่าง 90 องศากับ 180 องศา ซึ่งจะกล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป จากรูปที่ 2.10 สามารถนำมาเขียนลำดับการทำงานของไทริสเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

เมื่อพิจารณามุมจุดชนวนให้ไทริสเตอร์นำกระแสที่มุม 0 องศาโดยจ่ายแรงดันกระแสสลับสามเฟสให้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะแรก แรงดันที่เฟสเอเป็นบวกและแรงดันเฟสบีเป็นลบทำให้ไทริสเตอร์ T1 และ T6 นำกระแส ในเวลาต่อมาแรงดันเฟส A เป็นบวกและแรงดันเฟส C เป็นลบทำให้ไทริสเตอร์ T1 และ T2 นำกระแส ซึ่งสามารถสรุปการทำงานของไทริสเตอร์ต่อไปเป็นคู่ ๆ ดังนี้คือ 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-1, 1-2 ตามรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ลำดับการทำงานของไทริสเตอร์ที่มุมจุดชนวน 60 องศา

โดยเมื่อต้องการหาแรงดันเอาท์พุทสามารถพิจารณาจากรูปสัญญาณ V_{dc} ที่เกิดจากคู่ของไทริสเตอร์คู่ใดคู่หนึ่งก็ได้ ยกตัวอย่างเช่น ไทริสเตอร์ T1 กับ T6 ซึ่งมีแรงดัน V_{ab} จ่ายให้กับโหลด และพื้นที่ใต้กราฟของแรงดันอยู่ในช่วง $\frac{\pi}{6}+\alpha < \omega t < \frac{\pi}{2}+\alpha$ และสามารถนำค่าต่าง ๆ เขียนเป็นสมการแรงดัน Line-Neutral ของแต่ละเฟส

$$V_{an} = V_m \sin \omega t \qquad (2.1)$$

$$V_{bn} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \qquad (2.2)$$

$$V_{cn} = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแรงดัน Line-to-Line

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \tag{2.4}$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{2.5}$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right) \tag{2.6}$$

แรงดันทางด้านดีซี คือ

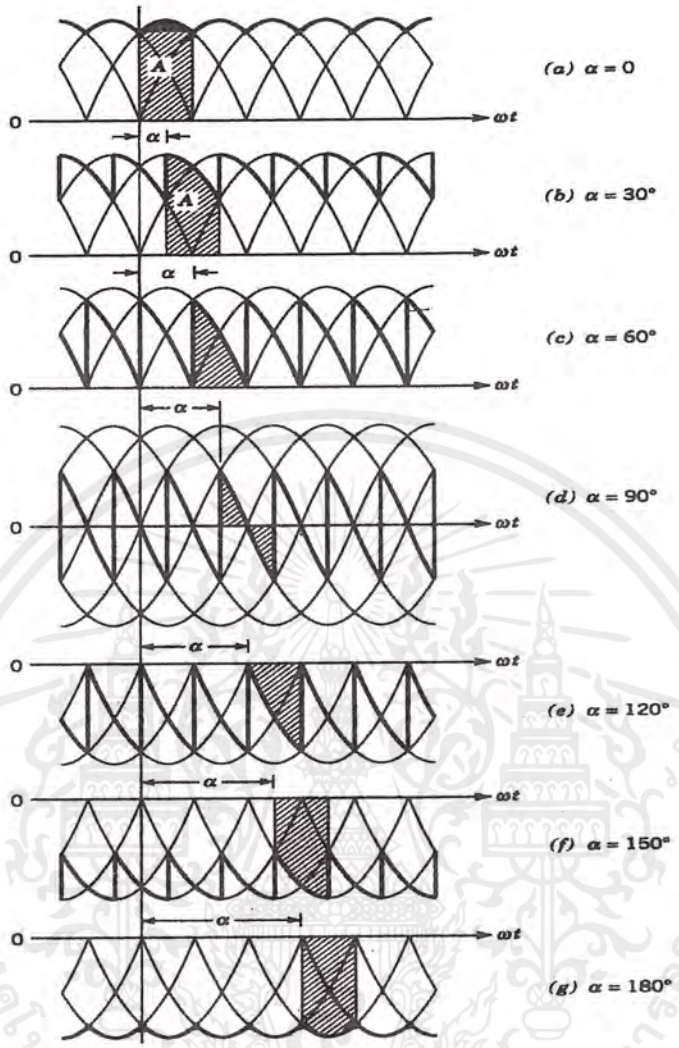
$$V_{dc} = \frac{3}{\pi}\int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} V_{ab}\, d(\omega t) = \frac{3}{\pi}\int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t)$$

$$= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos\alpha \tag{2.7}$$

แรงดันทางด้านระบบดีซีที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.7 แสดงให้เห็นโหมดการทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์ โดยในโหมดเรคติฟายต้องปรับมุมการนำกระแสอยู่ในช่วง 0 ถึง 90 องศา (แรงดันทางด้านดีซีเป็นบวก) และในโหมดอินเวอร์เตอร์ต้องปรับมุมการนำกระแสอยู่ในช่วง 90 ถึง 180 องศา (แรงดันทางด้านดีซีเป็นลบ) ตามรูปที่ 2.12 เป็นการปรับมุมการนำกระแสไทริสเตอร์ตั้งแต่ 0-180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

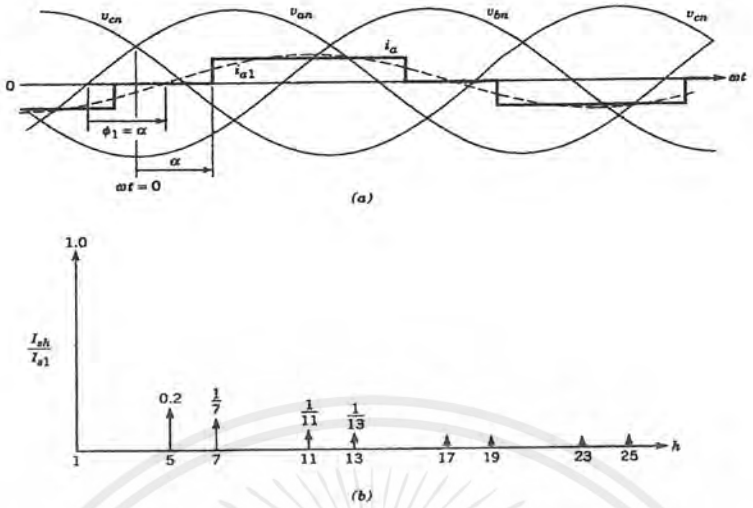
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.12 สัญญาณแรงดันทางด้านดีซีขณะปรับมุมการนำกระแส 0 ถึง 180 องศา

ชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ จะมีรูปร่างกระแสด้านเอซี (Input Line Current) และฮาร์โมนิค ดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
34138



รูปที่ 2.13 กระแสไลน์ ของคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.12

จากรูปสัญญาณกระแสทางด้านอินพุทในขณะที่มีการต่อหม้อแปลงแบบ สตาร์/สตาร์ จะมีรูปสัญญาณ เป็น Quasi Step ดังรูปที่ 2.14 เราสามารถวิเคราะห์สัญญาณกระแส i_a โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์

$$i_a(t) = I_{dc} + \sum_{n=1,2...}^{\infty} \left(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t \right)$$

โดยที่

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1(t) d(\omega t) = 0 \qquad (2.8)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_1(t) \cos n\omega t d(\omega t) \qquad (2.9)$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[\int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} I_a \cos n\omega t d(\omega t) - \int_{7\pi/6+\alpha}^{11\pi/6+\alpha} I_a \cos n\omega t d(\omega t) \right]$$

$$= -\frac{4I_a}{n\pi} \sin\frac{n\pi}{3} \sin n\alpha \qquad \text{สำหรับ } n = 1,3,5.....$$

$$= 0 \qquad \text{สำหรับ } n = 2,4,6,.....$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i_1(t)\sin n\omega t d(\omega t) \qquad (2.10)$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[\int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} I_a \sin n\omega t d(\omega t) - \int_{7\pi/6+\alpha}^{11\pi/6+\alpha} I_a \sin n\omega t d(\omega t)\right]$$

$$= -\frac{4I_a}{n\pi}\sin\frac{n\pi}{3}\cos n\alpha \qquad \text{สำหรับ } n = 1,3,5,...$$

$$= 0 \qquad \text{สำหรับ } n = 2,4,6,...$$

เมื่อ $I_{dc} = 0$ สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$i_a(\omega t) = \sum_{h=1,3,5....}^{\infty} \sqrt{2} I_{ah} \sin(h\omega t + \phi_h) \qquad (2.11)$$

ฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าฮาร์โมนิคส์คุณลักษณะ (Characteristic harmonic) ลำดับของฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้

$$h = 6n \pm 1 \qquad (n = 1,2,3....)$$

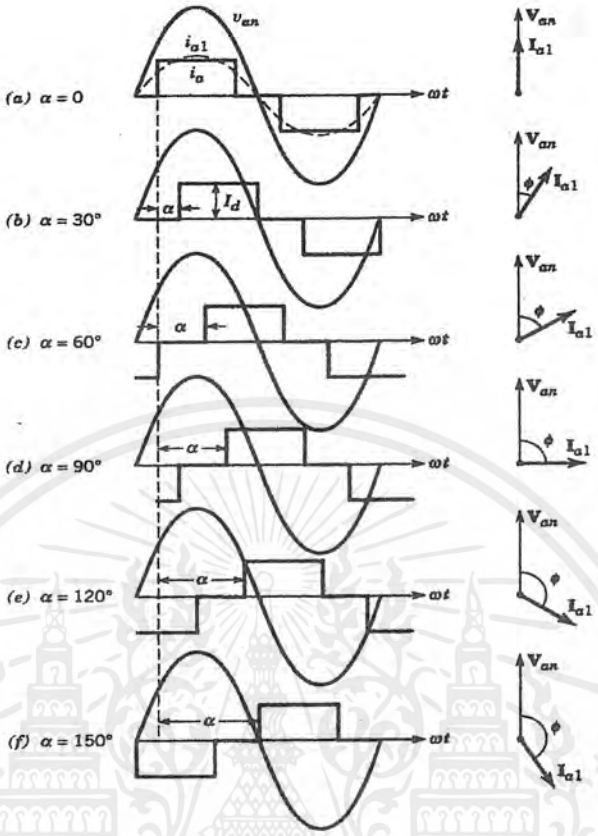
ค่าประสิทธิผลของสัญญาณกระแสอินพุท ที่ความถี่พื้นฐาน คือ

$$I_{s1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{dc} = 0.78 I_{dc} \qquad (2.12)$$

ค่าประสิทธิผลของสัญญาณกระแสอินพุทคำนวณได้จาก

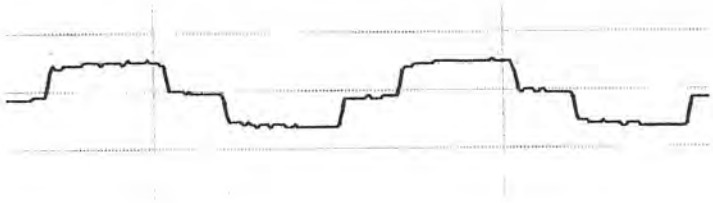
$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dc} = 0.816\, I_{dc} \qquad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 สัญญาณกระแสเมื่อเทียบกับแรงดันเฟสขณะปรับมุม α = 0-180 องศา

สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขอลวดเป็นแบบ สตาร์/สตาร์ รูปสัญญาณที่ได้เป็นแบบ Quasi step



รูปที่ 2.15 รูปสัญญาณกระแสแบบ Quasi Step

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_Y(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos\omega t - \frac{1}{5}\cos 5\omega t + \frac{1}{7}\cos 7\omega t \right.$$

$$\left. - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t - \ldots\ldots \right) \qquad (2.14)$$

สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์/เดลต้า

รูปที่ 2.16 รูปสัญญาณกระแสแบบ Six Step

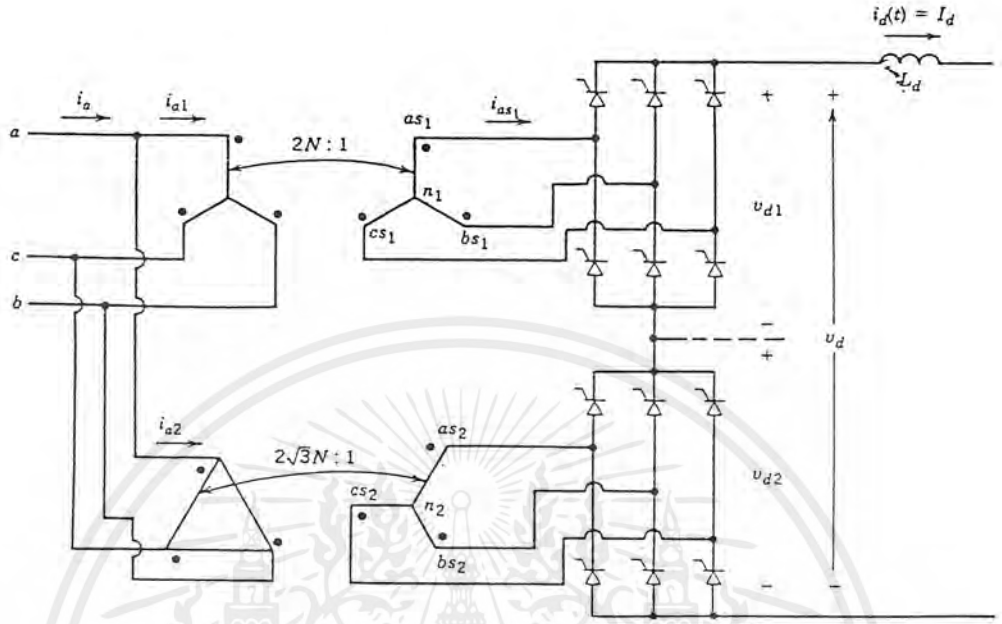
$$i_\Delta(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos\omega t + \frac{1}{5}\cos 5\omega t - \frac{1}{7}\cos 7\omega t \right.$$

$$\left. - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t + \ldots \right) \qquad (2.15)$$

2.6.2 ชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์

ชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ เป็นการประยุกต์มาจากชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์โดยนำชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ จำนวน 2 ชุด มาต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

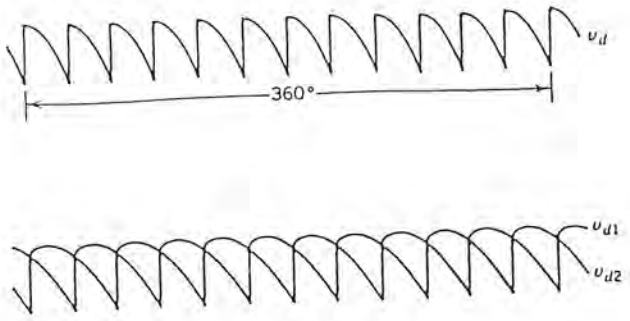


รูปที่ 2.17 ชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์

รูปที่ 2.17 แสดงการต่อชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ 2 ชุดอนุกรมกัน โดยชุดบนใช้หม้อแปลงต่อแบบ YY และชุดล่างใช้หม้อแปลงต่อแบบ YΔ ทำให้แรงดันด้านดีซีของคอนเวอร์เตอร์ชุดล่างจะเหลื่อมกับแรงดันด้านดีซีของคอนเวอร์เตอร์ชุดบนเป็นมุม 30 องศา ดังนั้นแรงดันรวมของชุดคอนเวอร์เตอร์จึงมีริปเปิลความถี่ 12 เท่าของไฟเอซี ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และมีขนาดเท่ากับ

$$V_O = V_{O1Y} + V_{O2\Delta} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos\alpha + \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos\alpha = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos\alpha \qquad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงแรงดันทางด้านดีซีของชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์

สำหรับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายของชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ เกิดจากกระแสของคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์แต่ละชุดรวมกัน ตามสมการ

$$i_{ac}(t) = i_Y(t) + i_\Delta(t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_{dc}\left(\cos\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t - \ldots\right) \qquad (2.17)$$

และฮาร์โมนิคส์ของสัญญาณกระแสจะมีในลำดับที่ $h = 12k \pm 1$

รูปที่ 2.19 แสดงกระแสทางด้านแหล่งจ่ายของชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์

2.7 ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

เพาว์เวอร์แฟคเตอร์เป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการนำกำลังไฟฟ้ามาใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่จ่ายให้กับระบบหรือสามารถนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) ต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power)ในกรณีที่กระแสและแรงดันของระบบเป็นรูปสัญญาณซายน์(Sinusoidal) จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Power Factor} = \frac{P}{S} = \text{COS}\phi$$

เนื่องจากสัญญาณกระแสทางด้านอินพุทของชุดคอนเวอร์เตอร์ไม่เป็นสัญญาณซายน์ (Nonsinusoidal) ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงได้จาก

$$P = \frac{1}{T_1}\int_0^{T_1} P(t)dt = \frac{1}{T_1}\int_0^{T_1} v_S(t)i_s(t)dt \qquad (2.18)$$

เมื่อ $v_S = \sqrt{2}V_S \sin \omega t$

$$i_s(t) = i_{s1}(t) + \sum_{h\neq 1} i_{sh}(t)$$

เนื่องจากกระแสทางด้านอินพุท (i_s) เกิดการผิดเพี้ยน (Distortion) เราสามารถแยกองค์ประกอบของกระแสออกเป็นสองส่วนคือ กระแสที่ความถี่พื้นฐาน (i_{s1}) และองค์ประกอบกระแสฮาร์โมนิคส์ (i_{sh}) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$i_s(t) = \sqrt{2}I_{S1}\sin(\omega_1 t - \phi_1) + \sum_{h\neq 1}\sqrt{2}I_{sh}(\ \sin\omega_h t - \phi_h\ ) \qquad (2.19)$$

เมื่อให้ ϕ_1 เป็นมุมต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันอินพุทที่ความถี่พื้นฐาน ดังนั้นสามารถเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าจริงได้จาก

$$P = \frac{1}{T_1}\int_0^{T_1}\left[\left(\sqrt{2}V_s \sin\omega_1 t\right)\left(\sqrt{2}I_{sh}\sin(\omega_1 t - \phi_1)\right)\right]dt \qquad (2.20)$$

$$= V_S I_{S1}\cos\phi_1$$

$$PF = \frac{V_s I_{s1}\cos\phi 1}{V_s I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s}\cos\phi 1 \qquad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การเชื่อมต่อชุดจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง กับคอมพิวเตอร์และการควบคุม

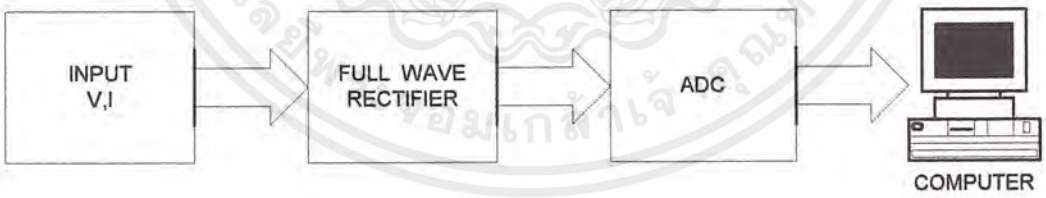
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการนำเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer) มาประยุกต์กับชุดจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นกรณีศึกษาการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยควบคุมระบบงานต่าง ๆ ตามต้องการ

โครงงานนี้ได้นำเครื่องคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้งาน 3 ลักษณะ ดังนี้

1. ทำหน้าที่รับข้อมูลเพื่อทำการประมวลผล
2. ทำหน้าควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างสองสถานีไฟฟ้า
3. ทำหน้าแสดงผลข้อมูลจากการประมวล เพื่อทำการตรวจสอบระบบได้อย่างง่าย

3.1.1 ภาคการรับข้อมูล

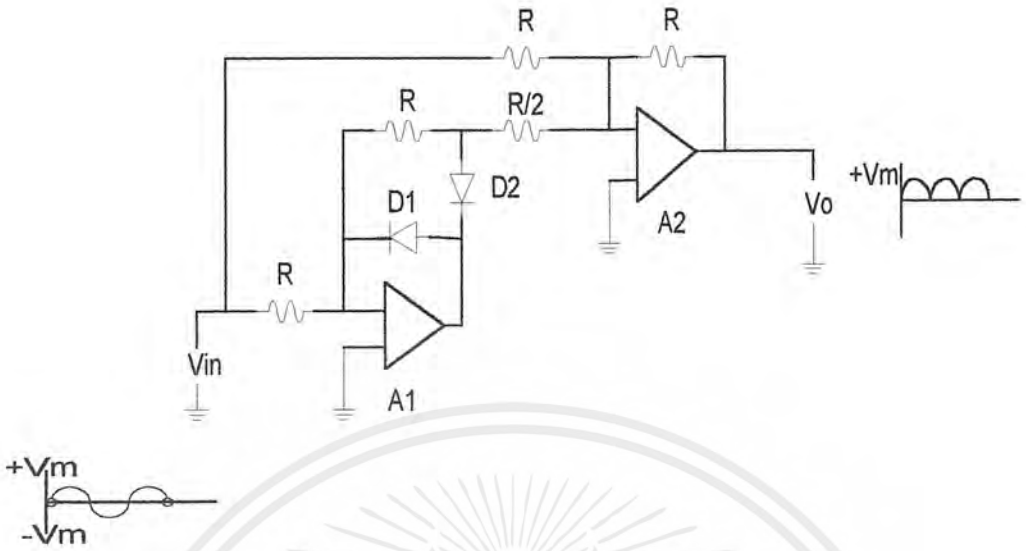
เนื่องจากคอมพิวเตอร์จะทำการประมวลผลในรูปของสัญญาณดิจิตอล แต่สัญญาณจากชุดจำลองเป็นแบบอนาลอก ดังนั้นเราจึงต้องมีขั้นตอนการแปลงสัญญาณอนาลอก ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

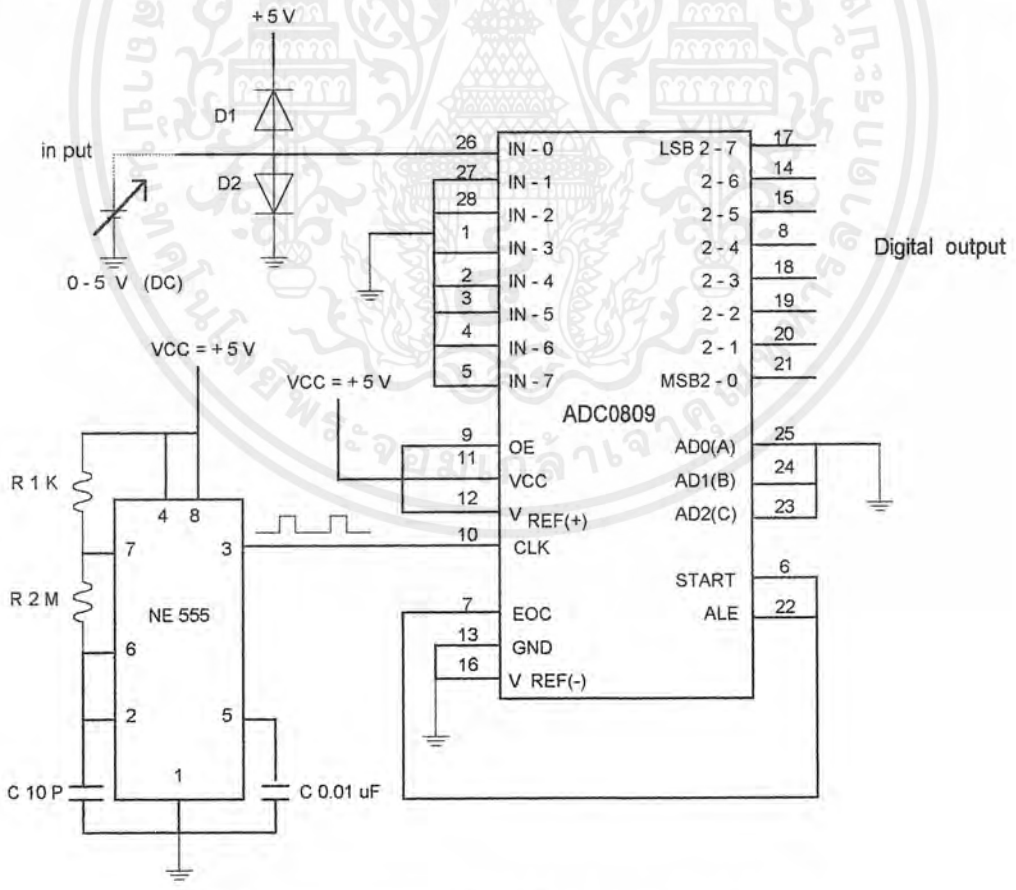
ตามรูปที่ 3.1 สัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณแรงดันและกระแสในจุดที่ทำการตรวจจับ ผ่านเข้าสู่วงจรเรียงกระแสแบบเต็มรูปคลื่น (Full Wave Rectifier) เพื่อปรับระดับแรงดันที่เป็นลบให้เป็นบวกทั้งหมด เนื่องจากวงจรเรียงกระแสทั่ว ๆ ไปที่ใช้ไดโอดร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้านั้นเหมาะสำหรับสัญญาณขนาดใหญ่ ดังนั้นโครงงานนี้จึงเลือกใช้วงจรเรียงกระแสที่เรียกว่า พรีซิสชั่นฟูลเวฟเรคติฟาย (Precision full wave rectifier) มาใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรพรีซิสชั่นฟูลเวฟเรคติฟายเออร์

สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากวงจรเรียงกระแส จะเป็นสัญญาณอินพุทให้กับวงจร ADC (Analog to Digital Converter) เพื่อทำการสุ่มค่าสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลตามต้องการ



รูปที่ 3.3 วงจรอนาลอกทูดิจิตอล (Analog to Digital หรือ ADC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร ADC ในโครงงานใช้ไอซี ADC 0809 ขนาด 8 บิท โดยรับอินพุทขนาด 0 - 5 โวลท์ (DC) ซึ่งมาจากวงจร Precision full wave rectifier เข้าที่ขา 26 (IN_0) ของ ADC 0809 จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าที่ขา 26 ของ ADC 0809 จะต่อไดโอด D_1 และไดโอด D_2 ไว้ โดยป้อนแรงดันไฟบวก 5 โวลท์ที่ขาแคโทดของไดโอด D_1 และขาแอโนดของไดโอด D_2 ต่อลงกราวด์ เพื่อช่วยป้องกันไฟลบและไฟบวกที่มากกว่า 5 โวลท์ เข้ามาเป็นอินพุทอันอาจเป็นอันตรายต่อวงจร ADC ได้ สัญญาณดิจิตอลที่ได้นำมาเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่านทาง I/O Card ในโครงงานนี้เลือกใช้การ์ด I/O ของบริษัท อีทีที จำกัด รุ่น ET-PCDIO เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างวงจร ADC กับเครื่องคอมพิวเตอร์

ลักษณะทั่วไปของการ์ด

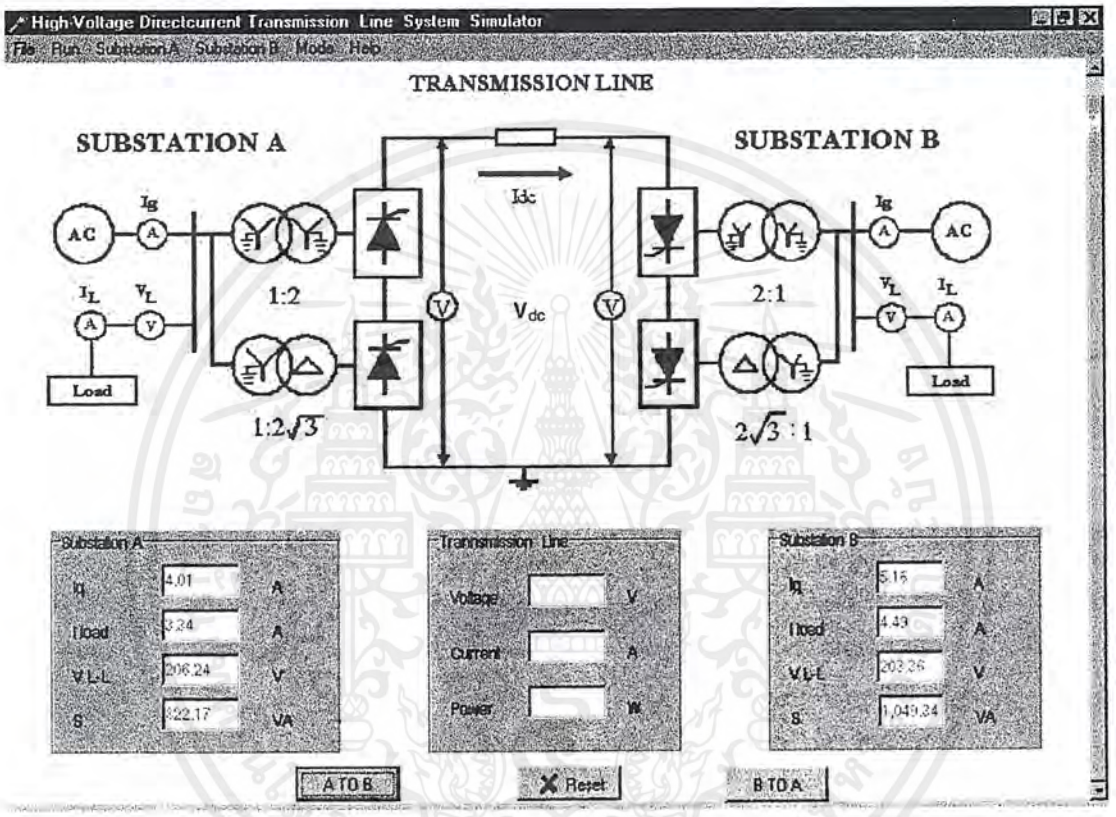
- มีไอซี 8255 จำนวน 1 ตัว ทำหน้าที่เป็น input/output พอร์ต จำนวน 3 พอร์ต หรือ 24 บิตในรูปสัญญาณดิจิตอล
- มีไอซี 8253 จำนวน 1 ตัว ทำหน้าที่เป็น timer
- มีไอซี ADC จำนวน 1 ตัวสามารถเลือกใช้ได้ทั้งเบอร์ ADC0804 (8 บิต) หรือ ADC1001 (10บิต) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล
- มีไอซี DAC จำนวน 1 ตัว สามารถเลือกใช้ได้ทั้งเบอร์ DAC0832 (8 บิต)หรือ DAC1232 (10 บิต) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณจากดิจิตอลเป็นอนาลอก
- สามารถกำหนด address ของพอร์ตได้ง่าย โดยการปรับที่ DIP-SWITCH บนการ์ด

3.2 ภาคการแสดงผลข้อมูลจากการประมวล

ในส่วนของโปรแกรมควบคุมการส่งจ่ายพลังงานจากชุดจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจากสับสเตชั่น A ไปยังสับสเตชั่น B ในโครงงานนี้เขียนด้วยภาษาเดลไฟล์ (Delphi) ซึ่งเป็นภาษาที่มีโครงสร้างการเขียนมาจากภาษาปาสคาล (Pascal) ซึ่งเป็นพื้นฐานในการเขียนโปรแกรม ทำให้ง่ายต่อการเขียนและแก้ไข อีกประการหนึ่งที่เลือกภาษาเดลไฟล์ (Delphi) ก็เนื่องด้วยเป็นภาษาที่เขียนโปรแกรมที่สามารถรันได้บนระบบปฏิบัติการแบบกราฟฟิค (Graphic) เช่น Window 95 ทำให้สามารถสร้างโปรแกรมที่ง่ายต่อการใช้งาน (User Friendly) และสำหรับในโครงงาน เราได้ใช้ความสามารถด้านกราฟิกในรูปแบบของการมอนิเตอร์ระบบ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบค่าต่าง ๆ ที่สนใจ เช่น แรงดัน, กระแส ของชุดจำลองได้โดยง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการทำงานของโปรแกรม เมื่อทำการทำงานโปรแกรมจะตรวจจับค่าแรงดันและกระแสในจุดที่สนใจของชุดจำลอง แล้วนำมาแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ในทุก ๆ ช่วงเวลาที่กำหนด แสดงผลได้ดังรูปที่ 3.4



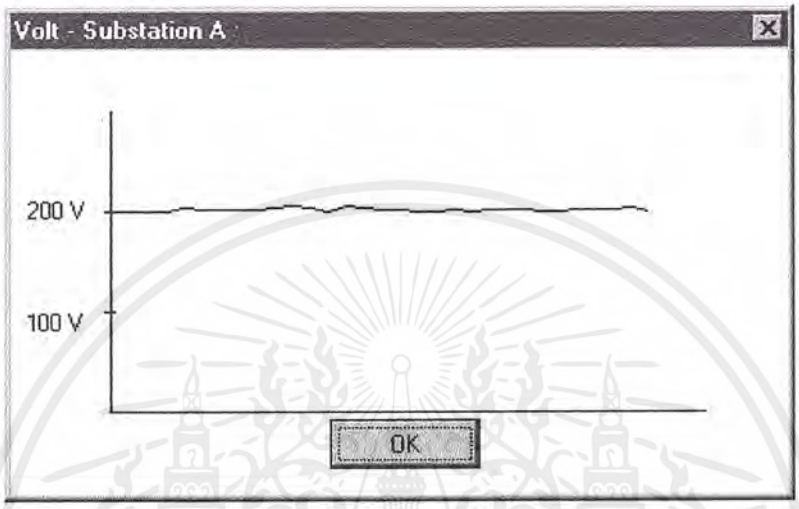
รูปที่ 3.4 แสดงหน้าจอปกติของโปรแกรม

จากรูปที่ 3.4 แสดงภาพไดอะแกรมของชุดจำลอง ซึ่งเป็นสภาวะ stand by คือไม่มีการไหลของพลังงาน เมื่อเริ่มรันโปรแกรมภาพนี้จะถูกแสดงขึ้นมาและมีส่วนที่แสดงค่าที่ตรวจรับมาจากชุดจำลอง ค่านี้จะเปลี่ยนแปลงทุก ๆ ช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งเราสามารถปรับแต่งได้ในส่วนคำสั่งของโปรแกรม สำหรับค่าที่นำแสดงผลในที่นี้ได้แก่ แรงดัน, กระแสของแหล่งจ่ายทั้งด้านสับสเตชั่น A และ B

เมื่อรันโปรแกรม โปรแกรมจะแสดงค่าประสิทธิผลของสัญญาณที่เวลาใดเวลาหนึ่ง เปลี่ยนไปเรื่อย ๆ ทุก ๆ ช่วงเวลาที่กำหนด เราสามารถดูระดับค่าประสิทธิผลของสัญญาณย้อนหลังได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นโดยการเลือกเมนู Substation A/Volt เป็นต้น เราก็จะได้กราฟดังรูปที่ 3.5 ซึ่งสามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณได้



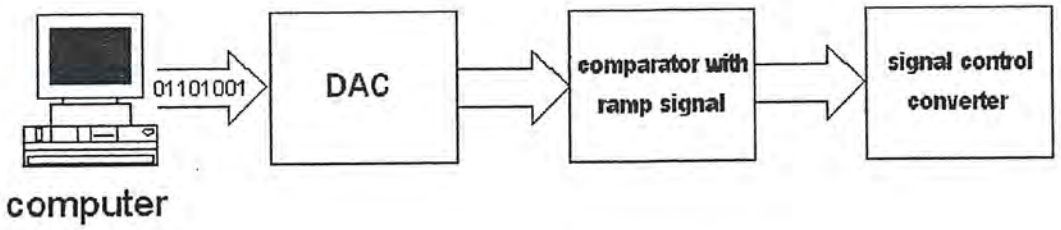
รูปที่ 3.5 แสดงกราฟแรงดันที่บันทึกค่าไว้

3.3 ภาคการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างสองสถานีไฟฟ้าจำลอง

จากชุดจำลองเดิมที่ใช้การควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยมนุษย์ (Manual Operation) ทำให้ยากต่อการส่งจ่ายและควบคุมกำลังไฟฟ้า โครงงานนี้ได้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์มาทำหน้าที่นี้ ทำให้มีความน่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งด้วยความสามารถในการทำกราฟิกของโปรแกรมเดลไฟล์ ทำให้สามารถสร้างโปรแกรมที่ง่ายต่อการใช้งาน โดยผู้ใช้อาจไม่จำเป็นต้องมีความรู้ในเรื่องของคอนเวอร์เตอร์ก็สามารถทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ซึ่งจะได้อธิบายโดยละเอียดต่อไป

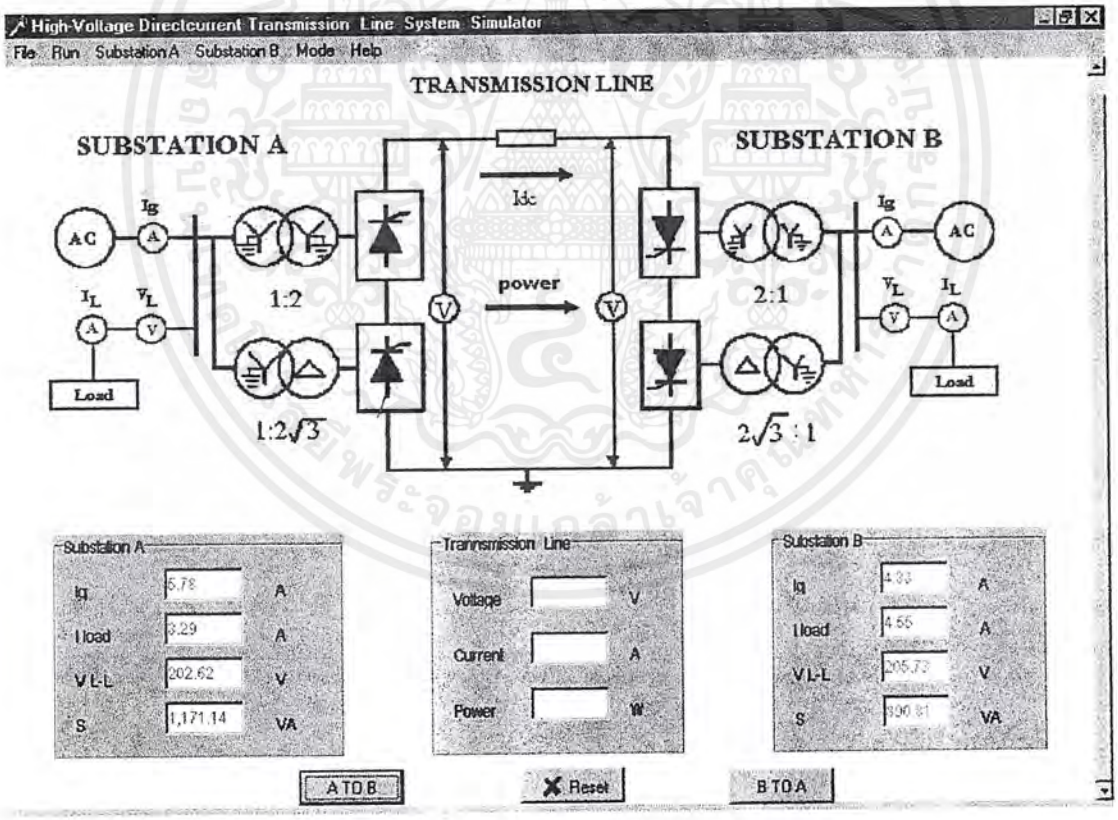
จากในบทที่ 2 เราทราบแล้วว่าสัญญาณทริกของ SCR ได้มาจากการเปรียบเทียบสัญญาณรูปสามเหลี่ยมกับระดับแรงดันควบคุม คอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทในส่วนนี้โดยการส่งค่าระดับแรงดันควบคุมไปเปรียบเทียบสร้างสัญญาณทริก ทำให้เราสามารถควบคุมโหมดการทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์ได้ผ่านทางคอมพิวเตอร์ สัญญาณที่ออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์จะเป็นสัญญาณดิจิตอลผ่านทางการ์ด I/O เข้าสู่วงจร DAC เพื่อทำการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก ขั้นตอนที่ได้อธิบายมาแสดงตามรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงการส่งค่าจากคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณทริก

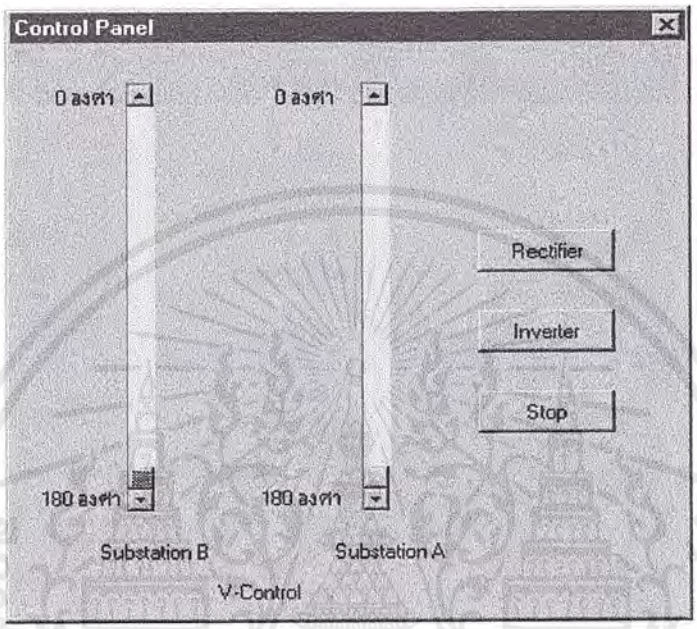
เมื่อต้องการส่งกำลังไฟฟ้าจากด้านสับสเตชั่น A ไปสับสเตชั่น B จากหน้าจอของโปรแกรมในสภาวะ Stand by เราทำการกดปุ่ม "A to B" โปรแกรมจะแสดงสถานะการทำงานของระบบดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงหน้าจอสภาวะส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากสับสเตชั่น A ไป สับสเตชั่น B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะเปิดหน้าต่าง Control Panel เพื่อเตรียมส่งกำลังไฟฟ้า หน้าจอแสดงดังรูปที่ 3.8

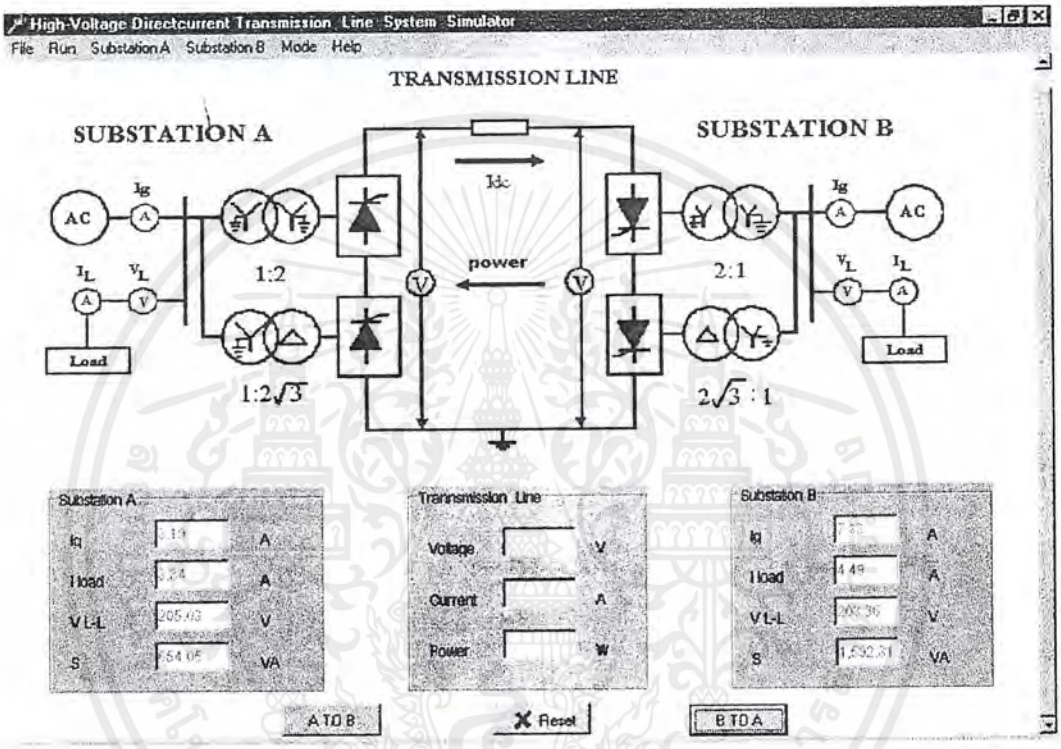


รูปที่ 3.8 Control Panel

ที่หน้าต่าง Control Panel ให้กดปุ่ม "Rectifier" ตามด้วยปุ่ม "Inverter" เป็นอันเสร็จเรียบร้อยในขั้นตอนการส่งกำลังไฟฟ้า และเมื่อต้องการหยุดการส่งกำลัง ก็ให้กดที่ปุ่ม "Stop"

ในทางกลับกันถ้าต้องการควบคุมให้กำลังไฟฟ้าส่งจากด้านสับสเตชั่น B ไปสับสเตชั่น A ก็ให้กลับมาที่หน้าจอปกติ และกดปุ่ม "B to A" หน้าจอแสดงผลก็จะเป็นดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงหน้าจอสภาวะส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากสับสเตชั่น B ไป สับสเตชั่น A

เช่นเดียวกัน โปรแกรมจะเปิดหน้าต่าง Control Panel หลังจากนั้นเราก็กดปุ่ม “Rectifier”, “Inverter” ตามลำดับ ก็เสร็จสิ้นขั้นตอนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จากขั้นตอนที่ได้อธิบายมาจะเห็นได้ว่าการนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้งานช่วยทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นเรื่องง่ายมาก แม้แต่ผู้ที่ไม่มีความรู้ความเชี่ยวชาญก็ยังสามารถควบคุมระบบจำลองนี้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองของโครงงานนี้ ได้ทำการทดลองการส่งถ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์มาควบคุม

ในการทดลองได้นำระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง 2 สับสเตชั่นมาเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 4.1 แล้วทำการส่งถ่ายกำลังงานระหว่างสับสเตชั่นทั้งสองที่ความถี่เดียวกัน (50 เฮิทซ์) โดย

สับสเตชั่น A ใช้ ออโต้ ทรานฟอร์เมอร์ 3 เฟส 380 โวลท์ 15 แอมป์

สับสเตชั่น B ใช้ ออโต้ ทรานฟอร์เมอร์ 3 เฟส 380 โวลท์ 10 แอมป์

ในการทดลองของโครงงานนี้สามารถแบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลอง โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1 การทดลองส่งถ่ายกำลังงานที่ระดับแรงดันเท่ากัน ความถี่เท่ากัน

1.1 จาก Substation A ไป Substation B

1.2 จาก Substation B ไป Substation A

การทดลองที่ 2 การทดลองส่งถ่ายกำลังงานที่ระดับแรงดันต่างกัน ความถี่เท่ากัน

2.1 จาก Substation A ไป Substation B

2.2 จาก Substation B ไป Substation A

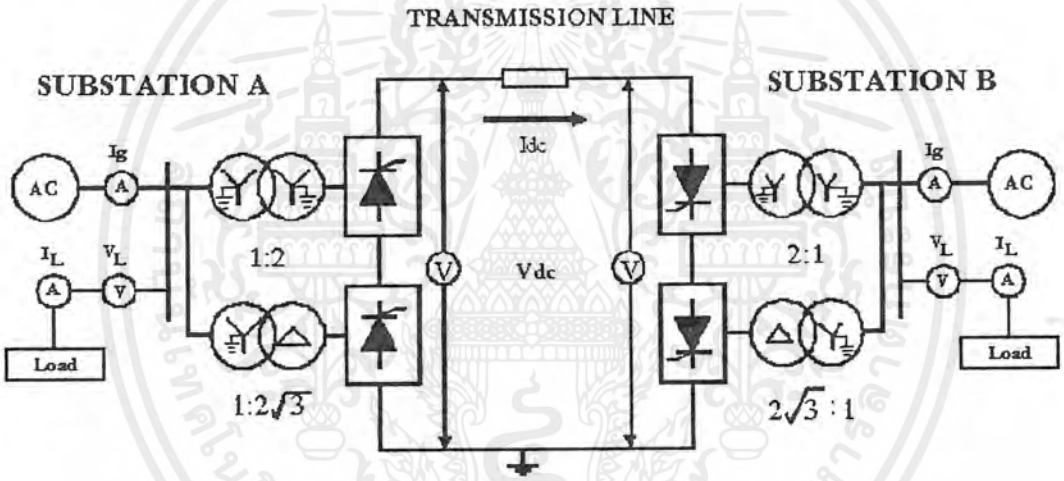
4.1 การทดลองที่ 1 การทดลองส่งถ่ายกำลังงานที่ระดับแรงดันเท่ากัน ความถี่เท่ากัน

4.1.1 ลำดับขั้นการทดลองที่ 1

1) ต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 4.1
2) ต่อโหลดความต้านทาน 3ϕ (หลอด Incandescent 100 W) ด้านสับสเตชั่น A จำนวน 33 หลอด และด้านสับสเตชั่น B จำนวน 30 หลอด
3) จ่ายไฟด้านสับสเตชั่น A และด้านสับสเตชั่น B โดยจ่ายให้ได้แรงดัน 200 โวลท์ (line-to-line)
4) สังเกตและบันทึกผลก่อนทำการส่งจ่ายพลังงาน
5) ทำการปรับมุมคอนเวอร์เตอร์ A ให้ทำงานในโหมดเรคติฟาย แล้วทำการปรับมุมคอนเวอร์เตอร์ B ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) สังเกตและบันทึกผล
7) ปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองให้หยุดทำงาน
8) ทำการปรับมุมคอนเวอร์เตอร์ B ให้ทำงานในโหมดเรคติฟาย แล้วทำการปรับมุมคอนเวอร์เตอร์ A ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์
9) สังเกตและบันทึกผล
10) ปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองให้หยุดทำงาน



รูปที่ 4.1 วงจรการทดลองส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 1

กรณีที่ 1.1 แรงดันเท่ากัน (V_A ,V_B = 200 V_{LL}) , ความถี่ 50 Hz

ก่อนส่งถ่ายกำลังงาน

	SUBSTATION A		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	3.90	3.32	0.20
V_{LL} (V)	210	207	207
P (W)	1248	1170	96
Q (VAR)	600	253	340
S (VA)	1390	1197	360
PF	0.9	0.98	0.26
θ	25.8	11.48	74.9

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A

(แรงดันเท่ากัน)

	SUBSTATION A				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	4.01	4.05	1	4.07	1.4
I_L (A)	3.34	3.10	7	3.1	7
V_{LL} (V)	206.24	203.35	1.4	203.00	1.5

ตารางที่ 4.2 ค่าของกระแสและแรงดันก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A

(แรงดันเท่ากัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

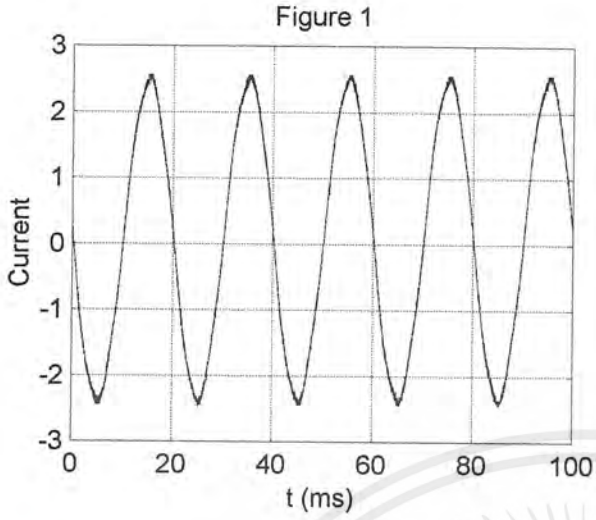
	SUBSTATION B		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	4.80	4.32	0.40
V_{LL} (V)	200	207	200
P (W)	1620	1533	83
Q (VAR)	520	251	251
S (VA)	1702	1566	45
PF	0.95	0.99	0.33
θ	18.19	8.10	70.73

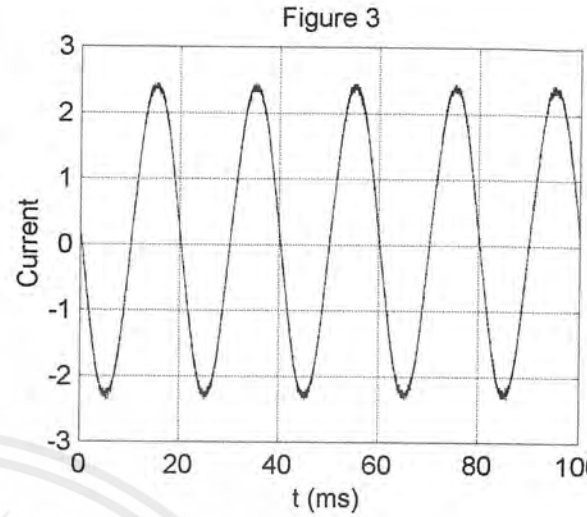
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(แรงดันเท่ากัน)

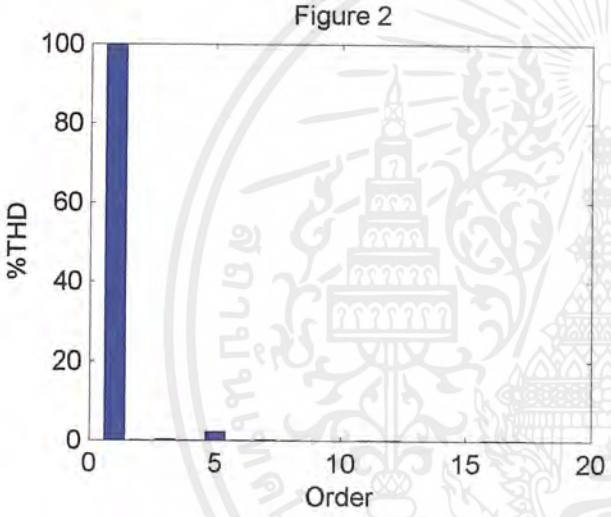
	SUBSTATION B				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	5.16	4.74	8	4.8	7.5
I_L (A)	4.49	4.52	0.6	4.56	1.5
V_{LL}(V)	203.36	203.34	0	203	0.17

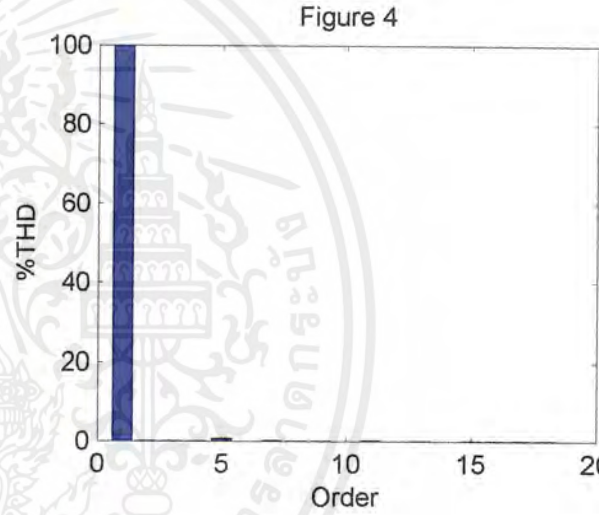
ตารางที่ 4.4 ค่าของกระแสและแรงดันก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(แรงดันเท่ากัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









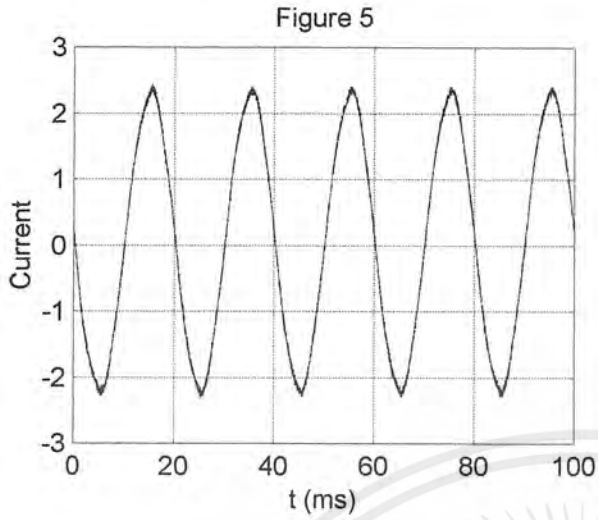
รูปที่ 4.2 (Figure 1) รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง)

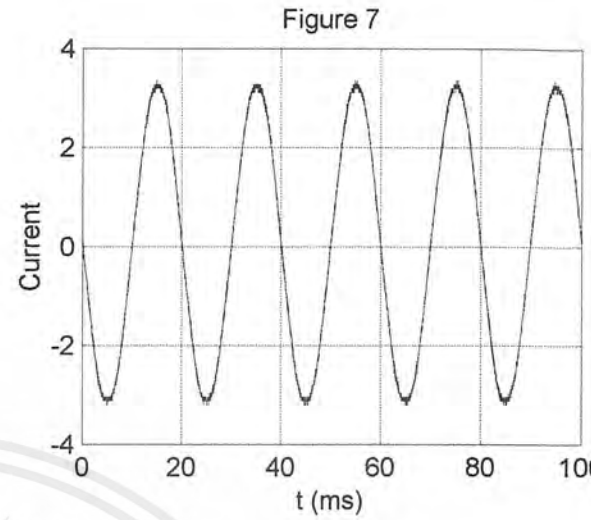
รูปที่ 4.3 (Figure 2) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง)

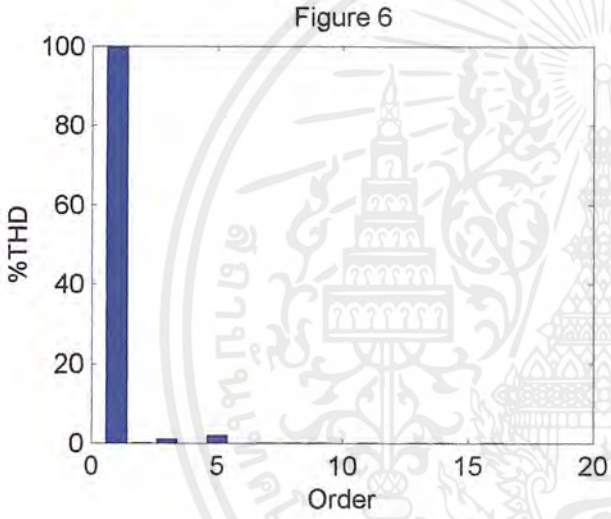
รูปที่ 4.4 (Figure 3) รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง)

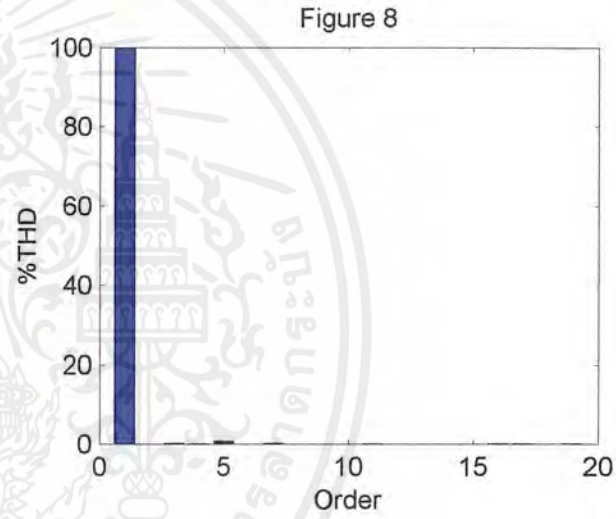
รูปที่ 4.5 (Figure 4) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









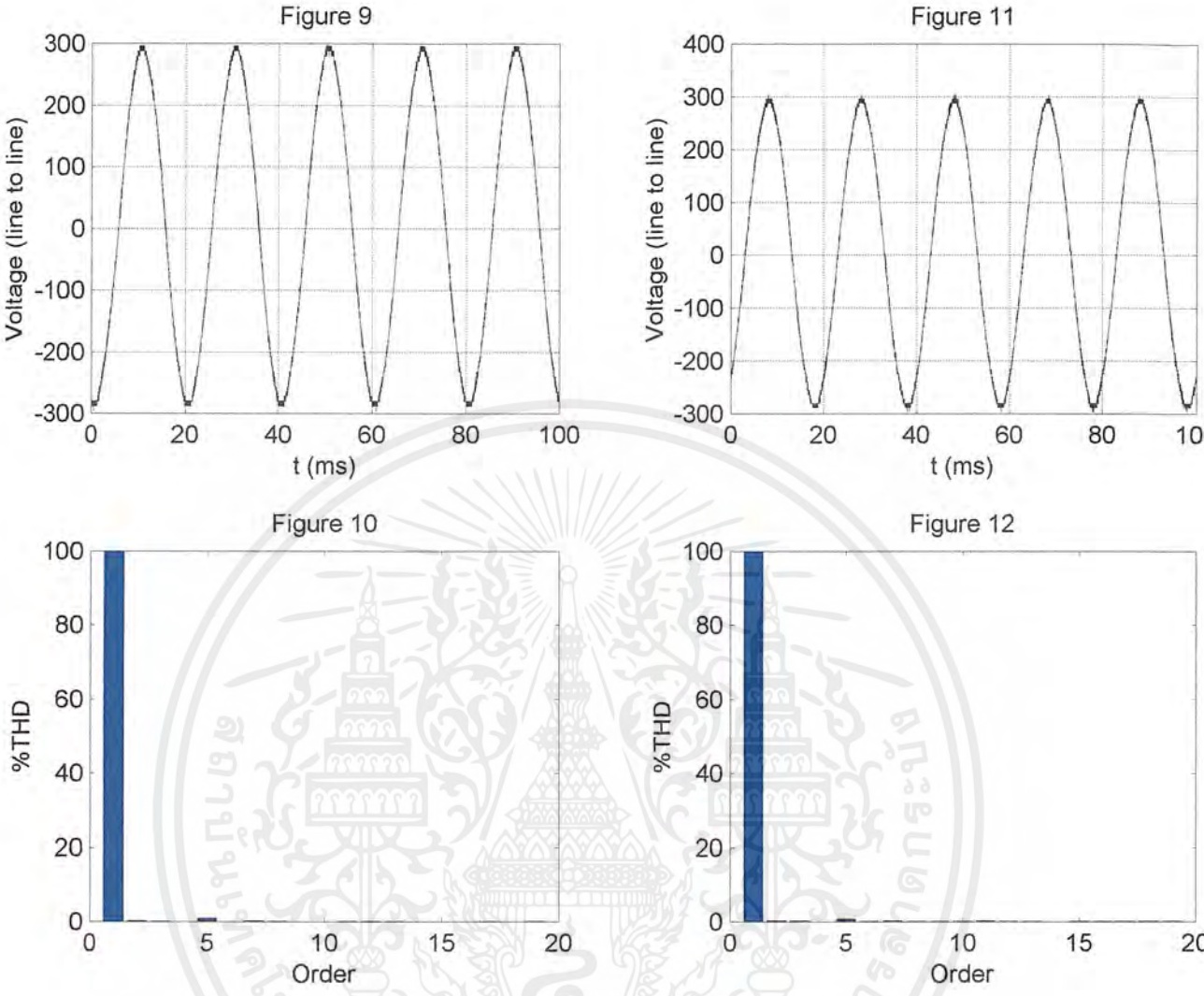
รูปที่ 4.6 (Figure 5) รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน ,ก่อนส่ง)

รูปที่ 4.7 (Figure 6) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน ,ก่อนส่ง)

รูปที่ 4.8 (Figure 7) รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B (V เท่ากัน ,ก่อนส่ง)

รูปที่ 4.9 (Figure 8) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน B (V เท่ากัน ,ก่อนส่ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



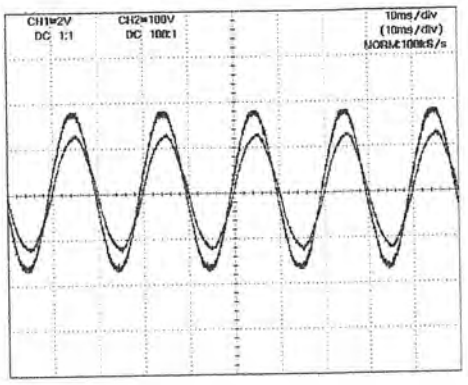
รูปที่ 4.10 (Figure 9) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง)

รูปที่ 4.11 (Figure 10) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , ก่อนส่ง)

รูปที่ 4.12 (Figure 11) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน , ก่อนส่ง)

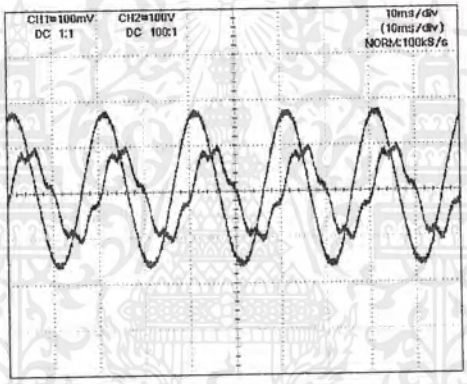
รูปที่ 4.13 (Figure 12) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน , ก่อนส่ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



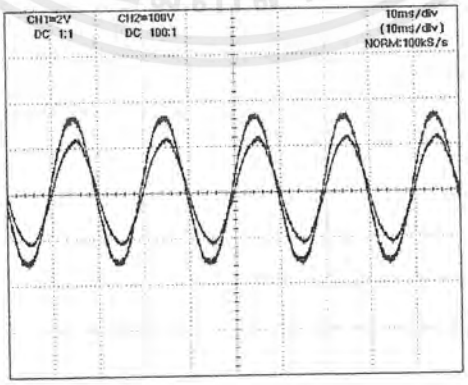
รูปที่ 4.14 สัญญาณกระแสและแรงดันที่แหล่งกำเนิดด้าน A

(V เท่ากัน, ก่อนส่งถ่าย)



รูปที่ 4.15 สัญญาณกระแสและแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้าน A

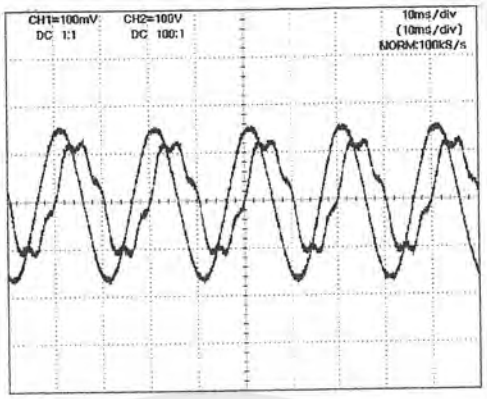
(V เท่ากัน, ก่อนส่งถ่าย)



รูปที่ 4.16 สัญญาณกระแสและแรงดันที่แหล่งกำเนิดด้าน B

(V เท่ากัน, ก่อนส่งถ่าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สัญญาณกระแสและแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้าน B

(V เท่ากัน, ก่อนส่งถ่าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1.2 แรงดันเท่ากัน (V_A ,V_B = 200 V_{LL}) , ความถี่ 50 Hz

หลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไป Substation B

	SUBSTATION A		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	5.44	3.32	2.44
V_{LL} (V)	205.20	207	205
P (W)	1170	500	1290
Q (VAR)	253	370	684
S (VA)	1840	1197	623
PF	0.93	0.98	0.64
θ	21.56	11.48	50.20

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A

(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B)

	SUBSTATION A				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	5.78	5.75	0.5	5.90	2
I_L (A)	3.29	3.32	0.9	3.32	0.9
V_{LL} (V)	202.62	202.1	0.2	202.1	0.2

ตารางที่ 4.6 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A

(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	SUBSTATION B		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	4.13	4.32	2.02
V_{LL} (V)	204	207	202.6
P (W)	1290	1533	-390
Q (VAR)	684	251	412
S (VA)	1460	1566	597
PF	0.88	0.99	0.65
θ	28.36	8.11	49.46

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B)

	SUBSTATION B				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	4.30	3.90	10	3.90	10
I_L (A)	4.55	4.58	0.6	4.61	1.3
V_{LL} (V)	205.73	206.8	0.5	206.8	0.5

ตารางที่ 4.8 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC LINE		
	SUBSTATION A	SUBSTATION B
Idc (A)	0.55	0.55
Vdc (V)	830	820
Wdc (W)	456.5	451

ตารางที่ 4.9 ค่ากระแสและแรงดันในสายส่งขณะส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B

จากตารางที่ 4.9

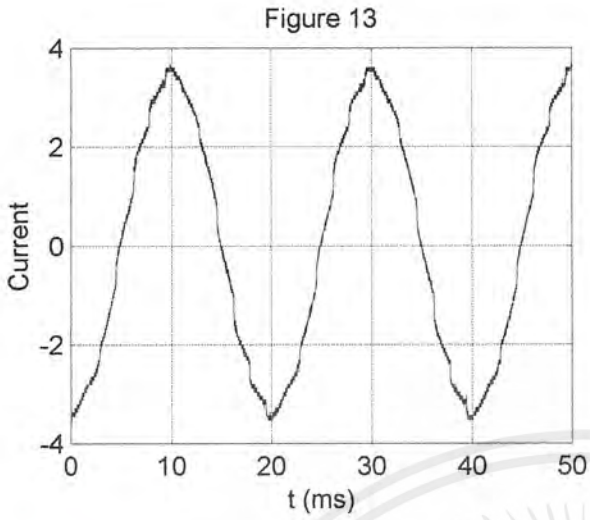
ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

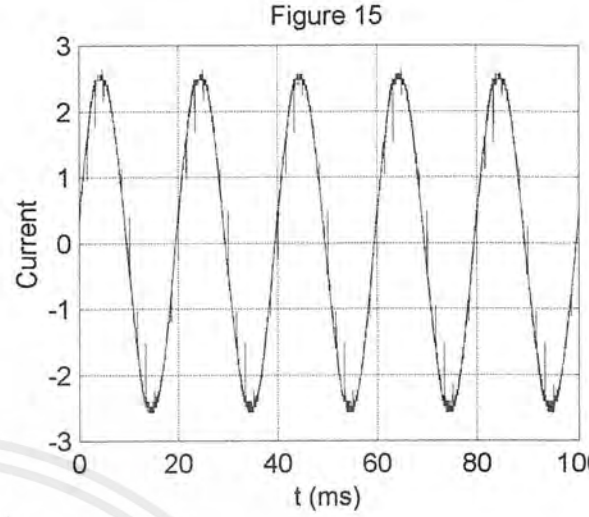
$$\eta = \frac{Pout}{Pin}$$

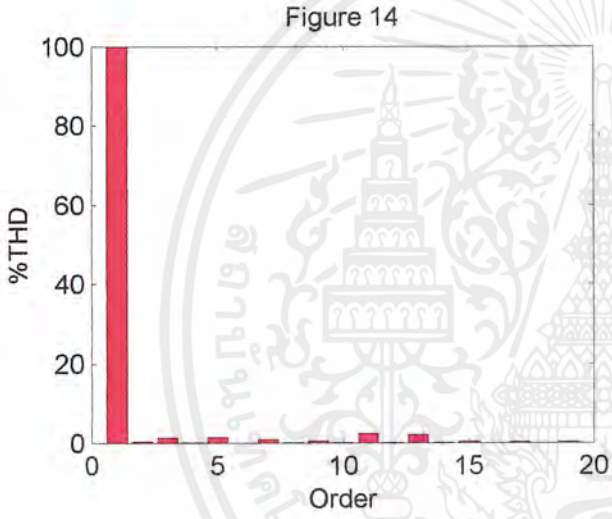
$$= \frac{390}{500}$$

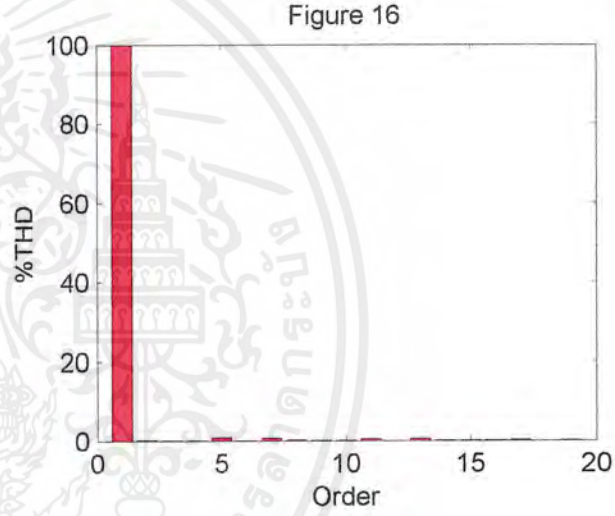
$$= 0.78 \text{ หรือ } 78\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









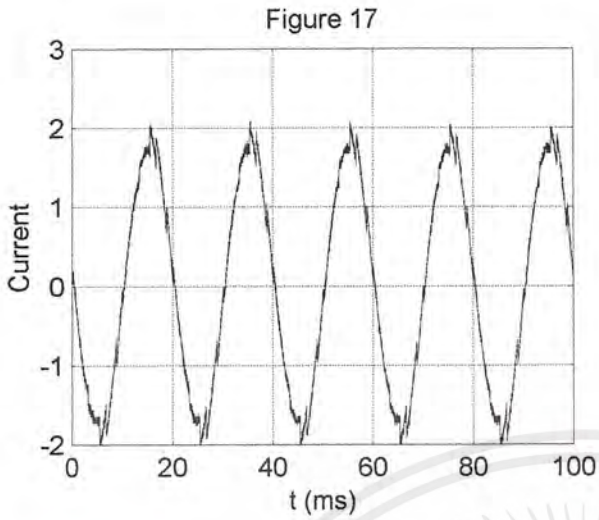
รูปที่ 4.18 (Figure 13) รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B)

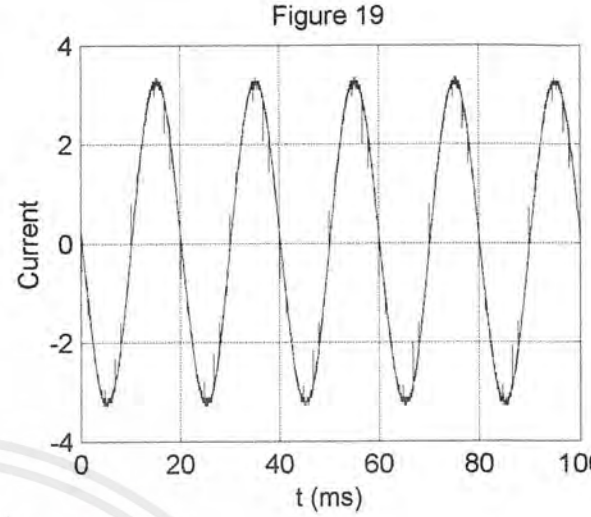
รูปที่ 4.19 (Figure 14) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B)

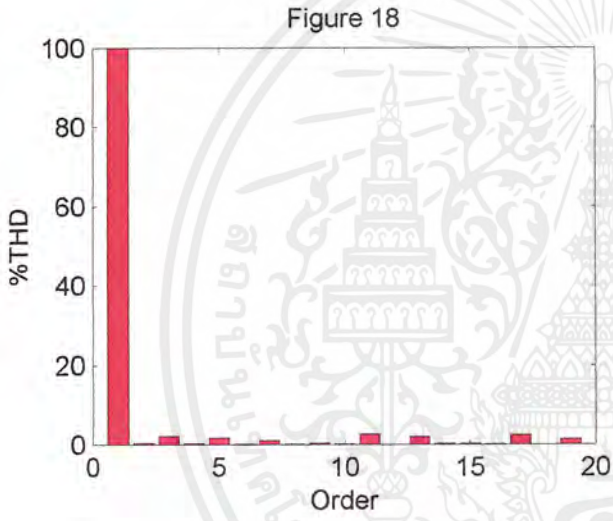
รูปที่ 4.20 (Figure 15) รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน A (V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B)

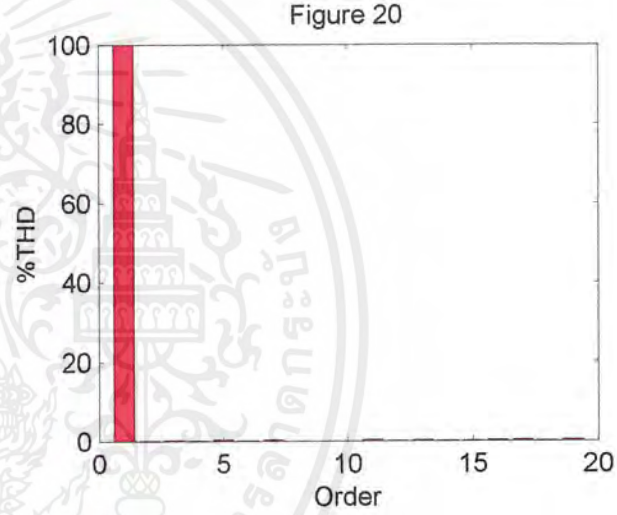
รูปที่ 4.21 (Figure 16) นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน A (V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









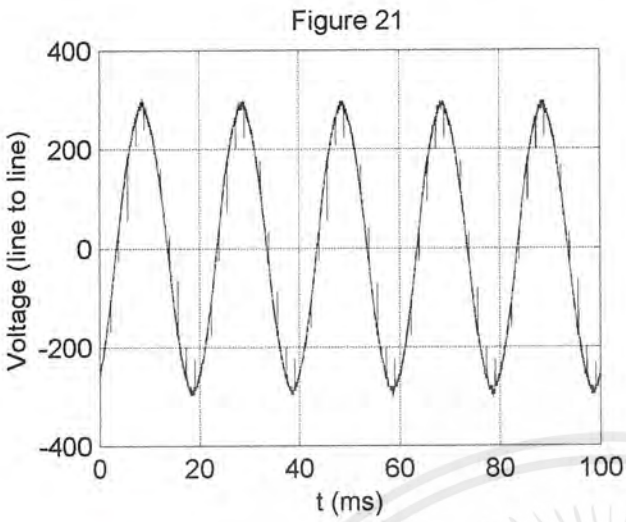
รูปที่ 4.22 (Figure 17) นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B)

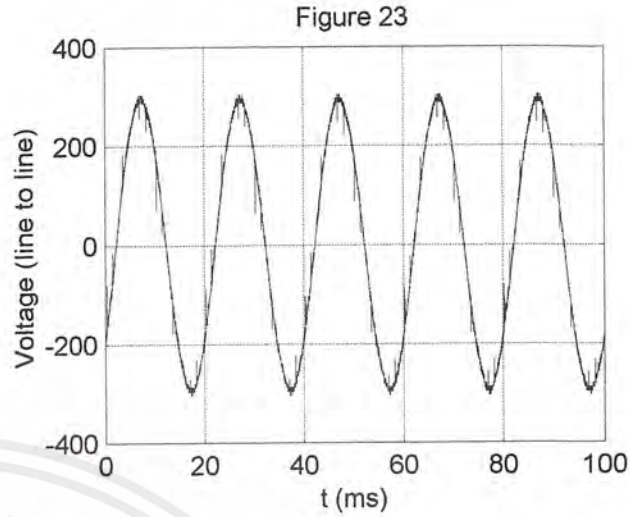
รูปที่ 4.23 (Figure 18) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B)

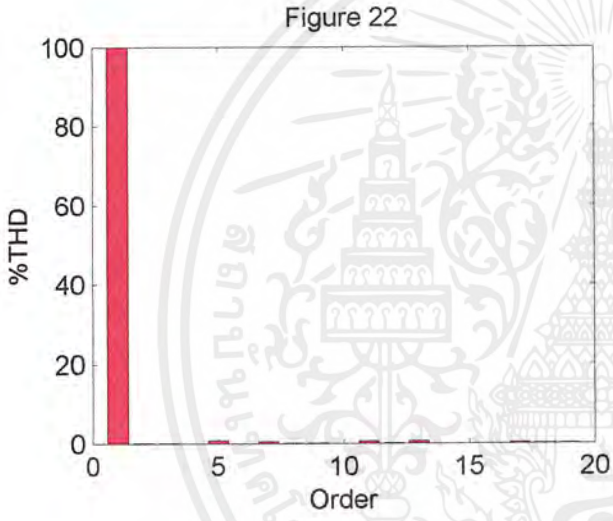
รูปที่ 4.24 (Figure 19) รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B (V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B)

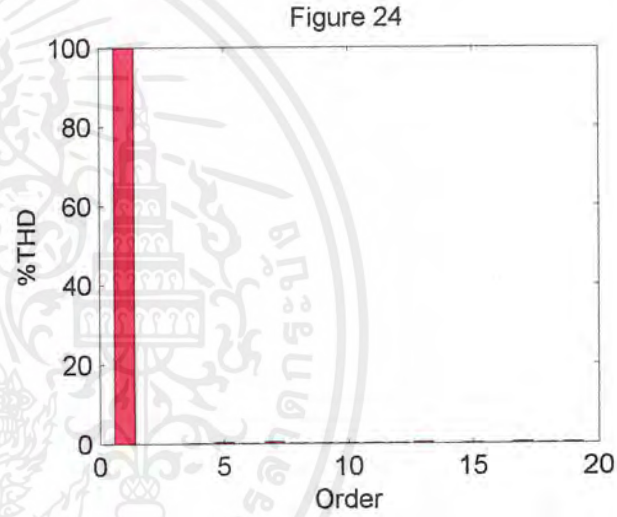
รูปที่ 4.25 (Figure 20) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน B (V เท่ากัน ,หลังส่ง A ไป B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









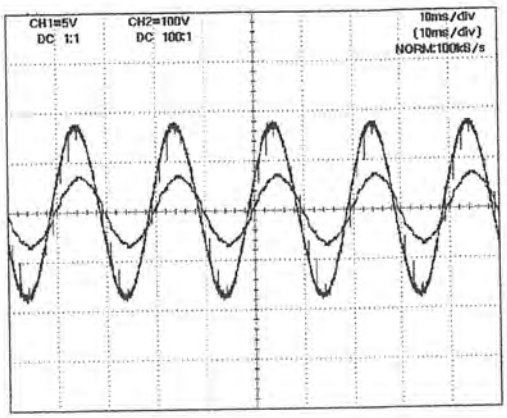
รูปที่ 4.26 (Figure 21) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B)

รูปที่ 4.27 (Figure 22) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B)

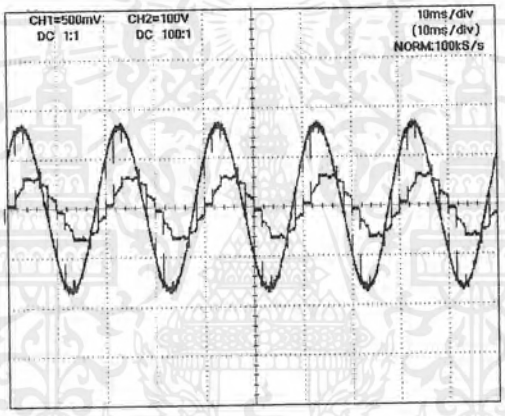
รูปที่ 4.28 (Figure 23) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B)

รูปที่ 4.29 (Figure 24) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน , หลังส่ง A ไป B)

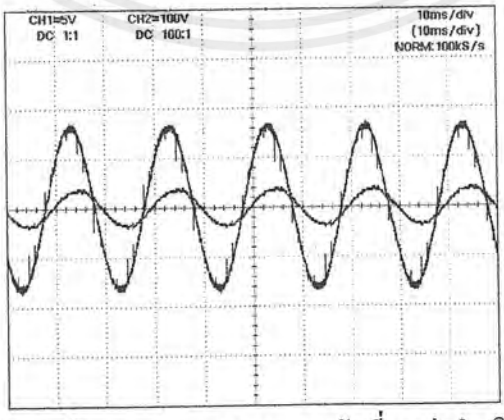
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 สัญญาณกระแสและแรงดันที่แหล่งกำเนิดด้าน A
(V เท่ากัน, หลังส่งถ่ายจาก A ไป B)

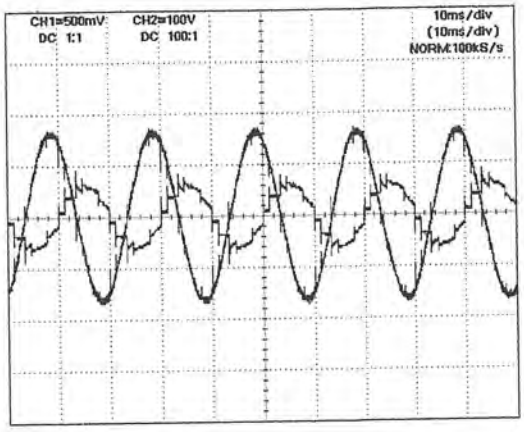


รูปที่ 4.31 สัญญาณกระแสและแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้าน A
(V เท่ากัน, หลังส่งถ่ายจาก A ไป B)

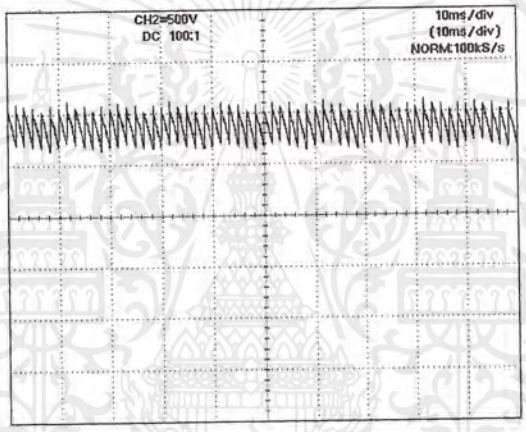


รูปที่ 4.32 สัญญาณกระแสและแรงดันที่แหล่งกำเนิดด้าน B
(V เท่ากัน, หลังส่งถ่ายจาก A ไป B)

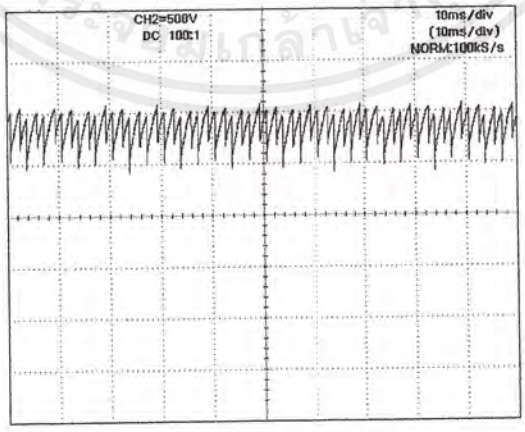
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 สัญญาณกระแสและแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้าน B
(V เท่ากัน, หลังส่งถ่ายจาก A ไป B)

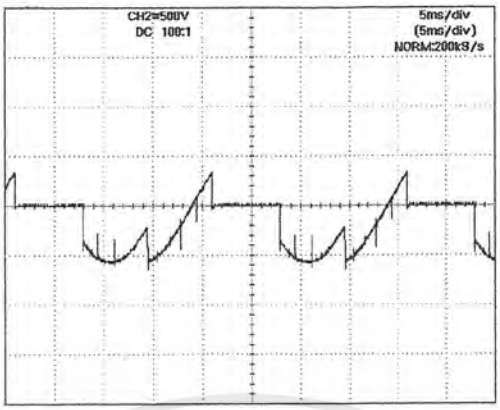


รูปที่ 4.34 แรงดันกระแสตรงด้าน A
(V เท่ากัน, หลังส่งจาก A ไป B)

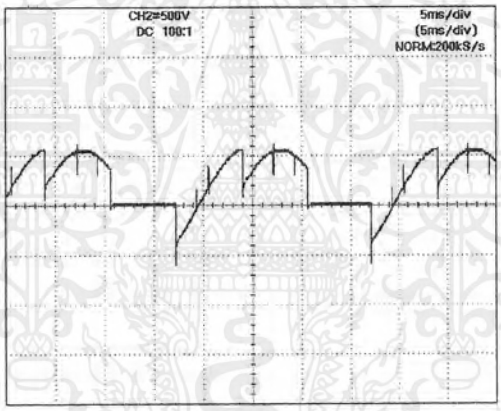


รูปที่ 4.35 แรงดันกระแสตรงด้าน B
(V เท่ากัน, หลังส่งจาก A ไป B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 แรงดันคร่อมSCR ด้าน A
(V เท่ากัน, ส่งจาก A ไป B)



รูปที่ 4.37 แรงดันตกคร่อม SCR ด้าน B
(Vเท่ากัน, ส่งจาก A ไป B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1.3 แรงดันเท่ากัน (V_A ,V_B = 200 V_{LL}) , ความถี่ 50 Hz

หลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation B ไป Substation A

	SUBSTATION A		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	3.13	3.32	3.25
V_{LL} (V)	205.2	207.8	210
P (W)	735	1170	-570
Q (VAR)	608	253	346
S (VA)	1120	1197	670
PF	0.77	0.98	0.85
θ	39.64	11.47	31.79

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A

(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A)

	SUBSTATION A				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	3.19	3.12	2.2	3.17	0.6
I_L (A)	3.34	3.10	7	3.10	7
V_{LL} (V)	205.03	203.35	0.8	203	1

ตารางที่ 4.11 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A

(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	SUBSTATION B		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	7.31	4.32	3.27
V_{LL} (V)	199.1	200	200
P (W)	2280	1533	802
Q (VAR)	570	251	320
S (VA)	2370	1566	863
PF	0.96	0.99	0.76
θ	16.26	8.10	40.53

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A)

	SUBSTATION B				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	7.83	7.47	4.9	7.47	4.9
I_L (A)	4.49	4.52	0.6	4.56	1.5
V_{LL} (V)	203.36	203.34	0	203	0.17

ตารางที่ 4.13 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC LINE		
	SUBSTATION A	SUBSTATION B
Idc (A)	0.92	0.9u2
Vdc (V)	800	810
Wdc (W)	736	745.2

ตารางที่ 4.14 ค่ากระแสและแรงดันในสายส่งขณะส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A

จากตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\eta = \frac{Pout}{Pin}$$

$$= \frac{570}{802}$$

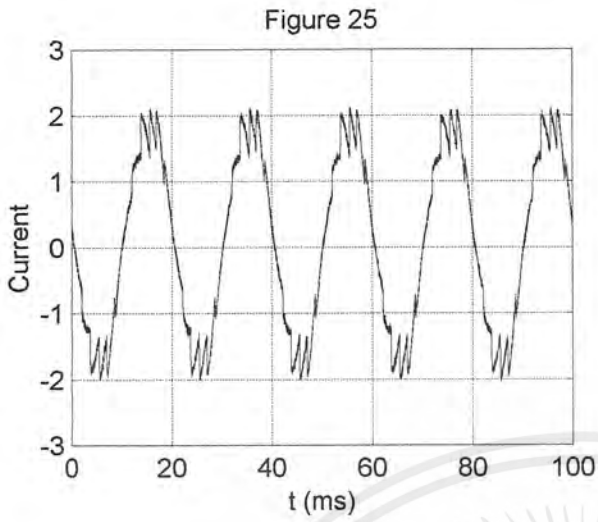
$$= 0.7107 \text{ หรือ } 71.07\%$$

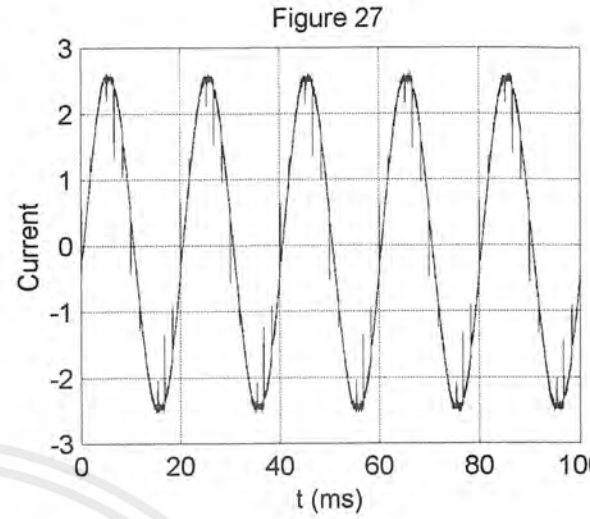
สรุปผลการทดลอง

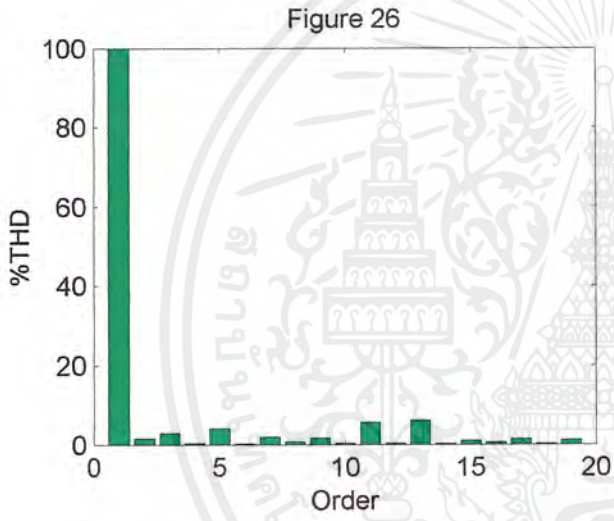
จากผลการทดลองโดยให้แรงดันกระแสสลับทางด้านอินพุทมีค่าคงที่ 200 โวลท์เท่ากันทั้งสองสับสเตชั่น และทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าโดยการปรับมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์จะพบว่าสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสลับไปมาได้ทั้ง 2 สับสเตชั่น คือสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากสับสเตชั่น A ไป สับสเตชั่น B หรือจากสับสเตชั่น B ไป สับสเตชั่น A ได้จริง โดยพิจารณาได้จาก กำลังไฟฟ้าของโหลดด้านรับมีค่าใกล้เคียงกับผลรวมของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดด้านรับและกำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ด้านส่ง ประสิทธิภาพของระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากสับสเตชั่น A ไปสับสเตชั่น B เท่ากับ 78 %และจากสับสเตชั่น B ไปสับสเตชั่น A เท่ากับ 71 % จึงสรุปได้ว่าการส่งกำลังไฟฟ้าทั้ง 2 กรณีมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

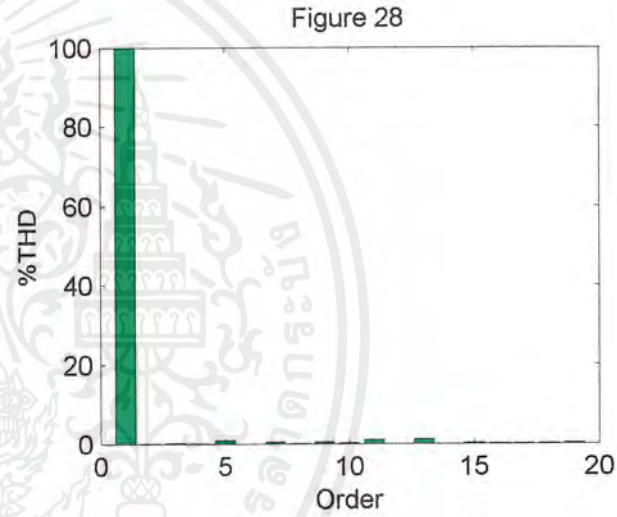
ในส่วนของการรับค่ากระแสและแรงดันเข้าคอมพิวเตอร์ จะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่เครื่องมือวัดได้ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเอง ความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าของผู้ทำการวัด และผลของฮาร์โมนิคส์ที่ทำให้รูปคลื่นของกระแสและแรงดันไม่เป็นรูปไซน์อย่างแท้จริง จากผลการทดลองจะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนในการรับค่าแรงดันจะมีเปอร์เซ็นต์น้อยกว่าความคลาดเคลื่อนจากการรับค่ากระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









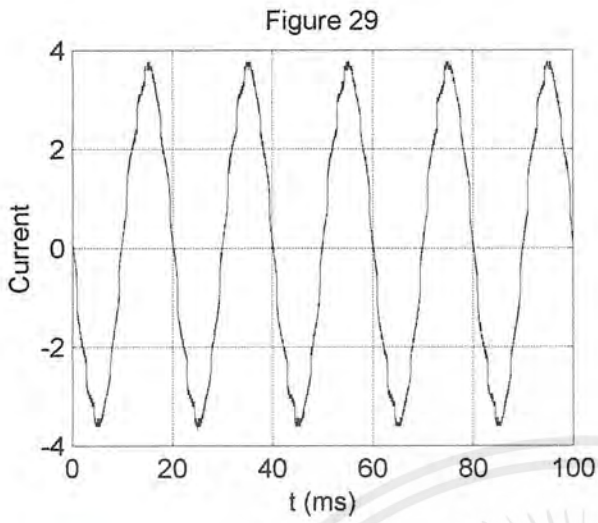
รูปที่ 4.38 (Figure 25) รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A)

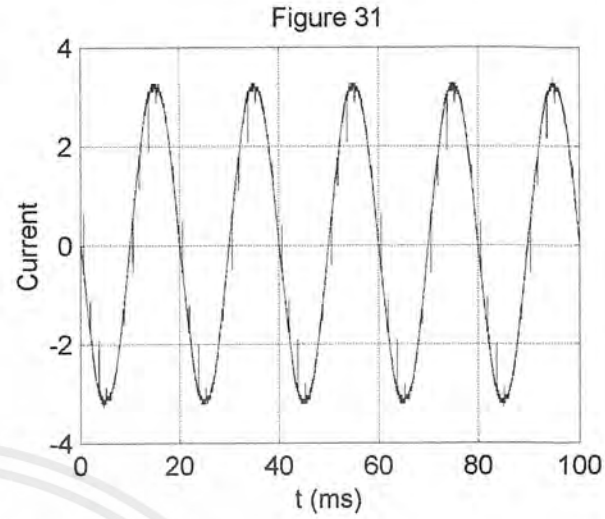
รูปที่ 4.39 (Figure 26) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A)

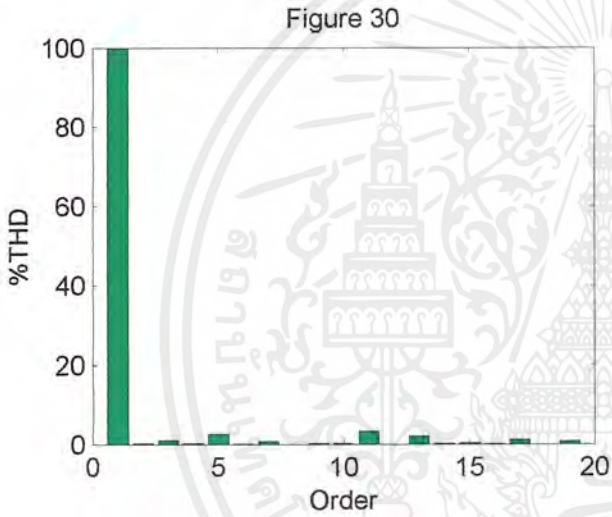
รูปที่ 4.40 (Figure 27) รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน A (V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A)

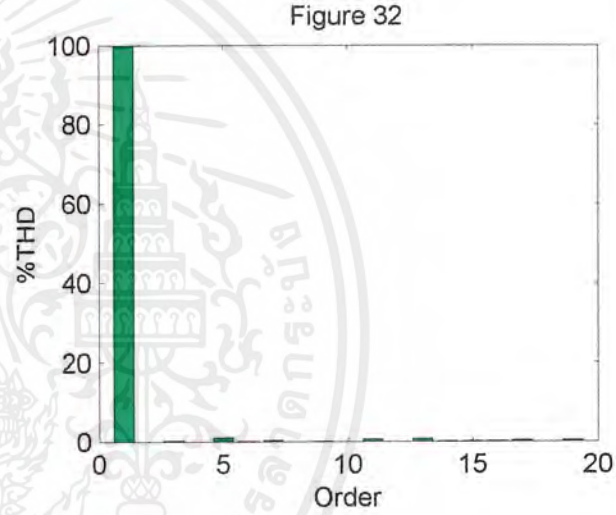
รูปที่ 4.41 (Figure 28) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน A (V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









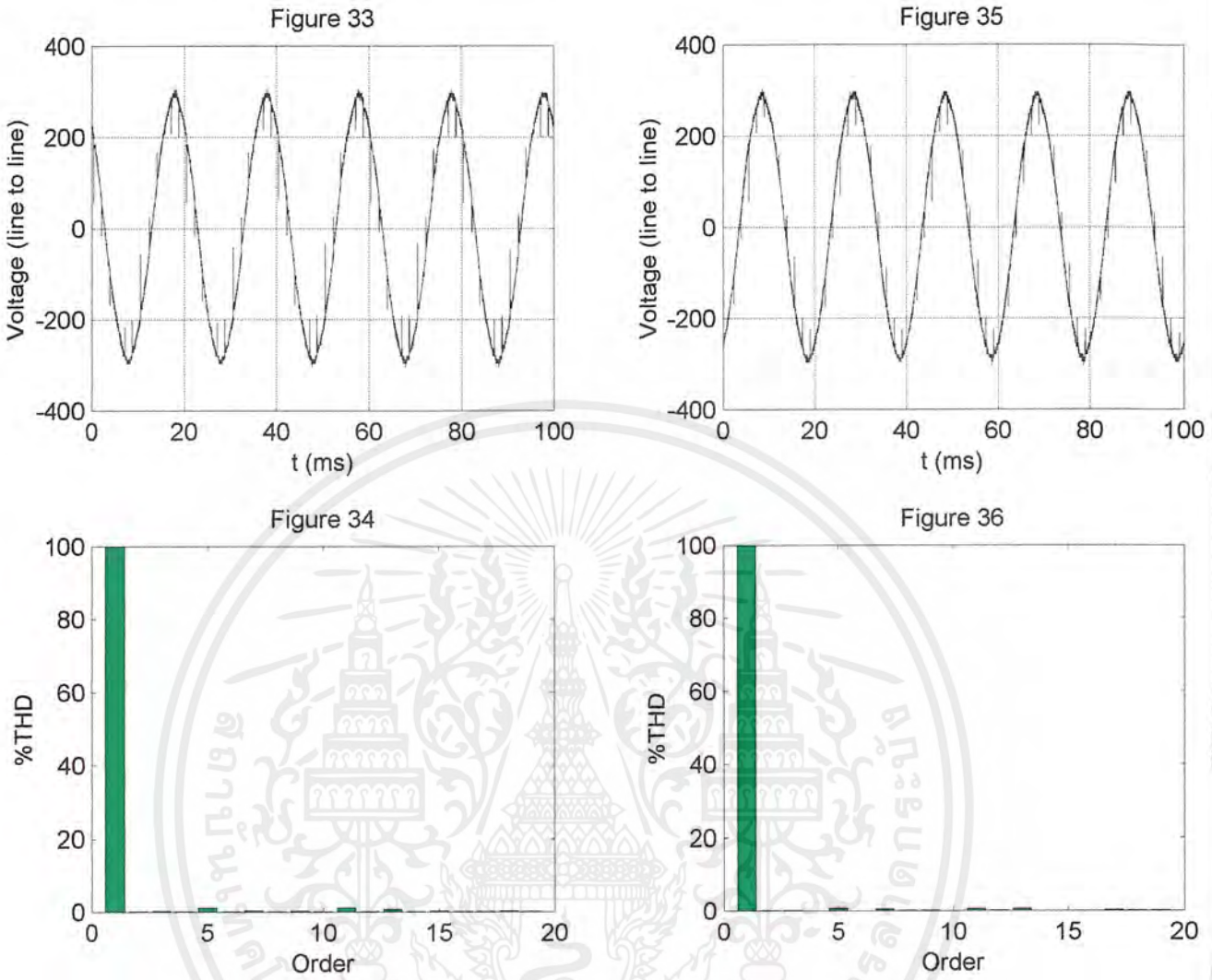
รูปที่ 4.42 (Figure 29) รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A)

รูปที่ 4.43 (Figure 30) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไปA)

รูปที่ 4.44 (Figure 31) รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B (V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A)

รูปที่ 4.45 (Figure 32) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน B (V เท่ากัน ,หลังส่ง B ไป A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



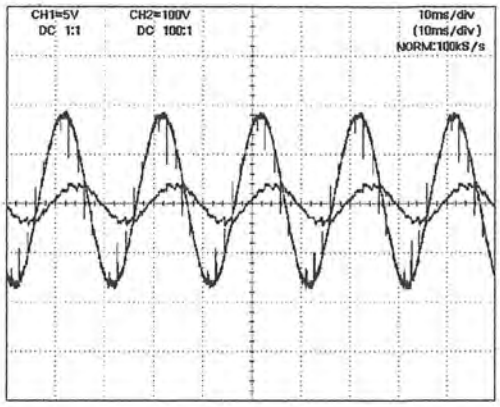
รูปที่ 4.46 (Figure 33) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A)

รูปที่ 4.47 (Figure 34) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A)

รูปที่ 4.48 (Figure 35) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A)

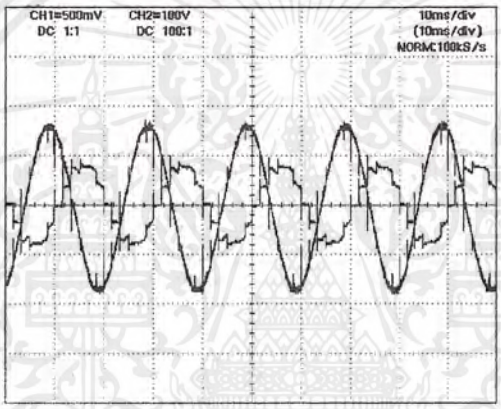
รูปที่ 4.49 (Figure 36) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V เท่ากัน , หลังส่ง B ไป A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



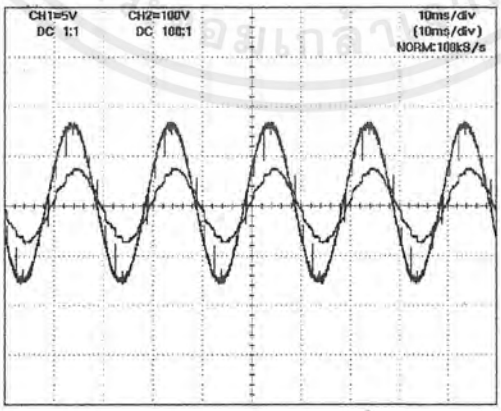
รูปที่ 4.50 สัญญาณกระแสและแรงดันที่แหล่งกำเนิดด้าน A

(V เท่ากัน, หลังส่งถ่ายจาก B ไป A)



รูปที่ 4.51 สัญญาณกระแสและแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้าน A

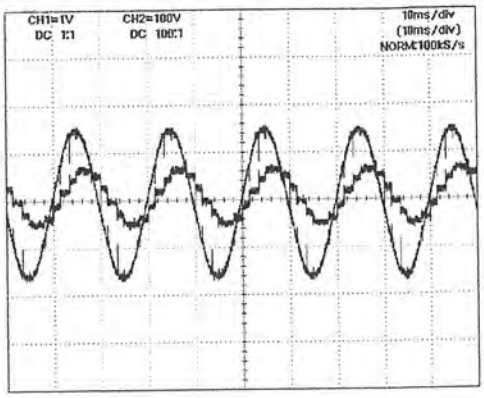
(V เท่ากัน, หลังส่งถ่ายจาก B ไป A)



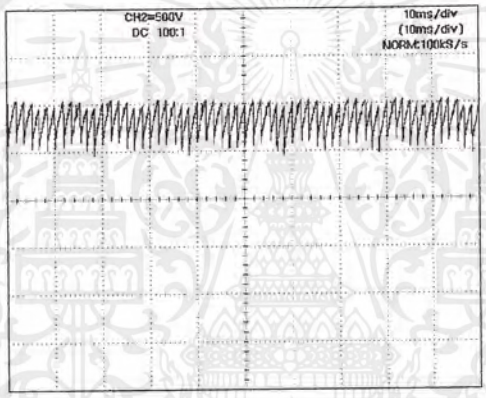
รูปที่ 4.52 สัญญาณกระแสและแรงดันที่แหล่งกำเนิดด้าน B

(V เท่ากัน, หลังส่งถ่ายจาก B ไป A)

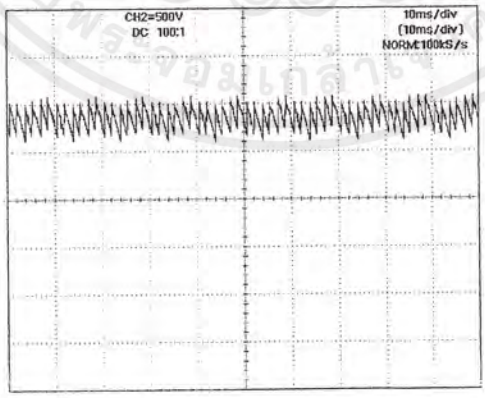
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.53 สัญญาณกระแสและแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้าน B
(V เท่ากัน, หลังส่งถ่ายจาก B ไป A)

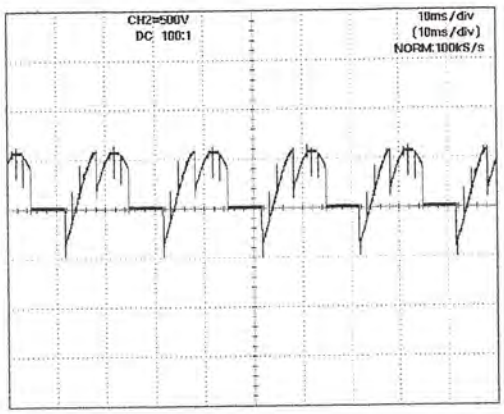


รูปที่ 4.54 แรงดันกระแสตรงด้าน A
(V เท่ากัน, หลังส่งจาก B ไป A)

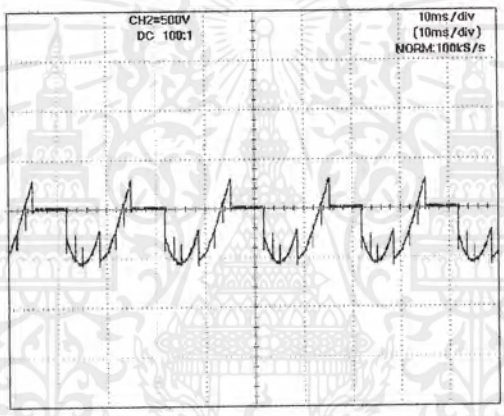


รูปที่ 4.55 แรงดันกระแสตรงด้าน B
(V เท่ากัน, หลังส่งจาก B ไป A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 แรงดันคร่อม SCR ด้าน A
(V เท่ากัน, หลังส่งจาก B ไป A)



รูปที่ 4.57 แรงดันคร่อม SCR ด้าน B
(V เท่ากัน, หลังส่งจาก B ไป A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองที่ 2 การทดลองส่งถ่ายกำลังงานที่ระดับแรงดันต่างกัน

4.2.1 ลำดับขั้นการทดลองที่ 2

1) ต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 4.1
2) ต่อโหลดความต้านทาน 3ϕ (หลอด Incandescent 100 W) ด้านสับสเตชั่น A จำนวน 33 หลอด และด้านสับสเตชั่น B จำนวน 30 หลอด
3) จ่ายไฟด้านสับสเตชั่น A โดยจ่ายให้ได้แรงดัน 200 โวลท์ (line-to-line) และด้านสับสเตชั่น B ให้ได้แรงดัน 180 โวลท์ (line-to-line)
4) สังเกตและบันทึกผลก่อนทำการส่งถ่ายกำลังงาน
5) ทำการปรับมุมคอนเวอร์เตอร์ A ให้ทำงานในโหมดเรคติฟาย แล้วทำการปรับมุมคอนเวอร์เตอร์ B ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์
6) สังเกตและบันทึกผล
7) ปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองให้หยุดทำงาน
8) ทำการปรับมุมคอนเวอร์เตอร์ B ให้ทำงานในโหมดเรคติฟาย แล้วทำการปรับมุมคอนเวอร์เตอร์ A ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์
9) สังเกตและบันทึกผล
10) ปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองให้หยุดทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 2

กรณีที่ 2.1 แรงดันต่างกัน (V_A = 200 V_{LL} ,V_B = 180 V_{LL}) , ความถี่ 50 Hz
ก่อนส่งถ่ายกำลังงาน

	SUBSTATION A		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	3.83	3.32	0.2
V_{LL} (V)	210	207	207
P (W)	1248	1170	96
Q (VAR)	600	253	340
S (VA)	1390	1197	360
PF	0.90	0.98	0.26
θ	25.84	11.47	74.93

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A
(แรงดันต่างกัน)

	SUBSTATION A				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	4.01	4.05	1	4.07	1.7
I_L (A)	3.34	3.10	7	3.10	7
V_{LL} (V)	206.24	203.35	1.4	203	1.5

ตารางที่ 4.16 ค่าของกระแสและแรงดันก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A
(แรงดันต่างกัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

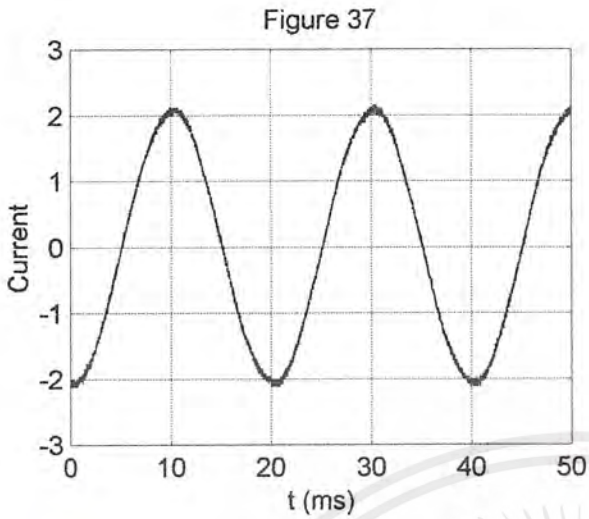
	SUBSTATION B		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	4.30	3.92	0.8
V_{LL} (V)	178.4	178	180
P (W)	1287	1236	60
Q (VAR)	512	216	280
S (VA)	1358	1257	300
PF	0.93	0.98	0.20
θ	21.56	11.48	78.46

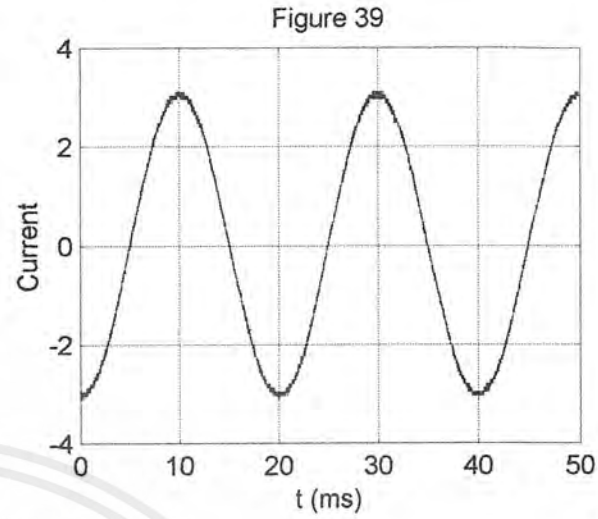
ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B (แรงดันต่างกัน)

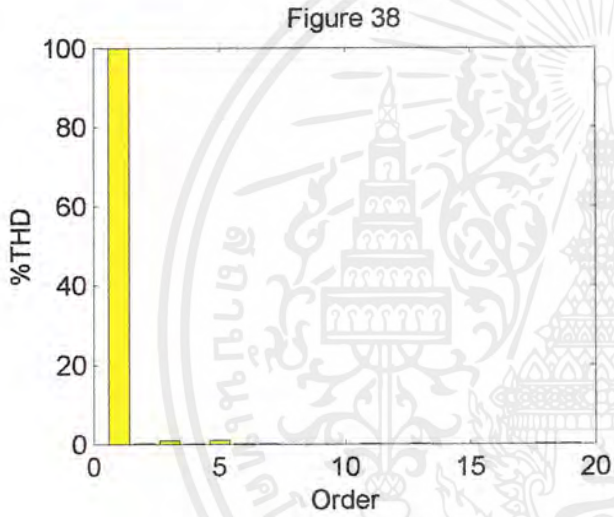
	SUBSTATION B				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	4.62	4.38	5.4	4.32	6.90
I_L (A)	4.27	4.30	0.6	4.30	0.60
V_{LL}(V)	179.72	182.6	1.5	180.5	0.43

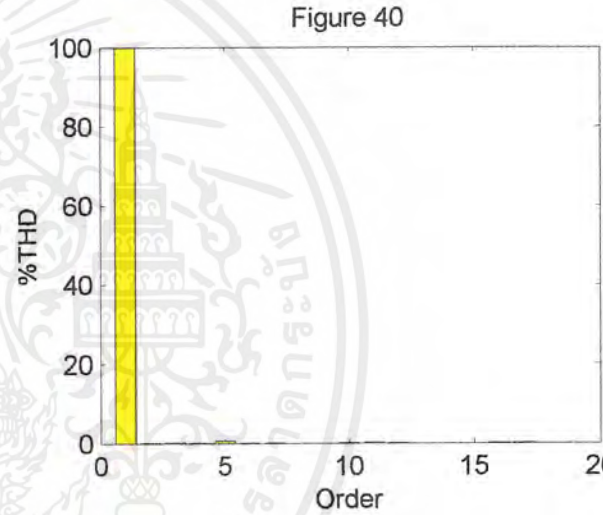
ตารางที่ 4.18 ค่าของกระแสและแรงดันก่อนส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B (แรงดันต่างกัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









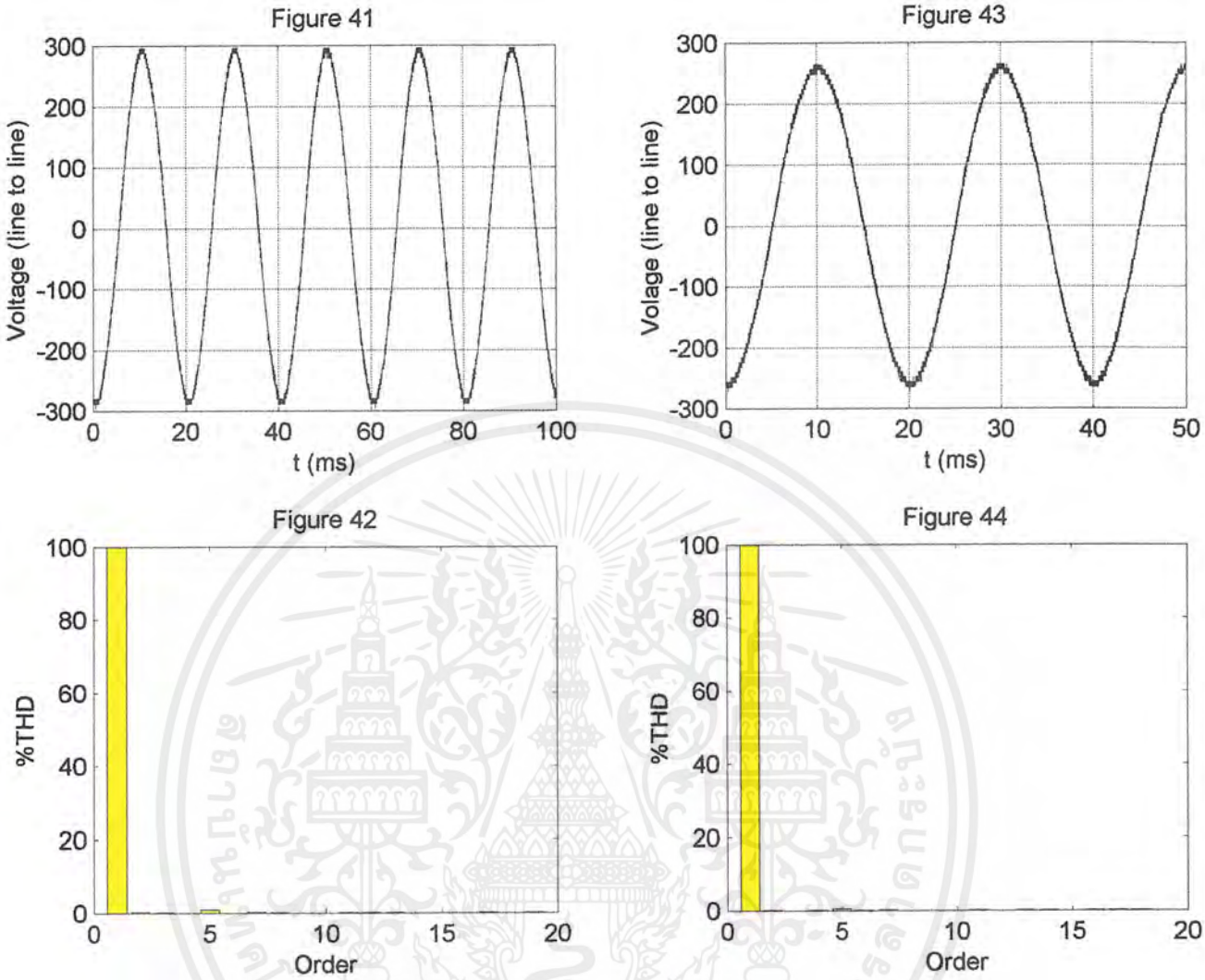
รูปที่ 4.58 (Figure 37) รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน ,ก่อนส่ง)

รูปที่ 4.59 (Figure 38) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน ,ก่อนส่ง)

รูปที่ 4.60 (Figure 39) รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B (V ต่างกัน ,ก่อนส่ง)

รูปที่ 4.61 (Figure 40) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์โหลดด้าน B (V ต่างกัน , ก่อนส่ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



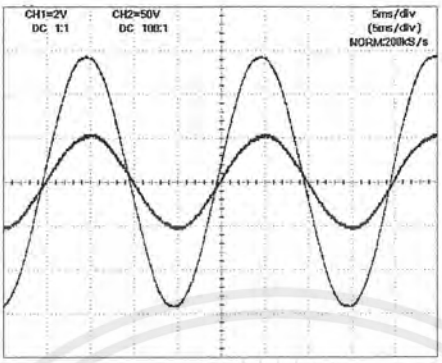
รูปที่ 4.62 (Figure 41) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน , ก่อนส่ง)

รูปที่ 4.63 (Figure 42) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน , ก่อนส่ง)

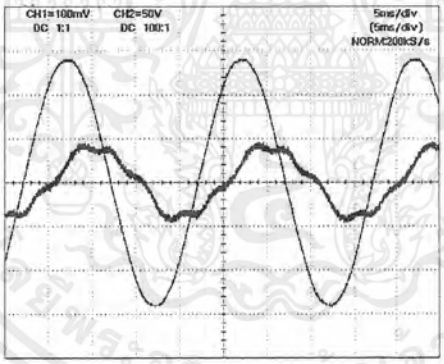
รูปที่ 4.64 (Figure 43) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน , ก่อนส่ง)

รูปที่ 4.65 (Figure 44) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน , ก่อนส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.67 สัญญาณกระแสและแรงดันที่แหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน, ก่อนส่งถ่าย)



รูปที่ 4.68 สัญญาณกระแสและแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้าน B
(V ต่างกัน, ก่อนส่งถ่าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2.2 แรงดันต่างกัน ($V_A = 200\ V_{LL}, V_B = 180\ V_{LL}$), ความถี่ 50 Hz
หลังส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B

	SUBSTATION A		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	6.20	3.32	3.12
V_{LL} (V)	203	201	204
P (W)	2019	1170	759
Q (VAR)	753	253	490
S (VA)	2157	1197	904
PF	0.93	0.98	0.84
θ	21.56	11.48	32.86

ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B)

	SUBSTATION A				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	6.83	6.70	1.90	6.65	2.7
I_L (A)	3.29	3.55	7.30	3.60	8.6
V_{LL}(V)	200	198.45	0.78	198	1.0

ตารางที่ 4.20 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	SUBSTATION B		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	3.39	3.92	2.60
V_{LL} (V)	178.4	178	104
P (W)	732	1236	-510
Q (VAR)	520	216	300
S (VA)	90.	1257	592
PF	0.81	0.98	0.86
θ	35.90	11.48	30.68

ตารางที่ 4.21 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B)

	SUBSTATION B				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	3.66	3.0	22	2.97	22
I_L (A)	4.10	4.28	4.2	4.28	4.2
V_{LL}(V)	179.72	181	0.7	178.9	0.45

ตารางที่ 4.22 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC LINE		
	SUBSTATION A	SUBSTATION B
Idc (A)	0.85	0.85
Vdc (V)	780	760
Wdc (W)	663	646

ตารางที่ 4.23 ค่ากระแสและแรงดันในสายส่งขณะส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation A ไป Substation B

จากตารางที่ 4.23

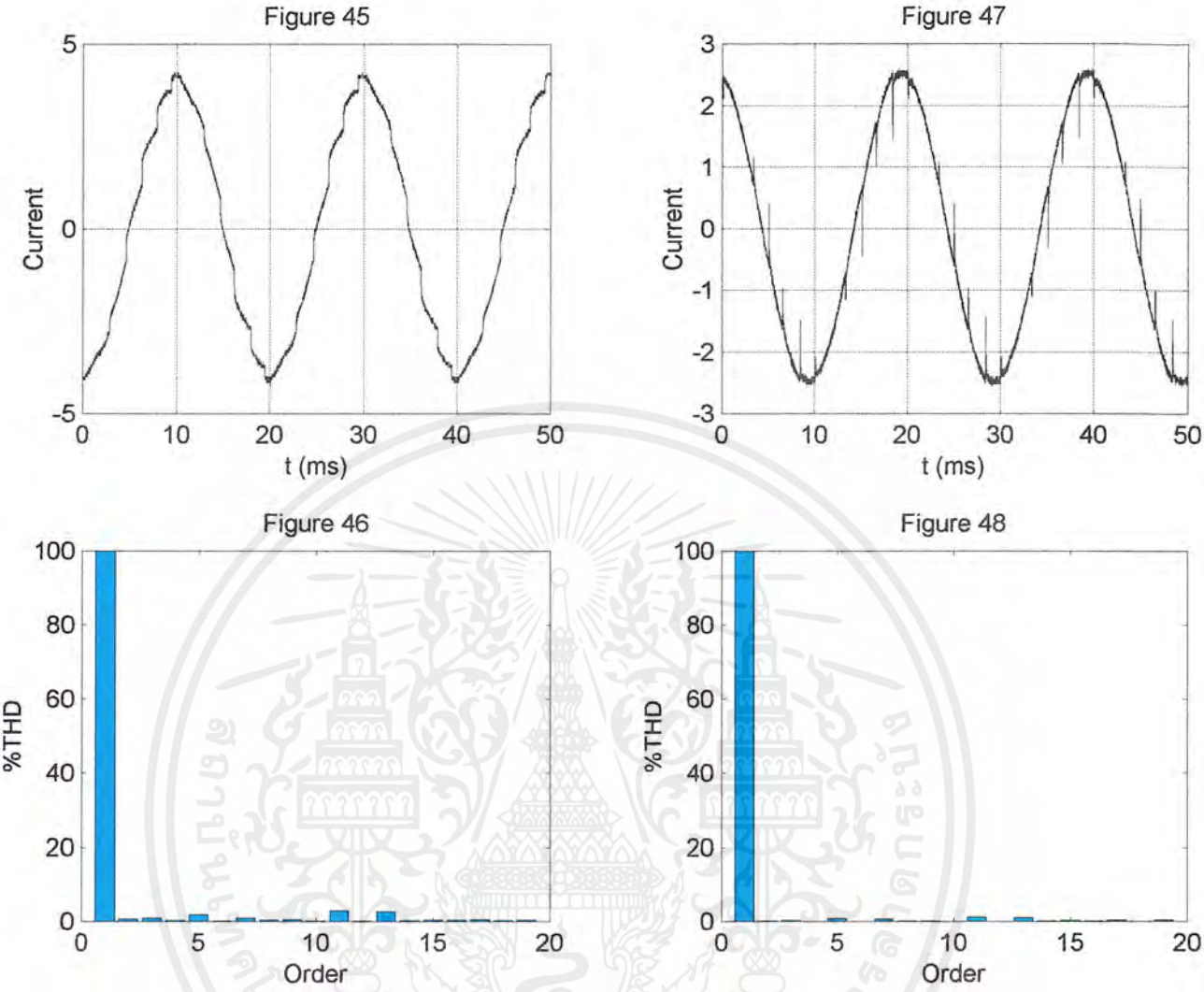
ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\eta = \frac{Pout}{Pin}$$

$$= \frac{510}{759}$$

$$= 0.6719 \text{ หรือ } 67.19\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



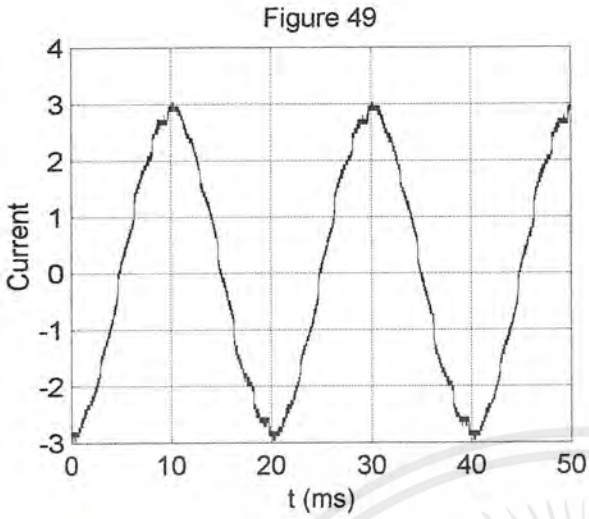
รูปที่ 4.68 (Figure 45) รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B)

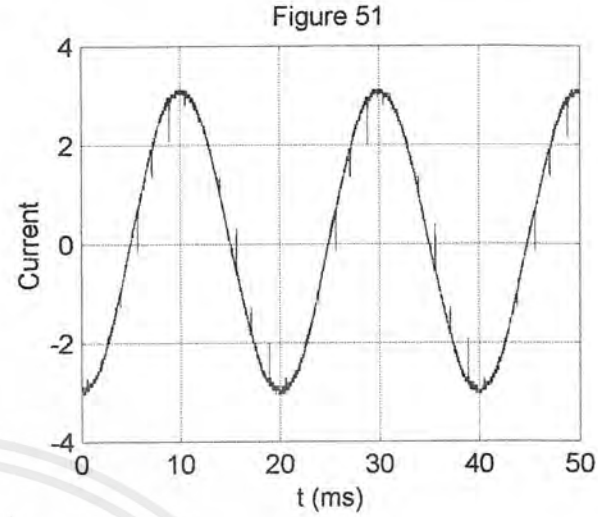
รูปที่ 4.69 (Figure 46) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B)

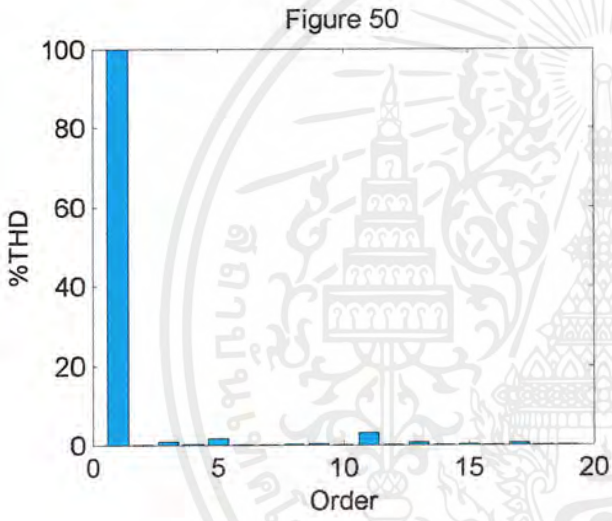
รูปที่ 4.70 (Figure 47) รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน A (V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B)

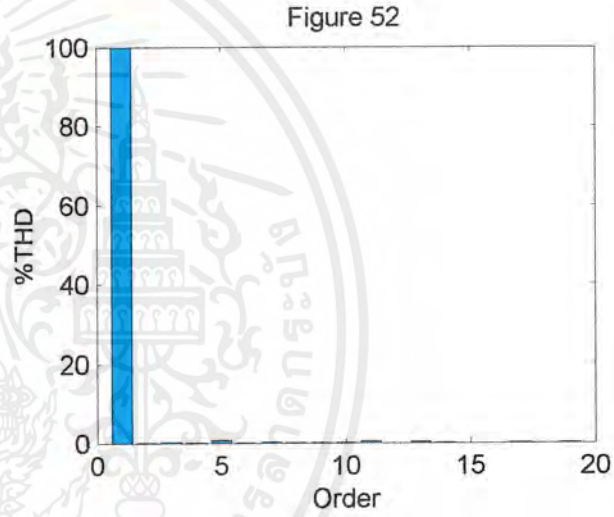
รูปที่ 4.71 (Figure 48) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน A (V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









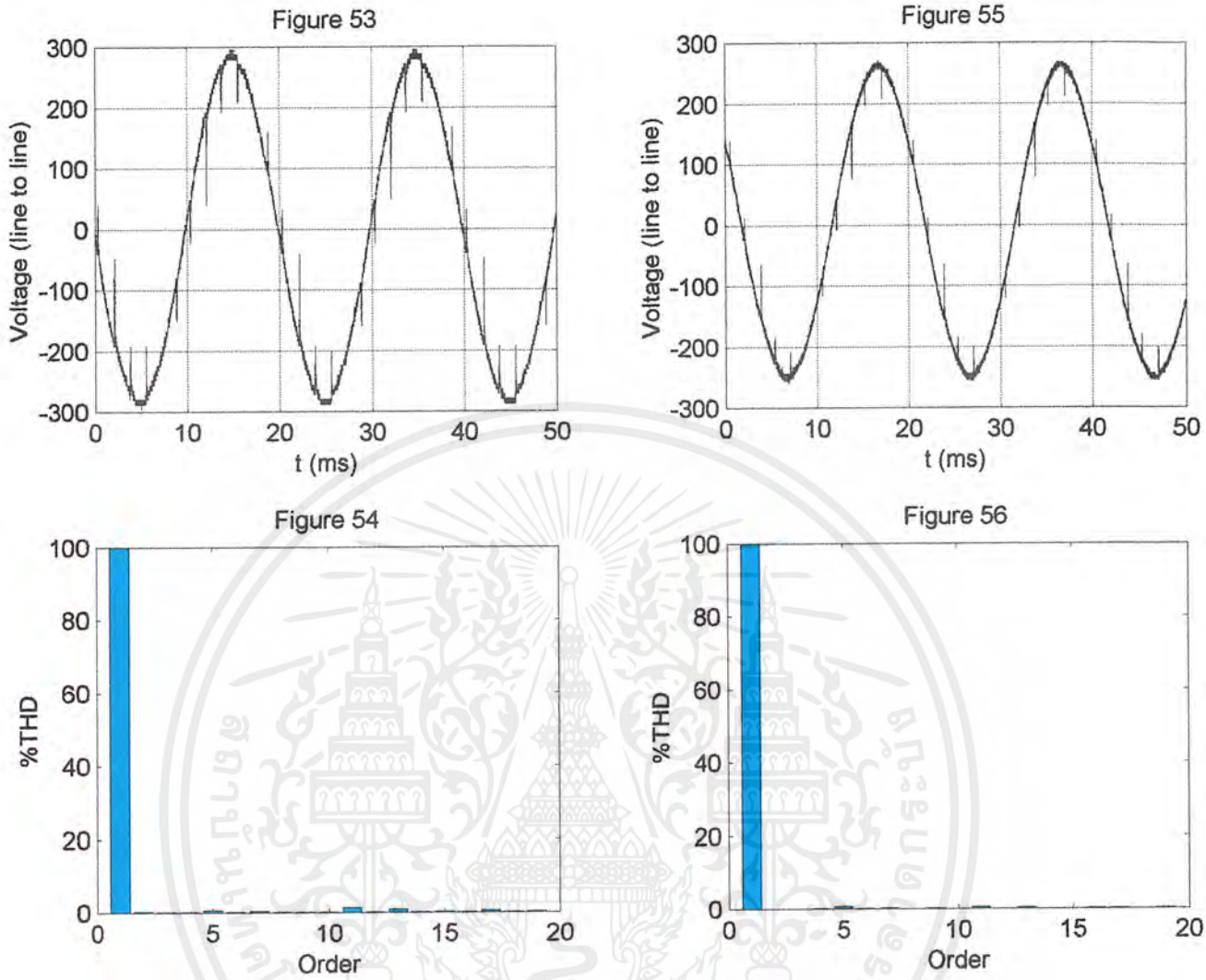
รูปที่ 4.72 (Figure 49) รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B)

รูปที่ 4.73 (Figure 50 รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B)

รูปที่ 4.74 (Figure 51) รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B (V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B)

รูปที่ 4.75 (Figure 52) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน B (V ต่างกัน ,หลังส่ง A ไป B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



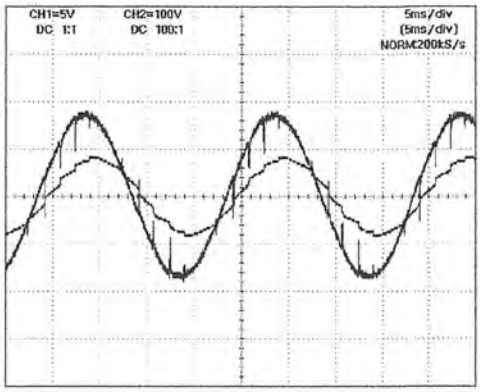
รูปที่ 4.76 (Figure 53) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B)

รูปที่ 4.77 (Figure 54) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B)

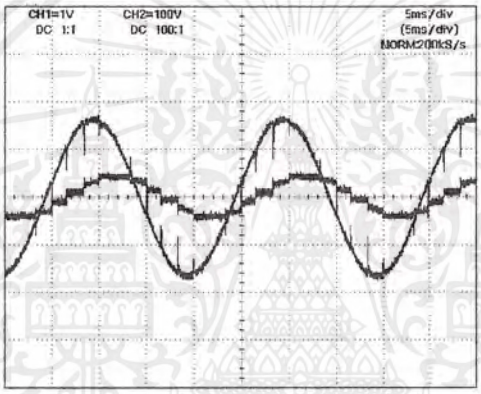
รูปที่ 4.78 (Figure 55) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B)

รูปที่ 4.79 (Figure 56) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน , หลังส่ง A ไป B)

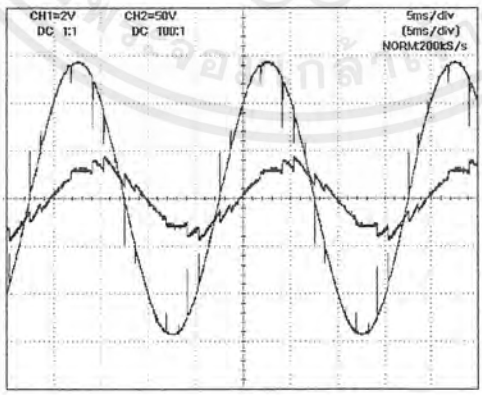
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.80 สัญญาณกระแสและแรงดันที่แหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน, หลังส่งถ่ายจาก A ไป B)

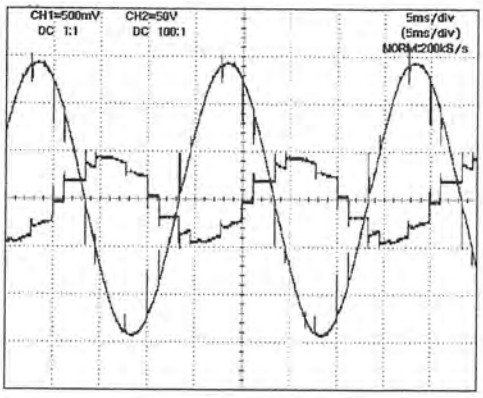


รูปที่ 4.81 สัญญาณกระแสและแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้าน A
(V ต่างกัน, หลังส่งถ่ายจาก A ไป B)

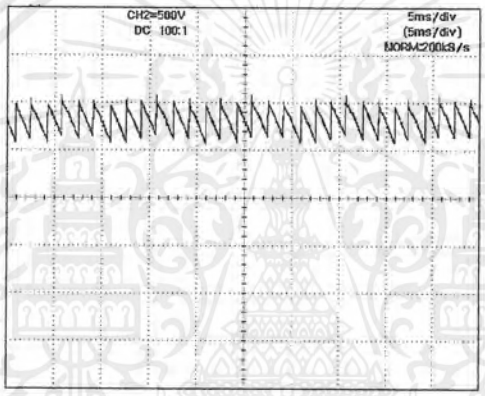


รูปที่ 4.82 สัญญาณกระแสและแรงดันที่แหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน, หลังส่งถ่ายจาก A ไป B)

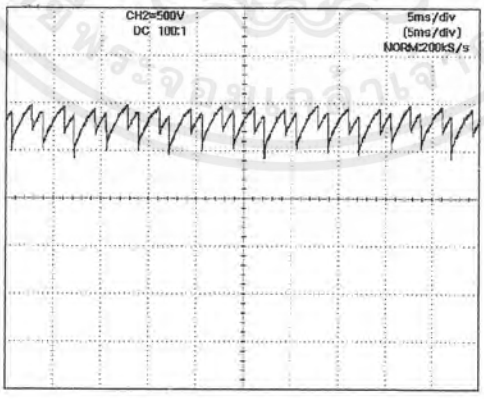
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.83 สัญญาณกระแสและแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้าน B
(V ต่างกัน, หลังส่งถ่ายจาก A ไป B)

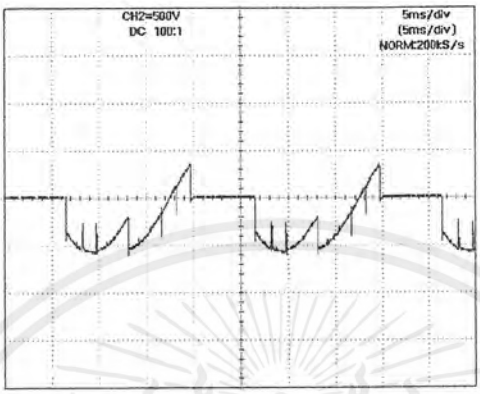


รูปที่ 4.84 แรงดันกระแสตรงด้าน A
(V ต่างกัน, หลังส่งจาก A ไป B)

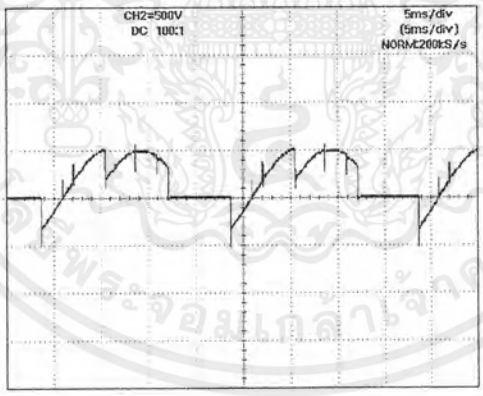


รูปที่ 4.85 แรงดันกระแสตรงด้าน B
(V ต่างกัน, หลังส่งจาก A ไป B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.86 แรงดันคร่อม SCR ด้าน A
(V ต่างกัน, หลังส่งจาก A ไป B)



รูปที่ 4.87 แรงดันคร่อม SCR ด้าน B
(V ต่างกัน, หลังส่งจาก A ไป B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2.3 แรงดันต่างกัน ($V_A = 200\ V_{LL}, V_B = 180\ V_{LL}$) , ความถี่ 50 Hz

หลังส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A

	SUBSTATION A		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	3.35	3.32	2.03
V_{LL} (V)	202	201	202
P (W)	1074	1170	-252
Q (VAR)	209	253	360
S (VA)	415	4497	440
PF	0.86	0.98	0.57
θ	30.68	11.48	55.25

ตารางที่ 4.24 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A)

	SUBSTATION A				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	3.48	3.57	2.5	3.55	1.97
I_L (A)	3.34	3.58	6.70	3.46	3.47
V_{LL}(V)	202.6	202.4	0.1	200.9	0.5

ตารางที่ 4.25 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation A
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	SUBSTATION B		
	SOURCE	LOAD	CONVERTER
I (A)	5.53	3.92	1.93
V_{LL} (V)	179.2	178	176
P (W)	1620	1236	390
Q (VAR)	480	216	250
S (VA)	1690	1257	465
PF	0.96	0.98	0.83
θ	0.10	11.48	33.9

ตารางที่ 4.26 ผลการทดลองหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A)

	SUBSTATION B				
	COMPUTER	MATLAB		SCOPE	
		ค่าที่วัด	%ERROR	ค่าที่วัด	%ERROR
I_g (A)	5.80	5.90	1.60	5.95	2.52
I_L (A)	4.07	4.0	1.75	3.99	2.00
V_{LL}(V)	179.7	178.6	0.6	188.2	4.50

ตารางที่ 4.27 ค่าของกระแสและแรงดันหลังส่งถ่ายกำลังงานด้าน Substation B
(ส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC LINE		
	SUBSTATION A	SUBSTATION B
Idc (A)	0.5	0.5
Vdc (V)	700	710
Wdc (W)	350	355

ตารางที่ 4.28 ค่ากระแสและแรงดันในสายส่งขณะส่งถ่ายกำลังงานจาก Substation B ไป Substation A

จากตารางที่ 4.28 ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\eta = \frac{Pout}{Pin}$$

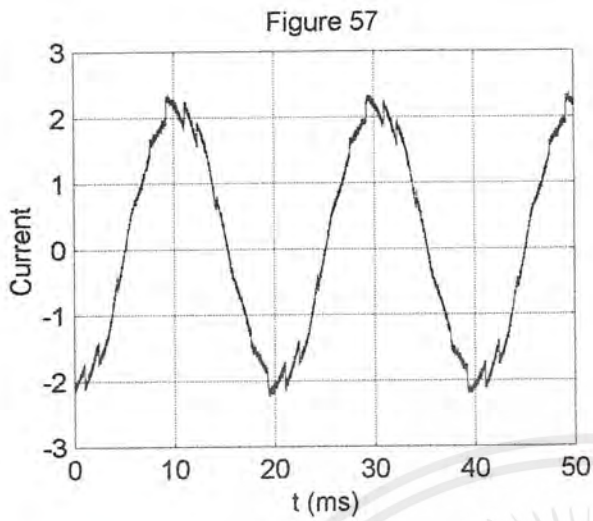
$$= \frac{252}{390}$$

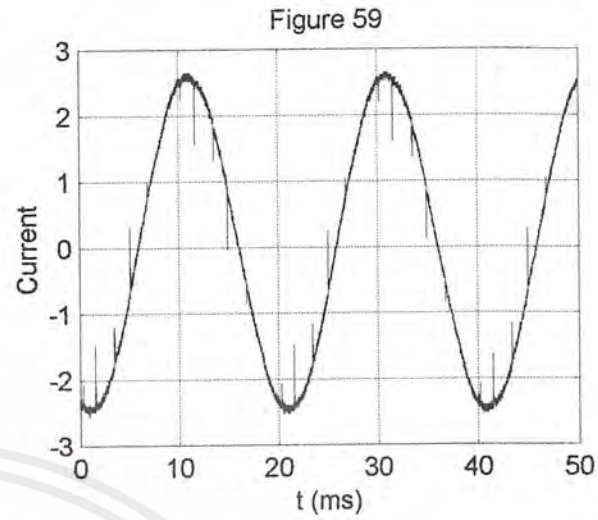
$$= 0.6461 \text{ หรือ } 64.61\%$$

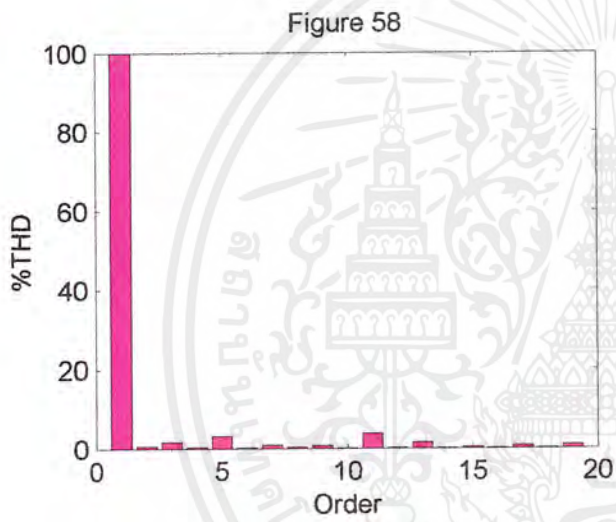
สรุปผลการทดลอง

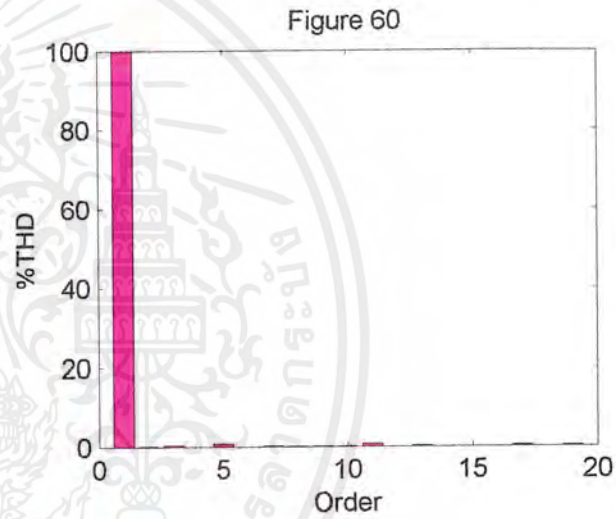
จากการทดลองเป็นการแสดงให้เห็นจริงว่าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยกระแสตรงสามารถเชื่อมต่อกับระบบกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่มีระดับแรงดันไม่เท่ากันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









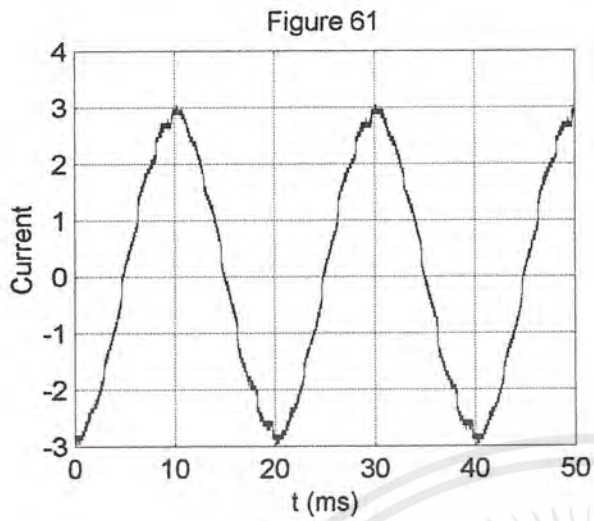
รูปที่ 4.88 (Figure 57) รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A)

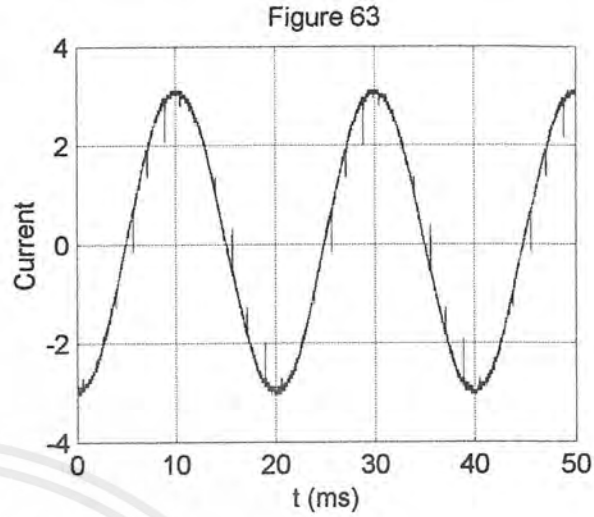
รูปที่ 4.89 (Figure 58) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A)

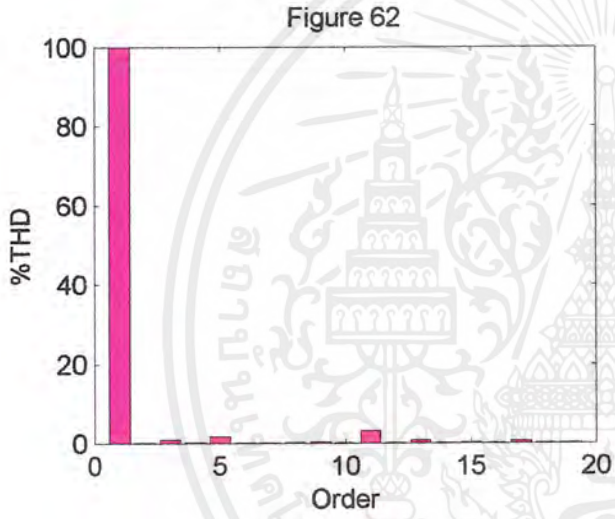
รูปที่ 4.90 (Figure 59) รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน A (V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A)

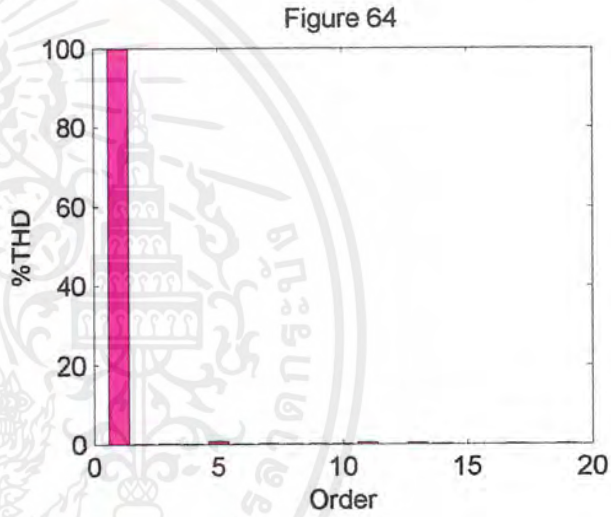
รูปที่ 4.91 (Figure 60) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน A (V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









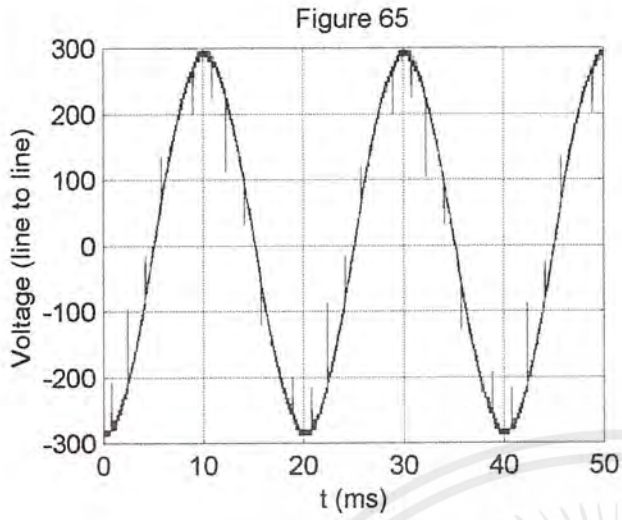
รูปที่ 4.92 (Figure 61) รูปคลื่นกระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A)

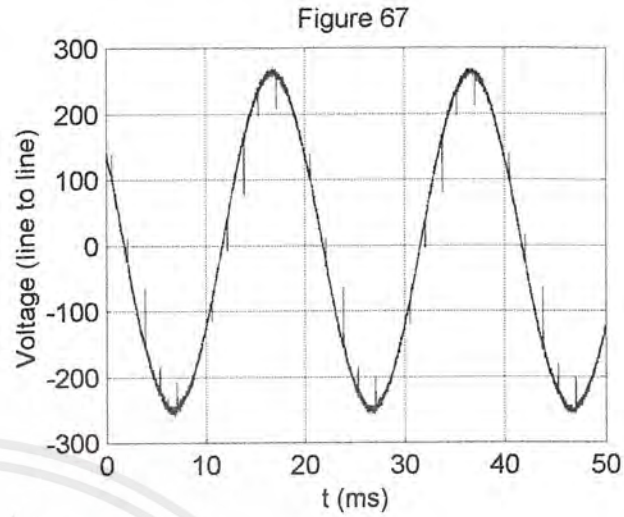
รูปที่ 4.93 (Figure 62) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A)

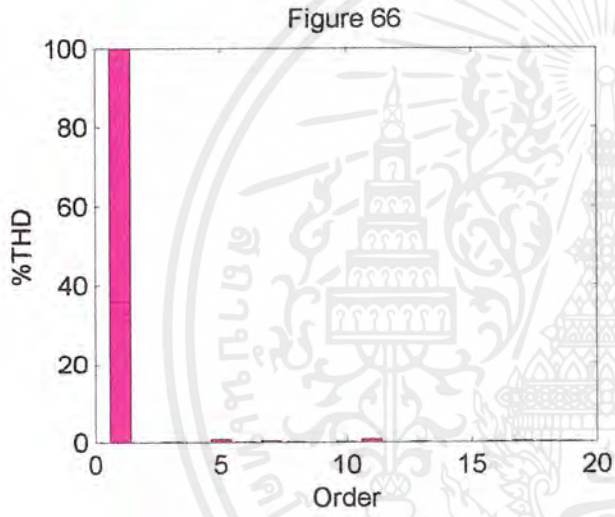
รูปที่ 4.94 (Figure 63) รูปคลื่นกระแสโหลดด้าน B (V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A)

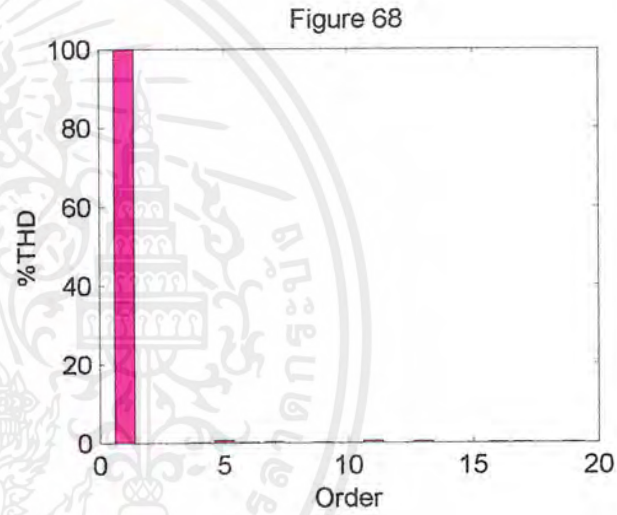
รูปที่ 4.95 (Figure 64) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์กระแสโหลดด้าน B (V ต่างกัน ,หลังส่ง B ไป A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









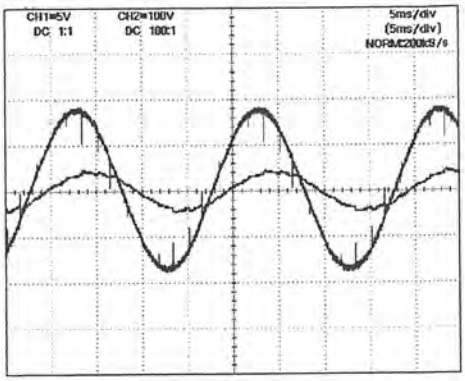
รูปที่ 4.96 (Figure 65) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A)

รูปที่ 4.97 (Figure 66) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน A (V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A)

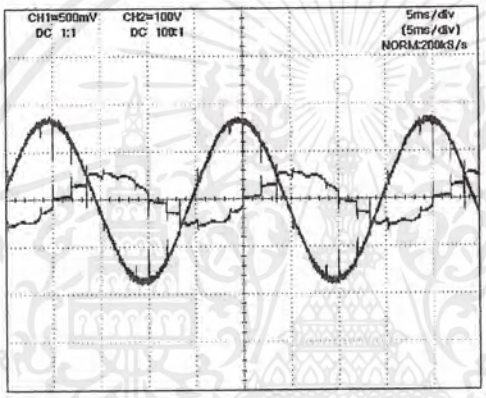
รูปที่ 4.98 (Figure 67) รูปคลื่นแรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A)

รูปที่ 4.99 (Figure 68) รูปคลื่นฮาร์โมนิคส์แรงดันแหล่งกำเนิดด้าน B (V ต่างกัน , หลังส่ง B ไป A)

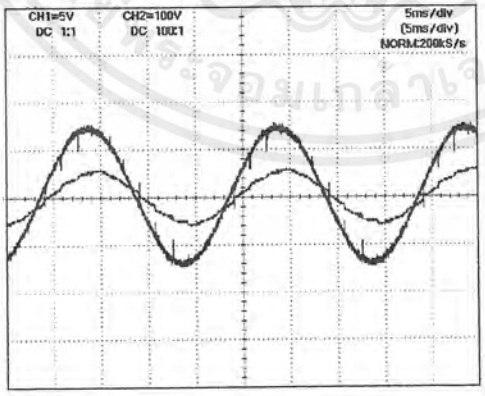
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.100 สัญญาณกระแสและแรงดันที่แหล่งกำเนิดด้าน A
(V ต่างกัน, หลังส่งถ่ายจาก B ไป A)

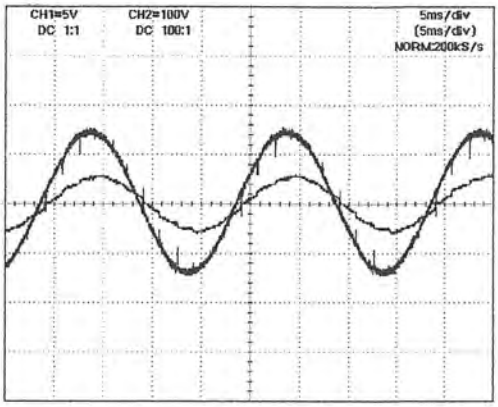


รูปที่ 4.101 สัญญาณกระแสและแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้าน A
(V ต่างกัน, หลังส่งถ่ายจาก B ไป A)

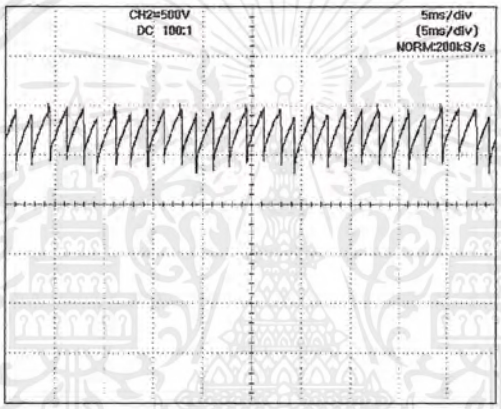


รูปที่ 4.102 สัญญาณกระแสและแรงดันที่แหล่งกำเนิดด้าน B
(V ต่างกัน, หลังส่งจาก B ไป A)

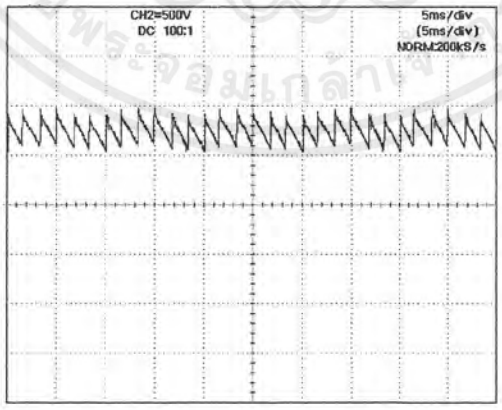
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.103 สัญญาณกระแสและแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้าน B
(V ต่างกัน, หลังส่งถ่ายจาก B ไป A)

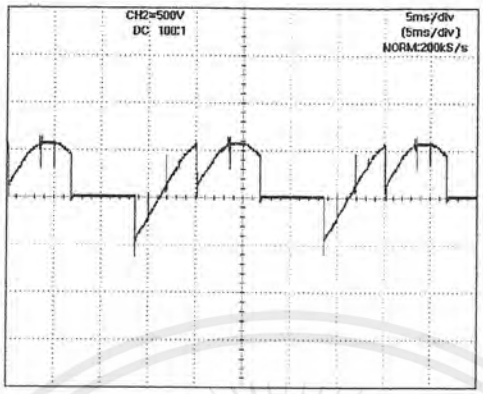


รูปที่ 4.104 แรงดันกระแสตรงด้าน A
(V ต่างกัน, หลังส่งจาก B ไป A)

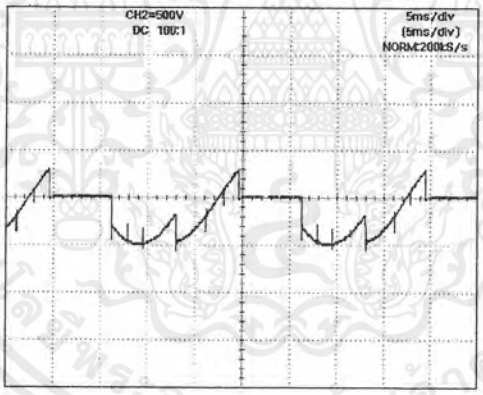


รูปที่ 4.105 แรงดันกระแสตรงด้าน B
(V ต่างกัน, หลังส่งจาก B ไป A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.106 แรงดันตกคร่อม SCR ด้าน A
(V ต่างกัน, หลังส่งจาก B ไป A)



รูปที่ 4.107 แรงดันตกคร่อม SCR ด้าน B
(V ต่างกัน, หลังส่งจาก A ไป B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทวิจารณ์และสรุป

วัตถุประสงค์หลักของโครงงานการควบคุมระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล คือ สามารถควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างชุดจำลอง และรับค่ากระแสกับแรงดันมาแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง และสะดวกในการใช้งานมากขึ้น

การทำงานของชุดควบคุมที่ได้สร้างขึ้นมา สามารถควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าพร้อมทั้งแสดงค่ากระแสและแรงดันที่จอคอมพิวเตอร์จริง ทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และสะดวกต่อการใช้งานมากกว่าการควบคุมด้วยมนุษย์ แต่จะมีความคลาดเคลื่อนในค่ากระแสและแรงดันที่นำมาแสดงผล นอกจากนี้ค่าที่นำมาแสดงผลยังไม่ครบตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ซึ่งจะอธิบายสาเหตุและแนวทางแก้ไขดังนี้

1. ความเร็วของโปรแกรมในการเก็บข้อมูลไม่เพียงพอ ทำให้ข้อมูลที่นำมาประมวลผลหาค่าประสิทธิผลของสัญญาณ ไม่มากพอที่จะทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำร้อยเปอร์เซนต์
2. ผลของฮาร์โมนิคส์ทำให้รูปคลื่นแรงดันไม่เป็นรูปไซน์อย่างแท้จริง
3. ตัวความต้านทานที่ใช้ตรวจจับสัญญาณรูปคลื่นแรงดันมีค่าไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แนวทางแก้ไขเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของค่าสัญญาณที่เข้าสู่คอมพิวเตอร์ ควรเลือกใช้ตัวความต้านทานที่มีคุณสมบัติที่ดี ค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เช่น เปลี่ยนมาใช้เลม (LEM) ในการตรวจจับ ซึ่งเป็นตัวไอซีชนิดหนึ่งเนื่องจาก LEM มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสคงที่
4. ไม่สามารถแสดงค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real Power : W) ได้ แต่จะแสดงค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) ซึ่งได้จากผลคูณของแรงดันและกระแสคอมพิวเตอร์ประมวลผลออกมา เนื่องจากไม่สามารถตรวจรับค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ได้
5. ไม่สามารถตรวจจับค่าสัญญาณแรงดันและกระแสทางด้านดีซีได้ เนื่องจากไม่สามารถแยกกราวน์ของชุดจำลองออกจากชุดตรวจจับสัญญาณได้ แนวทางการแก้ไขจำเป็นต้องสร้างวงจรสวิทชิ่ง (Switching) เพื่อทำการแยกกราวน์ ซึ่งต่างจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถใช้หม้อแปลงแยกกราวน์ได้

สำหรับการเชื่อมโยงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 2 แหล่งที่มีความถี่แตกต่างกัน ซึ่งวางแผนไว้ว่าจะทำการทดลองโดยใช้ซิงโครนัสเจนเนอเรเตอร์ (Synchronous Generator) เป็นต้นกำเนิดกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าของระบบ แต่ไม่สามารถทำได้เพราะรูปร่างและขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเฟสชิฟ (Phase Shift) ไม่คงที่และรูปคลื่นแรงดันไม่เป็นรูปไซน์อย่างแท้จริง รวมทั้งการควบคุมความเร็วตัวต้นกำลังและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วค่อนข้างเป็นไปด้วยความลำบาก เนื่องจากไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ (Governer) จึงไม่สามารถทำการทดลองในกรณีนี้ได้

ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองเป็นอุปสรรคที่สำคัญของโครงงาน แต่ก็ทำให้เห็นแนวทางของการนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ระบบควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นนี้ยังไม่สมบูรณ์ ควรมีการพัฒนาปรับปรุงเช่น ควรสร้างวงจรแยกกราวน์ดีซี เพื่อให้สามารถตรวจจับค่าสัญญาณกระแสและแรงดันทางด้านดีซีมาแสดงที่จอคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงการไหลและปริมาณการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ารวมทั้งควรเปลี่ยนตัวจับสัญญาณแรงดันที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น แทนการใช้ตัวความต้านทานเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของค่ากระแสและแรงดันให้น้อยลงจนใกล้เคียงค่าจริงมากขึ้น ซึ่งจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit hvdc;

interface

uses
 Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
 StdCtrls, Buttons, Menus, ExtCtrls, varible ;

type
 TForm1 = class(TForm)
  MainMenu1: TMainMenu;
  HVDC1: TMenuItem;
  Run1: TMenuItem;
  Help1: TMenuItem;
  Group_subA: TGroupBox;
  Group_subB: TGroupBox;
  Exit2: TMenuItem;
  Run2: TMenuItem;
  Grp_A_Ig_val: TEdit;
  Grp_A_I_load_val: TEdit;
  Grp_A_Volt_val: TEdit;
  Grp_A_Ig: TLabel;
  Grp_A_I_load: TLabel;
  Grp_A_Volt: TLabel;
  Grp_A_ig_unit: TLabel;
  Grp_A_I_load_unit: TLabel;
  Grp_A_Volt_unit: TLabel;
  Grp_B_Ig_val: TEdit;
  Grp_B_I_load_val: TEdit;
  Grp_B_Volt_val: TEdit;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Grp_B_Ig: TLabel;

Grp_B_I_load: TLabel;

Grp_B_Volt: TLabel;

Grp_B_ig_unit: TLabel;

Grp_B_I_load_unit: TLabel;

Grp_B_Volt_unit: TLabel;

Button1: TButton;

Button2: TButton;

BitBtn1: TBitBtn;

Group_line: TGroupBox;

Grp_line_Volt_val: TEdit;

Grp_line_I_val: TEdit;

Grp_line_Power_val: TEdit;

Grp_line_Volt: TLabel;

Grp_line_I: TLabel;

Grp_line_Power: TLabel;

Image1: TImage;

Timer1: TTimer;

Grp_A_Power: TLabel;

Grp_A_Power_unit: TLabel;

Grp_B_Power: TLabel;

Grp_B_Power_val: TEdit;

Grp_B_Power_unit: TLabel;

Grp_line_Volt_unit: TLabel;

Grp_line_I_unit: TLabel;

Grp_line_Power_unit: TLabel;

View1: TMenuItem;

All1: TMenuItem;

N1: TMenuItem;

About1: TMenuItem;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Mode1: TMenuItem;
PopupMenu1: TPopupMenu;
Show_graph1: TMenuItem;
ControlPanel1: TMenuItem;
VoltonSubB1: TMenuItem;
Stop1: TMenuItem;
SubstationA2: TMenuItem;
Volt1: TMenuItem;
SuppyCurrent1: TMenuItem;
LoadCurrent1: TMenuItem;
ShowAll1: TMenuItem;
N2: TMenuItem;
SuppyCurrent2: TMenuItem;
LoadCurrent2: TMenuItem;
Grp_A_Power_val: TEdit;
procedure Exit2Click(Sender: TObject);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
procedure All1Click(Sender: TObject);
procedure ControlPanel1Click(Sender: TObject);
procedure VoltonSubB1Click(Sender: TObject);
procedure Run2Click(Sender: TObject);
procedure Stop1Click(Sender: TObject);
procedure About1Click(Sender: TObject);
procedure ShowAll1Click(Sender: TObject);
procedure LoadCurrent2Click(Sender: TObject);
procedure SuppyCurrent2Click(Sender: TObject);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  procedure Volt1Click(Sender: TObject);
  procedure LoadCurrent1Click(Sender: TObject);
  procedure SuppyCurrent1Click(Sender: TObject);
 private
  { Private declarations }
 public
  { Public declarations }
 end;

var
 Form1: TForm1;

implementation

uses  rms, port ,control_panel, graph1 ,graph2, graph3, graph4, graph5,
    graph6 ;
{$R *.DFM}

procedure TForm1.Exit2Click(Sender: TObject);
begin
   close;
end;

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
var  i : byte;
begin
   Image1.Top := 0 ;
   Image1.Left := 10 ;
   onstate := false ;
   index := 1 ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    for i := 1 to 30 do
    begin
        rms_array_1[i] := 0;
        rms_array_2[i] := 0;
        rms_array_3[i] := 0;
        rms_array_4[i] := 0;
        rms_array_5[i] := 0;
        rms_array_6[i] := 0;
    end;
    index := 1;
end;


procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    if (not onstate) then
    begin
        Image1.Picture.LoadFromFile(A_To_B_Map);
        Form3.RadioButton1.checked := true;
        onstate := true ;
        Form3.label10.Caption := 'From Sub A to Sub B';
        Form3.ShowModal ;
        end
    else ShowMessage('Dangerous !! You must be press "Reset" button before...');
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
    if (not onstate) then
    begin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Image1.Picture.LoadFromFile(B_To_A_Map);
        Form3.RadioButton1.Checked := false;
        onstate := true ;
        Form3.label10.Caption := 'From Sub B to Sub A';
        Form3.ShowModal ;
    end
    else ShowMessage('Dangerous !! You must be press "Reset" button before...');
end;

procedure TForm1.BitBtn1Click(Sender: TObject);
begin
    Image1.Picture.LoadFromFile(Default_Map);
    Form3.Button1Click(Sender);
    Form3.Label10.Caption := '';
    onstate := false ;
end;

procedure TForm1.Timer1Timer(Sender: TObject);
var
  i : integer ;
begin
     if (index = 1) then for i := 1 to Sampling_Rate do
         begin
             keep_1[i] := 0;
             keep_2[i] := 0;
             keep_3[i] := 0;
             keep_4[i] := 0;
             keep_5[i] := 0;
             keep_6[i] := 0
         end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if (index <= Sampling_Rate) then
  begin
    keep_1[index] := PortReadByte(Port2_A) ;
    keep_2[index] := PortReadByte(Port2_B) ;
    keep_3[index] := PortReadByte(Port2_C) ;
    keep_4[index] := PortReadByte(Port3_A) ;
    keep_5[index] := PortReadByte(Port3_B) ;
    keep_6[index] := PortReadByte(Port3_C) ;
    { Grp_line_I_val.Text := IntToStr(index);
    Grp_line_Power_val.Text := IntToStr(keep_3[index]);}
    index := index + 1;
  end
  else
  begin
  Grp_B_Volt_val.Text:= FloatToStrF(Sine_rms(check_peak(keep_1))*85.29,ffnumber,7,2);
  Grp_B_I_load_val.Text := FloatToStrF(Sine_rms(check_peak(keep_2))/0.5,ffnumber,7,2);
  Grp_B_Ig_val.Text := FloatToStrF(Sine_rms(check_peak(keep_3))/0.333,ffnumber,7,2);
  Grp_A_Volt_val.Text := FloatToStrF(Sine_rms(check_peak(keep_4))*87,ffnumber,7,2);
  Grp_A_I_load_val.Text:=FloatToStrF(Sine_rms(check_peak(keep_5))/0.53,ffnumber,7,2);
  Grp_A_Ig_val.Text := FloatToStrF(Sine_rms(check_peak(keep_6))/0.422,ffnumber,7,2);
    index := 1;
    for i := 29 downto 1 do
    begin
        rms_array_1[i+1] := rms_array_1[i];
        rms_array_2[i+1] := rms_array_2[i];
        rms_array_3[i+1] := rms_array_3[i];
        rms_array_4[i+1] := rms_array_4[i];
        rms_array_5[i+1] := rms_array_5[i];
        rms_array_6[i+1] := rms_array_6[i];
    end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        rms_array_1[1] := Sine_rms(Check_peak(keep_1)*85.29);
        rms_array_2[1] := Sine_rms(Check_peak(keep_2)/0.5);
        rms_array_3[1] := Sine_rms(Check_peak(keep_3)/0.333);
        rms_array_4[1] := Sine_rms(Check_peak(keep_4)*87);
        rms_array_5[1] := Sine_rms(Check_peak(keep_5)/0.539);
        rms_array_6[1] := Sine_rms(Check_peak(keep_6)/0.422);
        Grp_A_Power_val.Text  := FloatToStrF(sqrt(3)*rms_array_4[1]*rms_array_6
                                 [1],ffnumber,7,2);
        Grp_B_Power_val.Text  := FloatToStrF(sqrt(3)*rms_array_1[1]*rms_array_3
                                 [1],ffnumber,7,2);
    end;
end;

procedure TForm1.All1Click(Sender: TObject);
begin
   Form2.Show ;
   Form4.Show ;
   Form5.Show ;
end;

procedure TForm1.VoltonSubB1Click(Sender: TObject);
begin
   Form2.Show;
end;

procedure TForm1.ControlPanel1Click(Sender: TObject);
begin
   Form3.Showmodal ;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
procedure TForm1.LoadCurrent2Click(Sender: TObject);
begin
   Form4.Show;
end;

procedure TForm1.SuppyCurrent2Click(Sender: TObject);
begin
   Form5.Show ;
end;

procedure TForm1.ShowAll1Click(Sender: TObject);
begin
      Form6.Show;
      Form7.Show;
      Form8.Show;
end;

procedure TForm1.Volt1Click(Sender: TObject);
begin
   Form6.Show ;
end;

procedure TForm1.LoadCurrent1Click(Sender: TObject);
begin
   Form7.Show ;
end;

procedure TForm1.SuppyCurrent1Click(Sender: TObject);
begin
   Form8.Show ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end;

procedure TForm1.Run2Click(Sender: TObject);
begin
   Timer1.Enabled := true;
end;

procedure TForm1.Stop1Click(Sender: TObject);
begin
   Timer1.Enabled := false;
   Grp_A_Volt_val.Text          := '0.00';
   Grp_A_I_load_val.Text        := '0.00';
   Grp_A_Ig_val.Text            := '0.00';
   Grp_A_power_val.text         := '0.00';
   Grp_B_Volt_val.Text          := '0.00';
   Grp_B_I_load_val.Text        := '0.00';
   Grp_B_Ig_val.Text            := '0.00';
   Grp_B_power_val.text         := '0.00';
end;

procedure TForm1.About1Click(Sender: TObject);
begin
   ShowMessage('HVDC Controller version 1.0 ');
end;

end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit control_panel;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, ExtCtrls;

type
  TForm3 = class(TForm)
    ScrollBar1: TScrollBar;
    ScrollBar2: TScrollBar;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Rectifier: TButton;
    Inverter: TButton;
    Timer1: TTimer;
    Button1: TButton;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    Label9: TLabel;
    RadioButton1: TRadioButton;
    RadioButton2: TRadioButton;
    Label10: TLabel;
    procedure ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
      var ScrollPos: Integer);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  procedure ScrollBar2Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
    var ScrollPos: Integer);
  procedure FormCreate(Sender: TObject);
  procedure RectifierClick(Sender: TObject);
  procedure InverterClick(Sender: TObject);
  procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
 private
  { Private declarations }
 public
  { Public declarations }
 end;

var
 Form3: TForm3;

implementation
uses
  port ,varible ;
{$R *.DFM}

procedure TForm3.ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
var ScrollPos: Integer);   { Port1_A }
var i : byte;
begin
  if ScrollCode = scPageUp then ScrollPos := ScrollPos - 1
  else if ScrollCode = scPageDown then ScrollPos := ScrollPos + 1
  else if ScrollCode = scTop Then ScrollPos := ScrollPos;
  i := 255 - ScrollPos ;
  Label4.Caption := IntToStr(i);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  PortWriteByte(Port1_A,i);
end;

procedure TForm3.ScrollBar2Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
 var ScrollPos: Integer);    { Port1_B }
var i : byte;
begin
  if ScrollCode = scPageUp then ScrollPos := ScrollPos - 1
  else if ScrollCode = scPageDown then ScrollPos := ScrollPos + 1
  else if ScrollCode = scTop Then ScrollPos := ScrollPos;
  i := 255 - ScrollPos ;
  Label5.Caption := IntToStr(i);
  PortWriteByte(Port1_B,i);
end;

procedure TForm3.FormCreate(Sender: TObject);
begin
   PortWriteByte(Port1_control,$80);
   PortWriteByte(Port1_A,0);
   PortWriteByte(Port1_B,0);
   ScrollBar1.Position := 255;
   ScrollBar2.Position := 255;
   Label4.Caption := '0';
   Label5.Caption := '0';
end;

procedure TForm3.RectifierClick(Sender: TObject);
begin
   if RadioButton1.Checked = true then
   begin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    PortWriteByte(Port1_B,170);
    ScrollBar2.Position := 85 ;
    Label5.Caption := '170';
    end
    else
    begin
    PortWriteByte(Port1_A,200);
    ScrollBar1.Position := 55 ;
    Label4.Caption := '200';
    end;
end;

procedure TForm3.InverterClick(Sender: TObject);
var i: integer ;
begin
    if RadioButton1.checked = true then
    begin
    PortWriteByte(Port1_A,145);
    ScrollBar1.Position := 110 ;
    Timer1.Enabled := True ;
    Label4.Caption := '145';
    end
    else
    begin
    PortWriteByte(Port1_B,95);
    ScrollBar2.Position := 160 ;
    Timer1.Enabled := True ;
    Label5.Caption := '95';
    end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
procedure TForm3.Timer1Timer(Sender: TObject);
begin
   if RadioButton1.Checked = true then
   begin
   PortWriteByte(Port1_A,90);
   ScrollBar1.Position := 165 ;
   Timer1.Enabled := false ;
   Label4.Caption := '90';
   end
   else
   begin
   PortWriteByte(Port1_B,72);
   ScrollBar2.Position := 183 ;
   Timer1.Enabled := false ;
   Label5.Caption := '72';
   end;
end;

procedure TForm3.Button1Click(Sender: TObject);
begin
   Timer1.Enabled := False ;
   PortWriteByte(Port1_B,0);
   PortWriteByte(Port1_A,0);
   ScrollBar1.Position := 255 ;
   ScrollBar2.Position :=  255;
   Label4.Caption := '0';
   Label5.Caption := '0';
   onstate := false ;
end;
end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit port;

interface

    function  PortReadByte(Addr:Word):Byte;
    function  PortReadWord(Addr:Word):Word;
    procedure PortWriteByte(Addr:Word ; Value:Byte);
    procedure PortWriteWord(Addr:Word ; Value:Word);

implementation
  function PortReadByte(Addr:Word):Byte ; assembler; register;
  asm
    mov DX,AX
    in  AL,DX
  end;

  function PortReadWord(Addr:Word):Word ; assembler; register;
  asm
    mov DX,AX
    in  AX,DX
  end;

  procedure PortWriteByte (Addr:Word; Value: Byte); assembler; register;
  asm
    xchg  AX,DX
    out   DX,AL
  end;

  procedure PortWriteWord (Addr:Word; Value: Word); assembler; register;
  asm
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    xchg   AX,DX
    out    DX,AX
  end;

end.
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit varible;
interface
const
 Sampling_Rate = 150 ;
 Port1_A = $300 ;
 Port1_B = $301 ;
 Port1_C = $302 ;
 Port1_control = $303;
 {----------------------}
 Port2_A = $310 ;
 Port2_B = $311 ;
 Port2_C = $312 ;
 Port2_control = $313;
 {----------------------}
 Port3_A = $320 ;
 Port3_B = $321 ;
 Port3_C = $322 ;
 Port3_control = $323;
 {----------------------}
 Default_Map   = 'c:\temp\image.bmp';
 A_To_B_Map = 'c:\temp\atob.bmp';
 B_To_A_Map = 'c:\temp\btoa.bmp';
var
  index : Byte ;
  onstate : Boolean;
  keep_1, keep_2, keep_3, keep_4, keep_5, keep_6 : array[1..Sampling_Rate] of Byte ;
  rms_array_1,rms_array_2,rms_array_3,rms_array_4,
  rms_array_5,rms_array_6 : array[1..30] of real ;
implementation
end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit      rms ;

interface
uses
  SysUtils, varible ;
        function Sine_rms(peak : real) : real ;
        function Check_peak(value : array of Byte) : real ;
implementation
{-------------------------------------------------------------------------}
        function Sine_rms(peak : real) : real ;
        begin
                Sine_rms := 0.707*peak ;
        end;
{-------------------------------------------------------------------------}
        function Check_peak(value : array of Byte) : real ;
        var  peak,i  : byte ;
        begin
                peak := 0 ;
                for i := 1 to Sampling_Rate do
                if value[i] > peak then peak := value[i] ;
                Check_peak := (peak*5)/255 ;
        end;
{-------------------------------------------------------------------------}
end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit graph1;

interface

uses
 Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
 StdCtrls, varible;

type
 TForm2 = class(TForm)
  Button1: TButton;
  Label1: TLabel;
  Label2: TLabel;
  Label3: TLabel;
  procedure FormPaint(Sender: TObject);
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
 private
  { Private declarations }
 public
  { Public declarations }
 end;

var
 Form2: TForm2;

implementation

{$R *.DFM}
const
   Max_X = 350 ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Max_Y = 180 ;
    Min_X = 50 ;
    Min_Y = 30 ;

procedure TForm2.FormPaint(Sender: TObject);
var     i : integer ;
begin
    Canvas.Pen.Color := clWhite;
    Canvas.Moveto(Min_X,Min_Y);
    Canvas.Lineto(Min_X,Max_Y);
    Canvas.LineTo(Max_X,Max_Y);
    Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 50);
    Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 50);
    Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 100);
    Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 100);
    Canvas.MoveTo(Min_X + 1,Max_Y - trunc(rms_array_1[1]/2));
    Canvas.Pen.Color := clRed;
    for i := 1 to 30 do Canvas.LineTo(Min_X+1+9*i, Max_Y - trunc(rms_array_1[i]/2))
end;

procedure TForm2.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    Close ;
end;

end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit graph2;

interface

uses
 Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
 StdCtrls, varible;
type
 TForm4 = class(TForm)
  Button1: TButton;
  Label1: TLabel;
  Label2: TLabel;
  Label3: TLabel;
  Label4: TLabel;
  procedure FormPaint(Sender: TObject);
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
 private
  { Private declarations }
 public
  { Public declarations }
 end;

var
 Form4: TForm4;

implementation

{$R *.DFM}
const
   Max_X = 350 ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Max_Y = 180 ;
    Min_X = 50 ;
    Min_Y = 30 ;

procedure TForm4.FormPaint(Sender: TObject);
var     i : integer;
begin
    Canvas.Pen.Color := clWhite;
    Canvas.Moveto(Min_X,Min_Y);
    Canvas.Lineto(Min_X,Max_Y);
    Canvas.LineTo(Max_X,Max_Y);
    Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 50);
    Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 50);
    Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 100);
    Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 100);
    Canvas.MoveTo(Min_X + 1,Max_Y - trunc(rms_array_2[1]*10));
    Canvas.Pen.Color := clRed;
    for i := 1 to 30 do Canvas.LineTo(Min_X+1+9*i, Max_Y - trunc(rms_array_2[i]*10))
end;

procedure TForm4.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    Close;
end;

end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit graph3;

interface

uses
 Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
 StdCtrls, varible;
type
 TForm5 = class(TForm)
  Button1: TButton;
  Label1: TLabel;
  Label2: TLabel;
  Label3: TLabel;
  procedure FormPaint(Sender: TObject);
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
 private
  { Private declarations }
 public
  { Public declarations }
 end;

var
 Form5: TForm5;

implementation

{$R *.DFM}
 const
   Max_X = 350 ;
   Max_Y = 180 ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  Min_X = 50 ;
  Min_Y = 30 ;

procedure TForm5.FormPaint(Sender: TObject);
var     i : integer ;
begin
  Canvas.Pen.Color := clWhite;
  Canvas.Moveto(Min_X,Min_Y);
  Canvas.Lineto(Min_X,Max_Y);
  Canvas.LineTo(Max_X,Max_Y);
  Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 50);
  Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 50);
  Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 100);
  Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 100);
  Canvas.MoveTo(Min_X + 1,Max_Y - trunc(rms_array_3[1]*10));
  Canvas.Pen.Color := clRed;
  for i := 1 to 30 do Canvas.LineTo(Min_X+1+9*i, Max_Y - trunc(rms_array_3[i]*10))
end;

procedure TForm5.Button1Click(Sender: TObject);
begin
  close;
end;

end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit graph4;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, varible;

type
  TForm6 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    procedure FormPaint(Sender: TObject);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form6: TForm6;

implementation

{$R *.DFM}
const
     Max_X = 350 ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Max_Y = 180 ;
    Min_X = 50 ;
    Min_Y = 30 ;
procedure TForm6.FormPaint(Sender: TObject);
var     i : integer ;
begin
    Canvas.Pen.Color := clWhite;
    Canvas.Moveto(Min_X,Min_Y);
    Canvas.Lineto(Min_X,Max_Y);
    Canvas.LineTo(Max_X,Max_Y);
    Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 50);
    Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 50);
    Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 100);
    Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 100);
    Canvas.MoveTo(Min_X + 1,Max_Y - trunc(rms_array_4[1]/2));
    Canvas.Pen.Color := clRed;
    for i := 1 to 30 do Canvas.LineTo(Min_X+1+9*i, Max_Y - trunc(rms_array_4[i]/2))
end;

procedure TForm6.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    close;
end;

end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit graph5;

interface

uses
 Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
 StdCtrls, varible;

type
 TForm7 = class(TForm)
  Label1: TLabel;
  Label2: TLabel;
  Button1: TButton;
  Label3: TLabel;
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
  procedure FormPaint(Sender: TObject);
 private
  { Private declarations }
 public
  { Public declarations }
 end;

var
 Form7: TForm7;

implementation

{$R *.DFM}
const
   Max_X = 350 ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Max_Y = 180 ;
    Min_X = 50 ;
    Min_Y = 30 ;

procedure TForm7.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    close;
end;

procedure TForm7.FormPaint(Sender: TObject);
var     i : integer ;
begin
    Canvas.Pen.Color := clWhite;
    Canvas.Moveto(Min_X,Min_Y);
    Canvas.Lineto(Min_X,Max_Y);
    Canvas.LineTo(Max_X,Max_Y);
    Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 50);
    Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 50);
    Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 100);
    Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 100);
    Canvas.MoveTo(Min_X + 1,Max_Y - trunc(rms_array_5[1]*10));
    Canvas.Pen.Color := clRed;
    for i := 1 to 30 do Canvas.LineTo(Min_X+1+9*i, Max_Y - trunc(rms_array_5[i]*10))
end;

end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit graph6;

interface

uses
 Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
 StdCtrls, varible;

type
 TForm8 = class(TForm)
  Button1: TButton;
  Label1: TLabel;
  Label2: TLabel;
  Label3: TLabel;
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
  procedure FormPaint(Sender: TObject);
 private
  { Private declarations }
 public
  { Public declarations }
 end;

var
 Form8: TForm8;

implementation

{$R *.DFM}
const
   Max_X = 350 ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Max_Y = 180 ;
    Min_X = 50 ;
    Min_Y = 30 ;
procedure TForm8.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    close;
end;

procedure TForm8.FormPaint(Sender: TObject);
var     i : integer ;
begin
    Canvas.Pen.Color := clWhite;
    Canvas.Moveto(Min_X,Min_Y);
    Canvas.Lineto(Min_X,Max_Y);
    Canvas.LineTo(Max_X,Max_Y);
    Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 50);
    Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 50);
    Canvas.MoveTo(Min_X - 3,Max_Y - 100);
    Canvas.LineTo(Min_X + 3,Max_Y - 100);
    Canvas.MoveTo(Min_X + 1,Max_Y - trunc(rms_array_6[1]*10));
    Canvas.Pen.Color := clRed;
    for i := 1 to 30 do Canvas.LineTo(Min_X+1+9*i, Max_Y - trunc(rms_array_6[i]*10))
end;

end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIEMENS

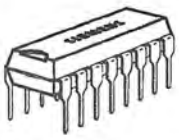
Phase Control IC

TCA 785

Bipolar IC

Features

- Reliable recognition of zero passage
- Large application scope
- May be used as zero point switch
- LSL compatible
- Three-phase operation possible (3 ICs)
- Output current 250 mA
- Large ramp current range
- Wide temperature range

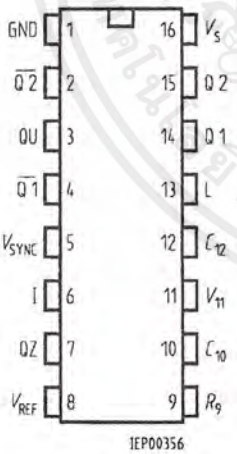


P-DIP-16-1

Type	Ordering Code	Package
TCA 785	Q67000-A2321	P-DIP-16-1

This phase control IC is intended to control thyristors, triacs, and transistors. The trigger pulses can be shifted within a phase angle between 0 ° and 180 °. Typical applications include converter circuits, AC controllers and three-phase current controllers.

This IC replaces the previous types TCA 780 and TCA 780 D.



Pin Configuration
(top view)

Pin Definitions and Functions

Pin	Symbol	Function
1	GND	Ground
2	$\overline{Q2}$	Output 2 inverted
3	Q U	Output U
4	$\overline{Q2}$	Output 1 inverted
5	V_{SYNC}	Synchronous voltage
6	I	Inhibit
7	Q Z	Output Z
8	V_{REF}	Stabilized voltage
9	R_9	Ramp resistance
10	C_{10}	Ramp capacitance
11	V_{11}	Control voltage
12	C_{12}	Pulse extension
13	L	Long pulse
14	Q 1	Output 1
15	Q 2	Output 2
16	V_S	Supply voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Functional Description

The synchronization signal is obtained via a high-ohmic resistance from the line voltage (voltage V_5). A zero voltage detector evaluates the zero passages and transfers them to the synchronization register.

This synchronization register controls a ramp generator, the capacitor C_{10} of which is charged by a constant current (determined by R_9). If the ramp voltage V_{10} exceeds the control voltage V_{11} (triggering angle φ), a signal is processed to the logic. Dependent on the magnitude of the control voltage V_{11}, the triggering angle φ can be shifted within a phase angle of 0° to 180°.

For every half wave, a positive pulse of approx. 30 µs duration appears at the outputs Q 1 and Q 2. The pulse duration can be prolonged up to 180° via a capacitor C_{12}. If pin 12 is connected to ground, pulses with a duration between φ and 180° will result.

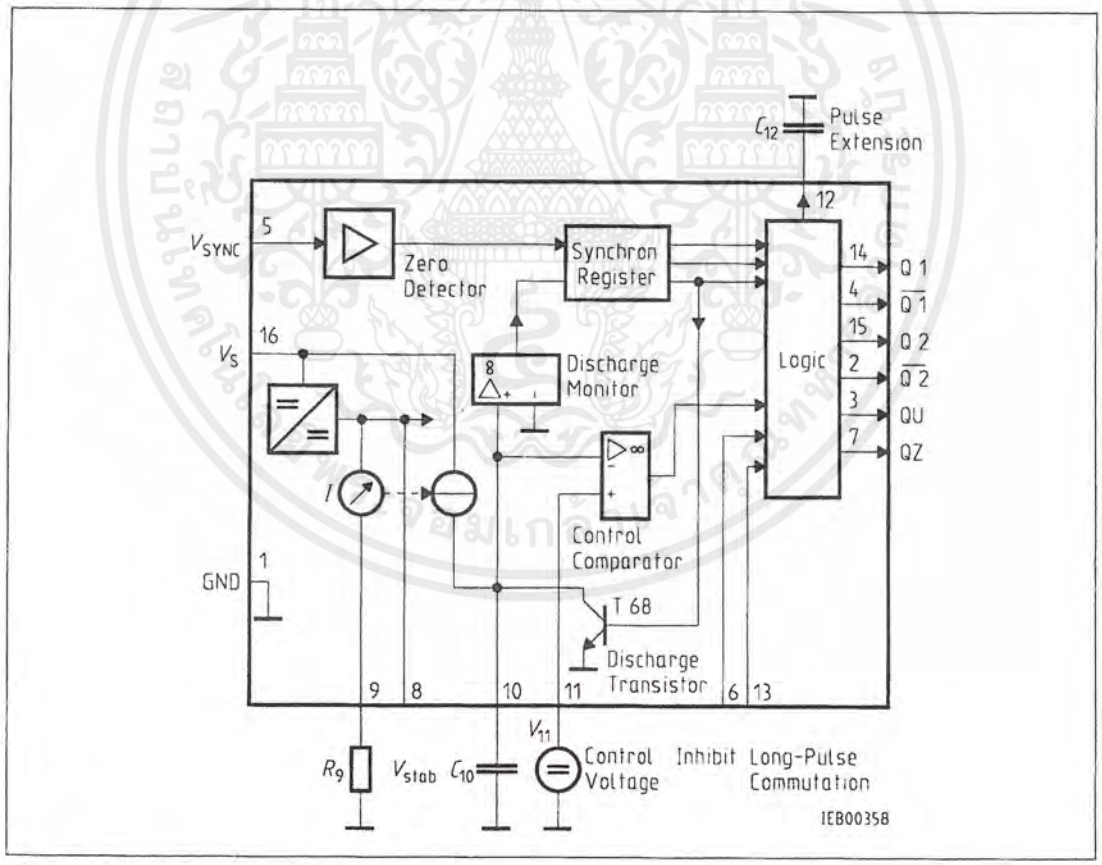
Outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ supply the inverse signals of Q 1 and Q 2.

A signal of φ +180° which can be used for controlling an external logic,is available at pin 3.

A signal which corresponds to the NOR link of Q 1 and Q 2 is available at output Q Z (pin 7).

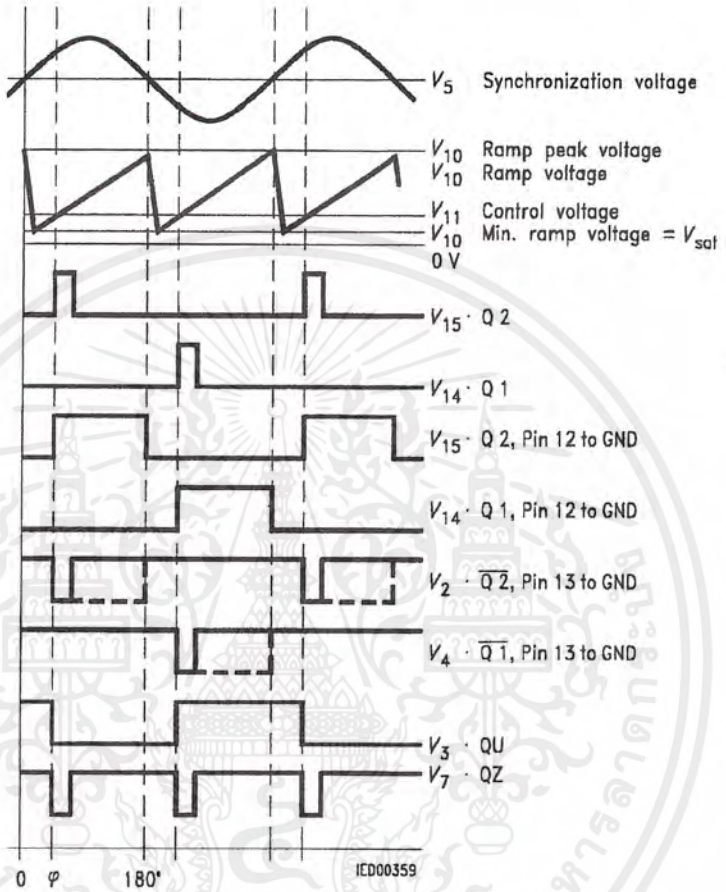
The inhibit input can be used to disable outputs Q1, Q2 and $\overline{Q1}$, $\overline{Q2}$.

Pin 13 can be used to extend the outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ to full pulse length (180° – φ).



Block Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Pulse Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

November 1995

National Semiconductor

ADC0808/ADC0809
8-Bit µP Compatible A/D Converters with 8-Channel Multiplexer

General Description

The ADC0808, ADC0809 data acquisition component is a monolithic CMOS device with an 8-bit analog-to-digital converter, 8-channel multiplexer and microprocessor compatible control logic. The 8-bit A/D converter uses successive approximation as the conversion technique. The converter features a high impedance chopper stabilized comparator, a 256R voltage divider with analog switch tree and a successive approximation register. The 8-channel multiplexer can directly access any of 8-single-ended analog signals.

The device eliminates the need for external zero and full-scale adjustments. Easy interfacing to microprocessors is provided by the latched and decoded multiplexer address inputs and latched TTL TRI-STATE® outputs.

The design of the ADC0808, ADC0809 has been optimized by incorporating the most desirable aspects of several A/D conversion techniques. The ADC0808, ADC0809 offers high speed, high accuracy, minimal temperature dependence, excellent long-term accuracy and repeatability, and consumes minimal power. These features make this device ideally suited to applications from process and machine control to consumer and automotive applications. For 16-channel multiplexer with common output (sample/hold port) see ADC0816 data sheet. (See AN-247 for more information.)

Features

- Easy interface to all microprocessors
- Operates ratiometrically or with 5 V_{DC} or analog span adjusted voltage reference
- No zero or full-scale adjust required
- 8-channel multiplexer with address logic
- 0V to 5V input range with single 5V power supply
- Outputs meet TTL voltage level specifications
- Standard hermetic or molded 28-pin DIP package
- 28-pin molded chip carrier package
- ADC0808 equivalent to MM74C949
- ADC0809 equivalent to MM74C949-1

Key Specifications

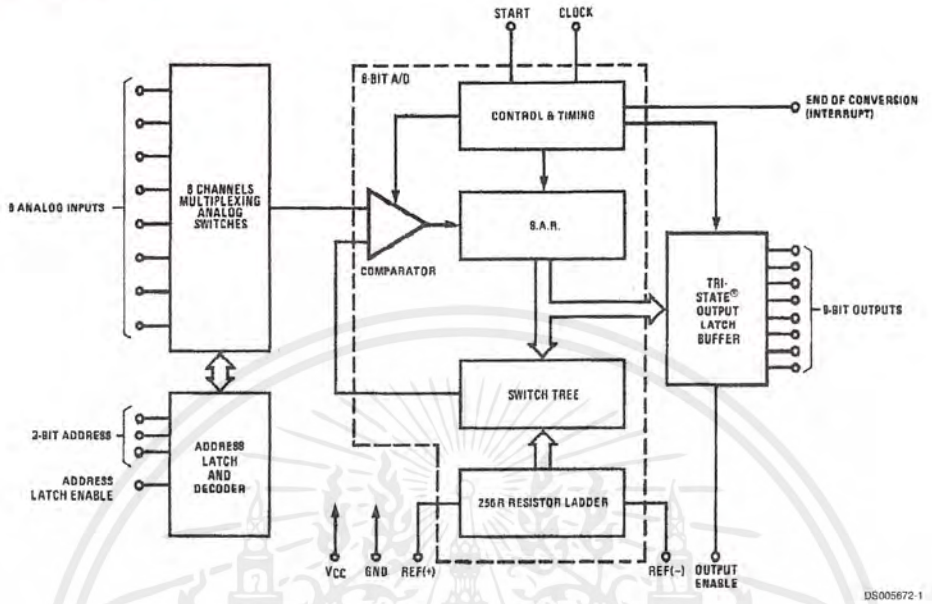
- Resolution: 8 Bits
- Total Unadjusted Error: ±½ LSB and ±1 LSB
- Single Supply: 5 V_{DC}
- Low Power: 15 mW
- Conversion Time: 100 µs

TRI-STATE® is a registered trademark of National Semiconductor Corp.

© 1997 National Semiconductor Corporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Block Diagram



See Ordering Information

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics (Continued)

Digital Levels and DC Specifications: ADC0808CJ $4.5V \le V_{CC} \le 5.5V$, $-55^{\circ}C \le T_A \le +125^{\circ}C$ unless otherwise noted ADC0808CCJ, ADC0808CCN, ADC0808CCV, ADC0809CCN and ADC0809CCV, $4.75V \le V_{CC} \le 5.25V$, $-40^{\circ}C \le T_A \le +85^{\circ}C$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
DATA OUTPUTS AND EOC (INTERRUPT)						
$V_{OUT(1)}$	Logical "1" Output Voltage	$I_O=-360\ \mu A$	$V_{CC}-0.4$			V
$V_{OUT(0)}$	Logical "0" Output Voltage	$I_O=1.6$ mA			0.45	V
$V_{OUT(0)}$	Logical "0" Output Voltage EOC	$I_O=1.2$ mA			0.45	V
I_{OUT}	TRI-STATE Output Current	$V_O=5V$			3	µA
		$V_O=0$	−3			µA

Electrical Characteristics

Timing Specifications $V_{CC}=V_{REF(+)}=5V$, $V_{REF(-)}=GND$, $t_r=t_f=20$ ns and $T_A=25^{\circ}C$ unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
t_{WS}	Minimum Start Pulse Width	(*Figure 5*)		100	200	ns
t_{WALE}	Minimum ALE Pulse Width	(*Figure 5*)		100	200	ns
t_s	Minimum Address Set-Up Time	(*Figure 5*)		25	50	ns
t_H	Minimum Address Hold Time	(*Figure 5*)		25	50	ns
t_D	Analog MUX Delay Time From ALE	$R_S=0\Omega$ (*Figure 5*)		1	2.5	µS
t_{H1}, t_{H0}	OE Control to Q Logic State	$C_L=50$ pF, $R_L=10$k (*Figure 8*)		125	250	ns
t_{1H}, t_{0H}	OE Control to Hi-Z	$C_L=10$ pF, $R_L=10$k (*Figure 8*)		125	250	ns
t_c	Conversion Time	$f_c=640$ kHz, (*Figure 5*) (Note 7)	90	100	116	µS
f_c	Clock Frequency		10	640	1280	kHz
t_{EOC}	EOC Delay Time	(*Figure 5*)	0		8+2 µS	Clock Periods
C_{IN}	Input Capacitance	At Control Inputs		10	15	pF
C_{OUT}	TRI-STATE Output Capacitance	At TRI-STATE Outputs		10	15	pF

Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its specified operating conditions.

Note 2: All voltages are measured with respect to GND, unless otherwise specified.

Note 3: A zener diode exists, internally, from V_{CC} to GND and has a typical breakdown voltage of 7 V_{DC}.

Note 4: Two on-chip diodes are tied to each analog input which will forward conduct for analog input voltages one diode drop below ground or one diode drop greater than the V_{CC}n supply. The spec allows 100 mV forward bias of either diode. This means that as long as the analog V_{IN} does not exceed the supply voltage by more than 100 mV, the output code will be correct. To achieve an absolute $0V_{DC}$ to $5V_{DC}$ input voltage range will therefore require a minimum supply voltage of 4.900 V_{DC} over temperature variations, initial tolerance and loading.

Note 5: Total unadjusted error includes offset, full-scale, linearity, and multiplexer errors. See *Figure 2*. None of these A/Ds requires a zero or full-scale adjust. However, if an all zero code is desired for an analog input other than 0.0V, or if a narrow full-scale span exists (for example: 0.5V to 4.5V full-scale) the reference voltages can be adjusted to achieve this. See *Figure 13*.

Note 6: Comparator input current is a bias current into or out of the chopper stabilized comparator. The bias current varies directly with clock frequency and has little temperature dependence (*Figure *NO TGT: fig NS0592**). See paragraph 4.0.

Note 7: The outputs of the data register are updated one clock cycle before the rising edge of EOC.

Note 8: Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 kΩ resistor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Notes 1, 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/ Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage (V_{CC}) (Note 3)	6.5V
Voltage at Any Pin Except Control Inputs	−0.3V to (V_{CC}+0.3V)
Voltage at Control Inputs (START, OE, CLOCK, ALE, ADD A, ADD B, ADD C)	−0.3V to +15V
Storage Temperature Range	−65°C to +150°C
Package Dissipation at T_A=25°C	875 mW
Lead Temp. (Soldering, 10 seconds)	
Dual-In-Line Package (plastic)	260°C
Dual-In-Line Package (ceramic)	300°C
Molded Chip Carrier Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
ESD Susceptibility (Note 8)	400V

Operating Conditions (Notes 1, 2)

Temperature Range (Note 1)	$T_{MIN} \le T_A \le T_{MAX}$
ADC0808CJ	−55°C≤T_A≤+125°C
ADC0808CCJ, ADC0808CCN, ADC0809CCN	−40°C≤T_A≤+85°C
ADC0808CCV, ADC0809CCV	−40°C ≤ T_A ≤ +85°C
Range of V_{CC} (Note 1)	4.5 V_{DC} to 6.0 V_{DC}

Electrical Characteristics

Converter Specifications: V_{CC}=5 V_{DC}=$V_{REF(+)}$, $V_{REF(-)}$=GND, $T_{MIN} \le T_A \le T_{MAX}$ and f_{CLK}=640 kHz unless otherwise stated.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
	ADC0808					
	Total Unadjusted Error	25°C			±½	LSB
	(Note 5)	T_{MIN} to T_{MAX}			±¾	LSB
	ADC0809					
	Total Unadjusted Error	0°C to 70°C			±1	LSB
	(Note 5)	T_{MIN} to T_{MAX}			±1¼	LSB
	Input Resistance	From Ref(+) to Ref(−)	1.0	2.5		kΩ
	Analog Input Voltage Range	(Note 4) V(+) or V(−)	GND−0.10		V_{CC}+0.10	V_{DC}
$V_{REF(+)}$	Voltage, Top of Ladder	Measured at Ref(+)		V_{CC}	V_{CC}+0.1	V
$\frac{V_{REF(+)}+V_{REF(-)}}{2}$	Voltage, Center of Ladder		V_{CC}/2-0.1	V_{CC}/2	V_{CC}/2+0.1	V
$V_{REF(-)}$	Voltage, Bottom of Ladder	Measured at Ref(−)	−0.1	0		V
I_{IN}	Comparator Input Current	f_c=640 kHz, (Note 6)	−2	±0.5	2	μA

Electrical Characteristics

Digital Levels and DC Specifications: ADC0808CJ 4.5V≤V_{CC}≤5.5V, −55°C≤T_A≤+125°C unless otherwise noted ADC0808CCJ, ADC0808CCN, ADC0808CCV, ADC0809CCN and ADC0809CCV, 4.75≤V_{CC}≤5.25V, −40°C≤T_A≤+85°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
ANALOG MULTIPLEXER						
$I_{OFF(+)}$	OFF Channel Leakage Current	V_{CC}=5V, V_{IN}=5V,				
		T_A=25°C		10	200	nA
		T_{MIN} to T_{MAX}			1.0	μA
$I_{OFF(-)}$	OFF Channel Leakage Current	V_{CC}=5V, V_{IN}=0,				
		T_A=25°C	−200	−10		nA
		T_{MIN} to T_{MAX}	−1.0			μA
CONTROL INPUTS						
$V_{IN(1)}$	Logical "1" Input Voltage		V_{CC}−1.5			V
$V_{IN(0)}$	Logical "0" Input Voltage				1.5	V
$I_{IN(1)}$	Logical "1" Input Current (The Control Inputs)	V_{IN}=15V			1.0	μA
$I_{IN(0)}$	Logical "0" Input Current (The Control Inputs)	V_{IN}=0	−1.0			μA
I_{CC}	Supply Current	f_{CLK}=640 kHz		0.3	3.0	mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Functional Description

Multiplexer. The device contains an 8-channel single-ended analog signal multiplexer. A particular input channel is selected by using the address decoder. *Table 1* shows the input states for the address lines to select any channel. The address is latched into the decoder on the low-to-high transition of the address latch enable signal.

TABLE 1.

SELECTED ANALOG CHANNEL	ADDRESS LINE		
	C	B	A
IN0	L	L	L
IN1	L	L	H
IN2	L	H	L
IN3	L	H	H
IN4	H	L	L
IN5	H	L	H
IN6	H	H	L
IN7	H	H	H

CONVERTER CHARACTERISTICS

The Converter

The heart of this single chip data acquisition system is its 8-bit analog-to-digital converter. The converter is designed to give fast, accurate, and repeatable conversions over a wide range of temperatures. The converter is partitioned into 3 major sections: the 256R ladder network, the successive approximation register, and the comparator. The converter's digital outputs are positive true.

The 256R ladder network approach (*Figure 1*) was chosen over the conventional R/2R ladder because of its inherent monotonicity, which guarantees no missing digital codes. Monotonicity is particularly important in closed loop feedback control systems. A non-monotonic relationship can cause oscillations that will be catastrophic for the system. Additionally, the 256R network does not cause load variations on the reference voltage.

The bottom resistor and the top resistor of the ladder network in *Figure 1* are not the same value as the remainder of the network. The difference in these resistors causes the output characteristic to be symmetrical with the zero and full-scale points of the transfer curve. The first output transition occurs when the analog signal has reached +½ LSB and succeeding output transitions occur every 1 LSB later up to full-scale.

The successive approximation register (SAR) performs 8 iterations to approximate the input voltage. For any SAR type converter, n-iterations are required for an n-bit converter. *Figure 2* shows a typical example of a 3-bit converter. In the ADC0808, ADC0809, the approximation technique is extended to 8 bits using the 256R network.

The A/D converter's successive approximation register (SAR) is reset on the positive edge of the start conversion (SC) pulse. The conversion is begun on the falling edge of the start conversion pulse. A conversion in process will be interrupted by receipt of a new start conversion pulse. Continuous conversion may be accomplished by tying the end-of-conversion (EOC) output to the SC input. If used in this mode, an external start conversion pulse should be applied after power up. End-of-conversion will go low between 0 and 8 clock pulses after the rising edge of start conversion.

The most important section of the A/D converter is the comparator. It is this section which is responsible for the ultimate accuracy of the entire converter. It is also the comparator drift which has the greatest influence on the repeatability of the device. A chopper-stabilized comparator provides the most effective method of satisfying all the converter requirements.

The chopper-stabilized comparator converts the DC input signal into an AC signal. This signal is then fed throught a high gain AC amplifier and has the DC level restored. This technique limits the drift component of the amplifier since the drift is a DC component which is not passed by the AC amplifier. This makes the entire A/D converter extremely insensitive to temperature, long term drift and input offset errors.

Figure 4 shows a typical error curve for the ADC0808 as measured using the procedures outlined in AN-179.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor

December 1995

LF351 Wide Bandwidth JFET Input Operational Amplifier

General Description

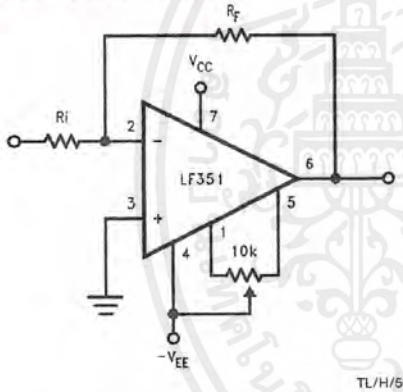
The LF351 is a low cost high speed JFET input operational amplifier with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET II™ technology). The device requires a low supply current and yet maintains a large gain bandwidth product and a fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF351 is pin compatible with the standard LM741 and uses the same offset voltage adjustment circuitry. This feature allows designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM741 designs.

The LF351 may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample-and-hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The device has low noise and offset voltage drift, but for applications where these requirements are critical, the LF356 is recommended. If maximum supply current is important, however, the LF351 is the better choice.

Features

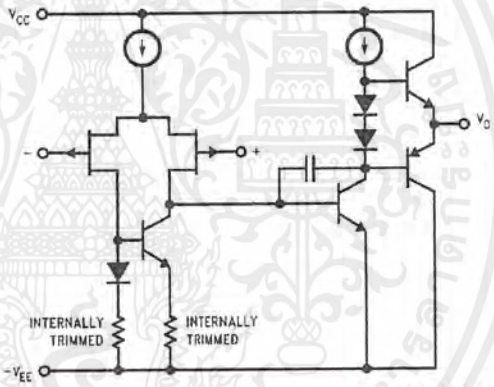
■ Internally trimmed offset voltage	10 mV
■ Low input bias current	50 pA
■ Low input noise voltage	25 nV/$\sqrt{Hz}$
■ Low input noise current	0.01 pA/$\sqrt{Hz}$
■ Wide gain bandwidth	4 MHz
■ High slew rate	13 V/μs
■ Low supply current	1.8 mA
■ High input impedance	$10^{12}\Omega$
■ Low total harmonic distortion $A_V = 10$, $R_L = 10k$, $V_O = 20$ Vp-p, BW = 20 Hz–20 kHz	<0.02%
■ Low 1/f noise corner	50 Hz
■ Fast settling time to 0.01%	2 μs

Typical Connection



TL/H/5648–11

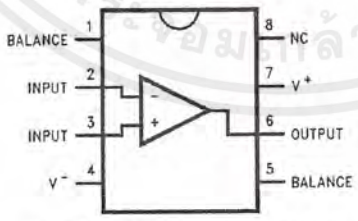
Simplified Schematic



TL/H/5648–12

Connection Diagrams

Dual-In-Line Package



TL/H/5648–13

Order Number LF351M or LF351N
See NS Package Number M08A or N08E

©1995 National Semiconductor Corporation TL/H/5648

RRD-B30M125/Printed in U. S. A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	±18V
Power Dissipation (Notes 1 and 6)	670 mW
Operating Temperature Range	0°C to +70°C
$T_{j(MAX)}$	115°C
Differential Input Voltage	±30V
Input Voltage Range (Note 2)	±15V
Output Short Circuit Duration	Continuous
Storage Temperature Range	−65°C to +150°C
Lead Temp. (Soldering, 10 sec.)	
Metal Can	300°C
DIP	260°C

θ_{jA}	
N Package	120°C/W
M Package	TBD
Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 sec.)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 sec.)	215°C
Infrared (15 sec.)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

ESD rating to be determined.

DC Electrical Characteristics (Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF351			Units
			Min	Typ	Max	
V_{OS}	Input Offset Voltage	R_S = 10 kΩ, T_A = 25°C Over Temperature		5	10 13	mV mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Average TC of Input Offset Voltage	R_S = 10 kΩ		10		µV/°C
I_{OS}	Input Offset Current	T_j = 25°C, (Notes 3, 4) $T_j \leq$ 70°C		25	100 4	pA nA
I_B	Input Bias Current	T_j = 25°C, (Notes 3, 4) $T_j \leq$ ±70°C		50	200 8	pA nA
R_{IN}	Input Resistance	T_j = 25°C		10^{12}		Ω
A_{VOL}	Large Signal Voltage Gain	V_S = ±15V, T_A = 25°C V_O = ±10V, R_L = 2 kΩ Over Temperature	25 15	100		V/mV V/mV
V_O	Output Voltage Swing	V_S = ±15V, R_L = 10 kΩ	±12	±13.5		V
V_{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	V_S = ±15V	±11	+15 −12		V V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	$R_S \leq$ 10 kΩ	70	100		dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 5)	70	100		dB
I_S	Supply Current			1.8	3.4	mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC Electrical Characteristics (Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF351			Units
			Min	Typ	Max	
SR	Slew Rate	$V_S = \pm 15V$, $T_A = 25°C$		13		V/μs
GBW	Gain Bandwidth Product	$V_S = \pm 15V$, $T_A = 25°C$		4		MHz
e_n	Equivalent Input Noise Voltage	$T_A = 25°C$, $R_S = 100\Omega$, $f = 1000$ Hz		25		$nV/\sqrt{Hz}$
i_n	Equivalent Input Noise Current	$T_j = 25°C$, $f = 1000$ Hz		0.01		$pA/\sqrt{Hz}$

Note 1: For operating at elevated temperature, the device must be derated based on the thermal resistance, θ_{JA}.

Note 2: Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

Note 3: These specifications apply for $V_S = \pm 15V$ and $0°C \leq T_A \leq +70°C$. V_{OS}, I_B and I_{OS} are measured at $V_{CM} = 0$.

Note 4: The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature, T_j. Due to the limited production test time, the input bias currents measured are correlated to junction temperature. In normal operation the junction temperature rises above the ambient temperature as a result of internal power dissipation, P_D. $T_j = T_A + \theta_{jA} P_D$ where θ_{jA} is the thermal resistance from junction to ambient. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.

Note 5: Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously in accordance with common practice. From $\pm 15V$ to $\pm 5V$.

Note 6: Max. Power Dissipation is defined by the package characteristics. Operating the part near the Max. Power Dissipation may cause the part to operate outside guaranteed limits.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

May 1997

National Semiconductor

LM555/LM555C Timer

General Description

The LM555 is a highly stable device for generating accurate time delays or oscillation. Additional terminals are provided for triggering or resetting if desired. In the time delay mode of operation, the time is precisely controlled by one external resistor and capacitor. For astable operation as an oscillator, the free running frequency and duty cycle are accurately controlled with two external resistors and one capacitor. The circuit may be triggered and reset on falling waveforms, and the output circuit can source or sink up to 200 mA or drive TTL circuits.

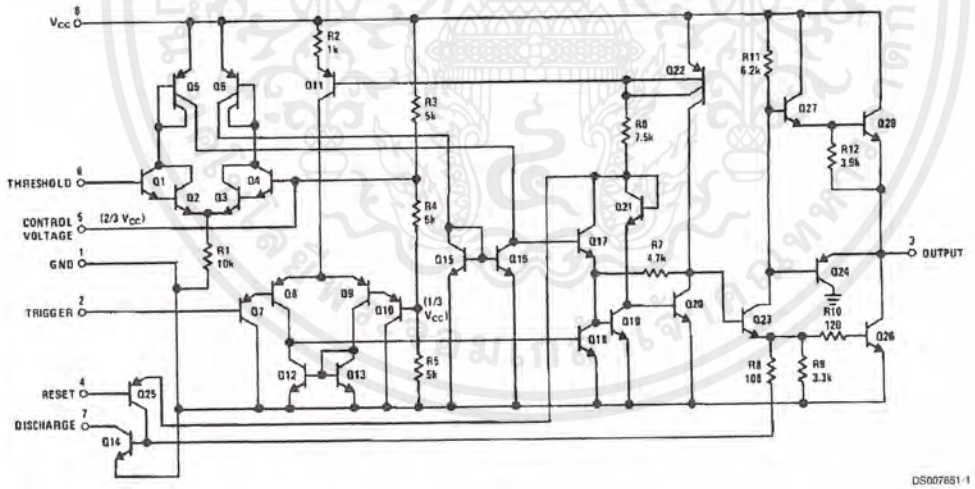
Features

- Direct replacement for SE555/NE555
- Timing from microseconds through hours
- Operates in both astable and monostable modes
- Adjustable duty cycle
- Output can source or sink 200 mA
- Output and supply TTL compatible
- Temperature stability better than 0.005% per °C
- Normally on and normally off output
- Available in 8 pin MSOP package

Applications

- Precision timing
- Pulse generation
- Sequential timing
- Time delay generation
- Pulse width modulation
- Pulse position modulation
- Linear ramp generator

Schematic Diagram



© 1997 National Semiconductor Corporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Note 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/ Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	+18V
Power Dissipation (Note 3)	
LM555H, LM555CH	760 mW
LM555, LM555CN	1180 mW
LM555CMM	613 mW
Operating Temperature Ranges	
LM555C	0°C to +70°C
LM555	−55°C to + 125°C
Storage Temperature Range	−65°C to +150°C
Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 Seconds)	260°C
Small Outline Packages	
(SOIC and MSOP)	
Vapor Phase (60 Seconds)	215°C
Infrared (15 Seconds)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

Electrical Characteristics (Notes 1, 2)

(T_A = 25°C, V_{CC} = +5V to +15V, unless othewise specified)

Parameter	Conditions	Limits						Units
		LM555			LM555C			
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Supply Voltage		4.5		18	4.5		16	V
Supply Current	V_{CC} = 5V, R_L = ∞		3	5		3	6	mA
	V_{CC} = 15V, R_L = ∞ (Low State) (Note 4)		10	12		10	15	mA
Timing Error, Monostable								
Initial Accuracy			0.5			1		%
Drift with Temperature	R_A = 1k to 100 kΩ, C = 0.1 µF, (Note 5)		30			50		ppm/°C
Accuracy over Temperature			1.5			1.5		%
Drift with Supply			0.05			0.1		%/V
Timing Error, Astable								
Initial Accuracy			1.5			2.25		%
Drift with Temperature	R_A, R_B = 1k to 100 kΩ, C = 0.1 µF, (Note 5)		90			150		ppm/°C
Accuracy over Temperature			2.5			3.0		%
Drift with Supply			0.15			0.30		%/V
Threshold Voltage			0.667			0.667		x V_{CC}
Trigger Voltage	V_{CC} = 15V	4.8	5	5.2		5		V
	V_{CC} = 5V	1.45	1.67	1.9		1.67		V
Trigger Current			0.01	0.5		0.5	0.9	µA
Reset Voltage		0.4	0.5	1	0.4	0.5	1	V
Reset Current			0.1	0.4		0.1	0.4	mA
Threshold Current	(Note 6)		0.1	0.25		0.1	0.25	µA
Control Voltage Level	V_{CC} = 15V	9.6	10	10.4	9	10	11	V
	V_{CC} = 5V	2.9	3.33	3.8	2.6	3.33	4	V
Pin 7 Leakage Output High			1	100		1	100	nA
Pin 7 Sat (Note 7)								
Output Low	V_{CC} = 15V, I_7 = 15 mA		150			180		mV
Output Low	V_{CC} = 4.5V, I_7 = 4.5 mA		70	100		80	200	mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics (Notes 1, 2) (Continued)

(T_A = 25°C, V_{CC} = +5V to +15V, unless otherwise specified)

Parameter	Conditions	Limits						Units
		LM555			LM555C			
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage Drop (Low)	V_{CC} = 15V							
	I_{SINK} = 10 mA		0.1	0.15		0.1	0.25	V
	I_{SINK} = 50 mA		0.4	0.5		0.4	0.75	V
	I_{SINK} = 100 mA		2	2.2		2	2.5	V
	I_{SINK} = 200 mA		2.5			2.5		V
	V_{CC} = 5V							
	I_{SINK} = 8 mA		0.1	0.25				V
	I_{SINK} = 5 mA					0.25	0.35	V
Output Voltage Drop (High)	I_{SOURCE} = 200 mA, V_{CC} = 15V		12.5			12.5		V
	I_{SOURCE} = 100 mA, V_{CC} = 15V	13	13.3		12.75	13.3		V
	V_{CC} = 5V	3	3.3		2.75	3.3		V
Rise Time of Output			100			100		ns
Fall Time of Output			100			100		ns

Note 1: All voltages are measured with respect to the ground pin, unless otherwise specified.

Note 2: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits. Electrical Characteristics state DC and AC electrical specifications under particular test conditions which guarantee specific performance limits. This assumes that the device is within the Operating Ratings. Specifications are not guaranteed for parameters where no limit is given, however, the typical value is a good indication of device performance.

Note 3: For operating at elevated temperatures the device must be derated above 25°C based on a +150°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 164°C/W (T0-5), 106°C/W (DIP), 170°C/W (S0-8), and 204°C/W (MSOP) junction to ambient.

Note 4: Supply current when output high typically 1 mA less at V_{CC} = 5V.

Note 5: Tested at V_{CC} = 5V and V_{CC} = 15V.

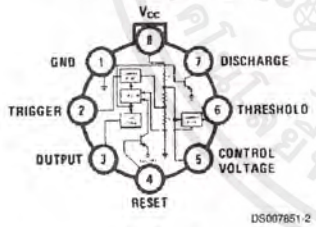
Note 6: This will determine the maximum value of $R_A + R_B$ for 15V operation. The maximum total ($R_A + R_B$) is 20 MΩ.

Note 7: No protection against excessive pin 7 current is necessary providing the package dissipation rating will not be exceeded.

Note 8: Refer to RETS555X drawing of military LM555H and LM555J versions for specifications.

Connection Diagrams

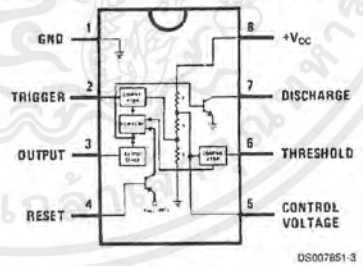
Metal Can Package



DS007851-2

Top View
Order Number LM555H or LM555CH
See NS Package Number H08C

Dual-In-Line, Small Outline and Molded Mini Small Outline Packages



DS007851-3

Top View
Order Number LM555J, LM555CJ, LM555CM, LM555CMM or LM555CN
See NS Package Number J08A, M08A, MUA08A or N08E

www.national.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor

February 1995

LM1558/LM1458 Dual Operational Amplifier

General Description

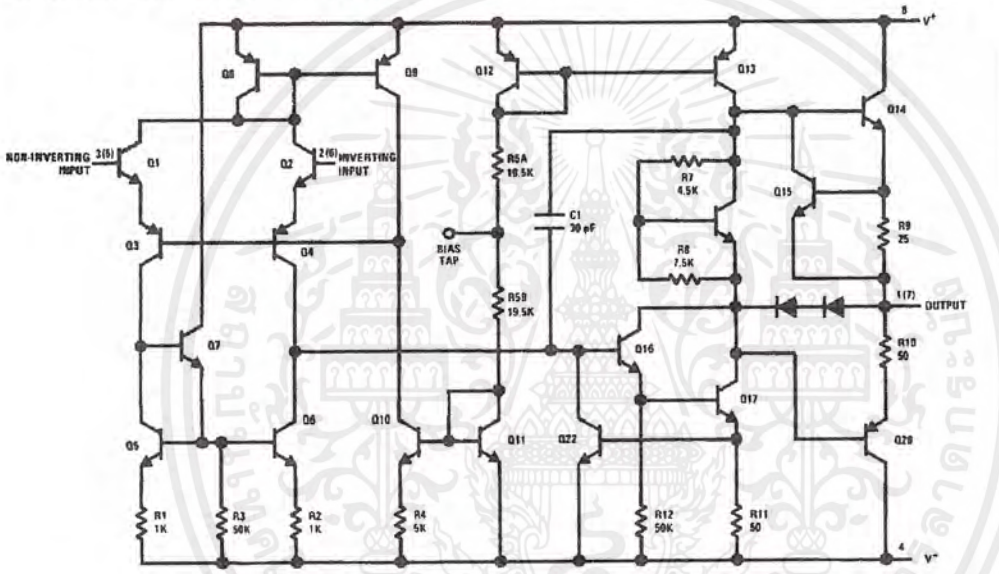
The LM1558 and the LM1458 are general purpose dual operational amplifiers. The two amplifiers share a common bias network and power supply leads. Otherwise, their operation is completely independent.

The LM1458 is identical to the LM1558 except that the LM1458 has its specifications guaranteed over the temperature range from 0°C to +70°C instead of −55°C to +125°C.

Features

- No frequency compensation required
- Short-circuit protection
- Wide common-mode and differential voltage ranges
- Low-power consumption
- 8-lead can and 8-lead mini DIP
- No latch up when input common mode range is exceeded

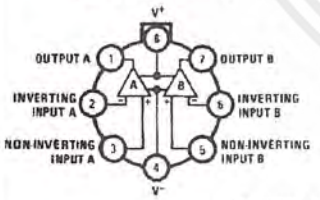
Schematic and Connection Diagrams



TL/H/7886–1

Note: Numbers in parentheses are pin numbers for amplifier B.

Metal Can Package

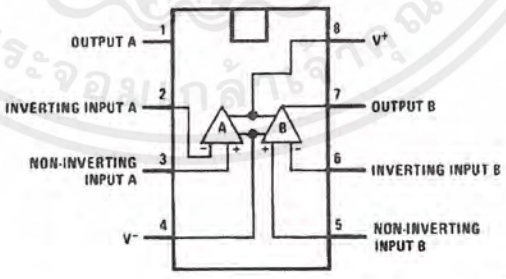


TL/H/7886–2

Top View

Order Number LM1558H, LM1558H/883 or LM1458H
See NS Package Number H08C

Dual-In-Line Package



TL/H/7886–3

Top View

Order Number LM1558J, LM1558J/883, LM1458J, LM1458M or LM1458N
See NS Package Number J08A, M08A or N08E

©1995 National Semiconductor Corporation TL/H/7886

RRD-B30M115/Printed in U. S. A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications. (Note 4)

Supply Voltage	
LM1558	±22V
LM1458	±18V
Power Dissipation (Note 1)	
LM1558H/LM1458H	500 mW
LM1458N	400 mW
Differential Input Voltage	±30V
Input Voltage (Note 2)	±15V
Output Short-Circuit Duration	Continuous
Operating Temperature Range	
LM1558	−55°C to +125°C
LM1458	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	−65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	260°C
Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 seconds)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

ESD tolerance (Note 5) 300V

Electrical Characteristics (Note 3)

Parameter	Conditions	LM1558			LM1458			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25°C$, $R_S \leq 10\,k\Omega$		1.0	5.0		1.0	6.0	mV
Input Offset Current	$T_A = 25°C$		80	200		80	200	nA
Input Bias Current	$T_A = 25°C$		200	500		200	500	nA
Input Resistance	$T_A = 25°C$	0.3	1.0		0.3	1.0		MΩ
Supply Current Both Amplifiers	$T_A = 25°C$, $V_S = \pm 15V$		3.0	5.0		3.0	5.6	mA
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25°C$, $V_S = \pm 15V$ $V_{OUT} = \pm 10V$, $R_L \geq 2\,k\Omega$	50	160		20	160		V/mV
Input Offset Voltage	$R_S \leq 10\,k\Omega$			6.0			7.5	mV
Input Offset Current				500			300	nA
Input Bias Current				1.5			0.8	μA
Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 15V$, $V_{OUT} = \pm 10V$ $R_L \geq k\Omega$	25			15			V/mV
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 15V$, $R_L = 10\,k\Omega$	±12	±14		±12	±14		V
	$R_L = 2\,k\Omega$	±10	±13		±10	±13		V
Input Voltage Range	$V_S = \pm 15V$	±12			±12			V
Common Mode Rejection Ratio	$R_S \leq 10\,k\Omega$	70	90		70	90		dB
Supply Voltage Rejection Ratio	$R_S \leq 10\,k\Omega$	77	96		77	96		dB

Note 1: The maximum junction temperature of the LM1558 is 150°C, while that of the LM1458 is 100°C. For operating at elevated temperatures, devices in the H08 package must be derated based on a thermal resistance of 150°C/W, junction to ambient or 20°C/W, junction to case. For the DIP the device must be derated based on a thermal resistance of 187°C/W, junction to ambient.

Note 2: For supply voltages less than ±15V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

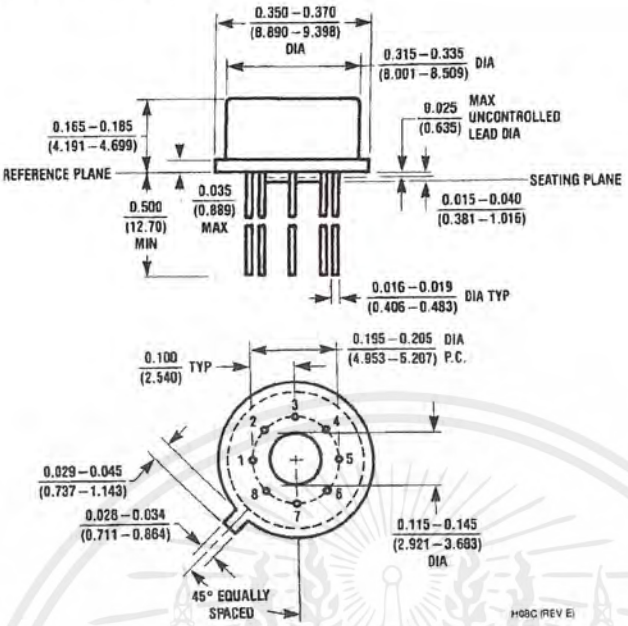
Note 3: These specifications apply for $V_S = \pm 15V$ and $-55°C \leq T_A \leq 125°C$, unless otherwise specified. With the LM1458, however, all specifications are limited to $0°C \leq T_A \leq 70°C$ and $V_S = \pm 15V$.

Note 4: Refer to RETS 1558V for LM1558J and LM1558H military specifications.

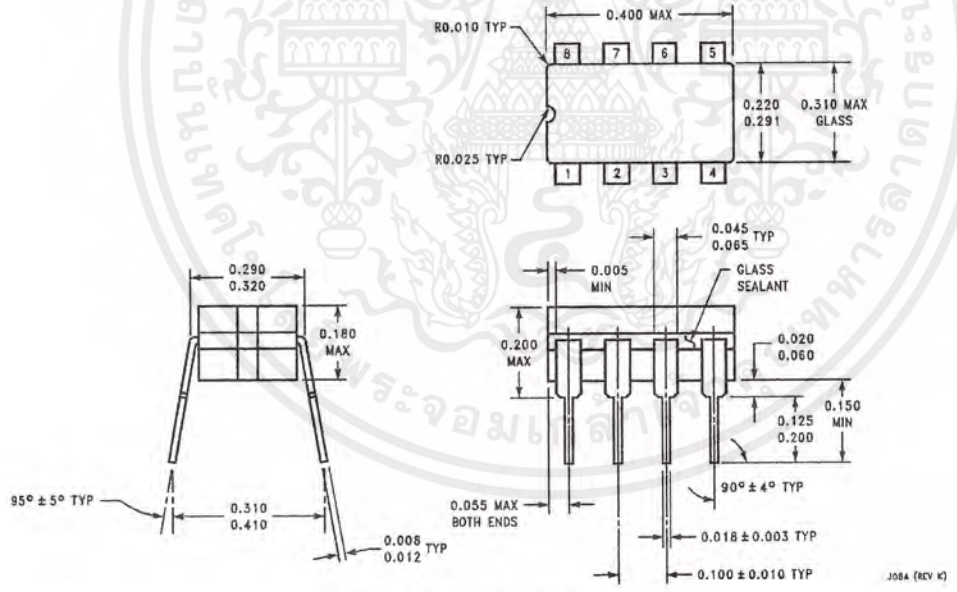
Note 5: Human body model, 1.5 kΩ in series with 100 pF.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters)



Metal Can Package (H)
Order Number LM1558H, LM1558H/883 or LM1458H
NS Package Number H08C

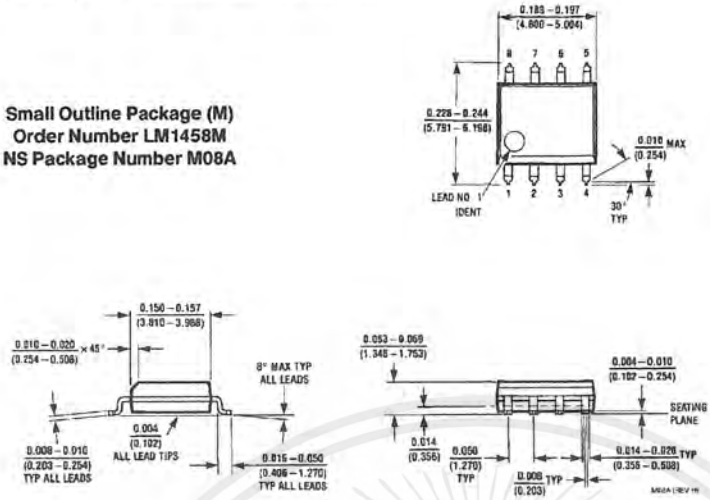


Ceramic Dual-In-Line Package (J)
Order Number LM1558J, LM1558J/883 or LM1458J
NS Package Number J08A

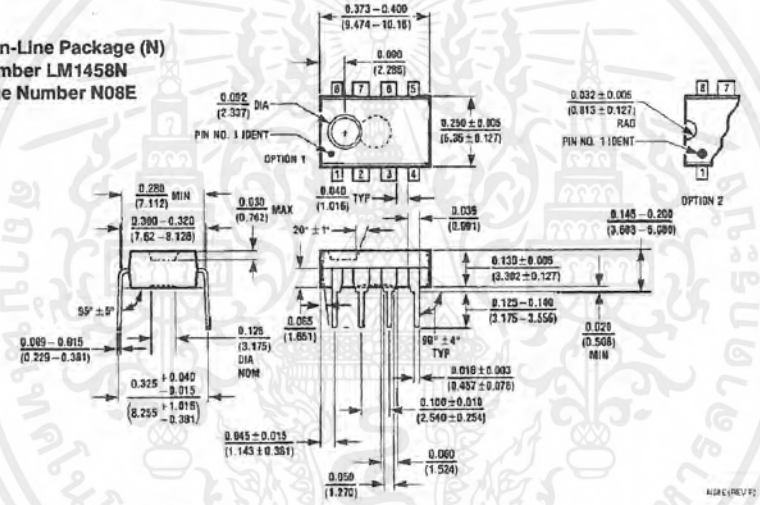
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters) (Continued)

Small Outline Package (M)
Order Number LM1458M
NS Package Number M08A



Molded Dual-In-Line Package (N)
Order Number LM1458N
NS Package Number N08E



LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

National Semiconductor Corporation
1111 West Bardin Road
Arlington, TX 76017
Tel: 1(800) 272-9959
Fax: 1(800) 737-7018

National Semiconductor Europe
Fax: (+49) 0-180-530 85 86
Email: cnjwge@tevm2.nsc.com
Deutsch Tel: (+49) 0-180-530 85 85
English Tel: (+49) 0-180-532 78 32
Français Tel: (+49) 0-180-532 93 58
Italiano Tel: (+49) 0-180-534 16 80

National Semiconductor Hong Kong Ltd.
13th Floor, Straight Block,
Ocean Centre, 5 Canton Rd.
Tsimshatsui, Kowloon
Hong Kong
Tel: (852) 2737-1600
Fax: (852) 2736-9960

National Semiconductor Japan Ltd.
Tel: 81-043-299-2309
Fax: 81-043-299-2408

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะได้รับคำแนะนำ ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากอาจารย์ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ช่วยให้คำปรึกษาด้านการทำงาน ด้านอุปกรณ์ และความรู้ที่เป็นประโยชน์ คุณจักรพงษ์ จารุมิศร์ นักศึกษาปริญญาโทที่ให้ความรู้ตั้งแต่ระดับพื้นฐาน แนะนำด้านการทดลอง อาจารย์ประสานงานโปรเจค ตลอดทั้งเจ้าหน้าที่ธุรการ ที่ช่วยแนะนำเกี่ยวกับเอกสารต่าง ๆ เจ้าหน้าที่สโตร์ที่อำนวยความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์ทุกอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. นรเศรษฐ พัฒนเดช , ธวัชชัย ศิริจันทร์พร และศักดิ์ชาย แก้วสกุล " ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง " ปริญญานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2540
2. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล " ระบบไฟฟ้ากำลัง เล่ม 2 " คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรกฎาคม 2537
3. ศุภกิจ จูตะวิริยะ " เอกสารประกอบคำบรรยาย วิชา อิเล็คทรอนิคส์ 2 " คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2538
4. K.R. Padiyar " HVDC Power Transmission Systems Technology and System Interactions " Wiloy Eastern Limited , New Delhi , India , 1993
5. Ned Mohand , Tore M Undeland and William P Robbins " Power Electronic converter , application and design " John Wiley & Sons , Inc, 1995 , Toronto ,Canada

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้