

คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ ประยุกต์ใช้ในระบบส่งผ่านกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

12-PULSE CONVERTERS FOR THE APPLICATION IN HVDC
TRANSMISSION SYSTEM

จักรพงษ์ ชารุมิตร์
CHAKRAPONG CHARUMIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะมหาบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

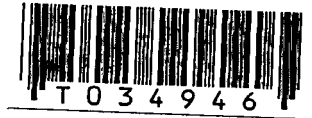
พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-639-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ ประยุกต์ใช้ในระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

12-PULSE CONVERTERS FOR THE APPLICATION IN HVDC
TRANSMISSION SYSTEM



จักรพงษ์ จารุมิตร

CHAKRAPONG CHARUMIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-639-8

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 34946
วัน, เดือน, ปี..... 8 ก.พ. 2543

**12-PULSE CONVERTERS FOR THE APPLICATION IN HVDC
TRANSMISSION SYSTEM**

CHAKRAPONG CHARUMIT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

1999

ISBN 974-622-639-8

COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ ประยุกต์ใช้ในระบบ ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง
ชื่อนักศึกษา	นายจักรพงษ์ จารุมิศรี
รหัสประจำตัว	39061097
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2542
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการสร้างชุดจำลองระบบการเชื่อมโยงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งที่อยู่ห่างไกลกันโดยสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ในการแปลงกำลังไฟฟ้าจากระบบเอซีเป็นระบบดีซีจะใช้ชุด 12 พัลส์ พูลคอนเวอร์เตอร์ โดยมีอุปกรณ์ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งและระบบการส่งเป็นแบบโมโนโพลตา ในการทดสอบสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับไปได้ โดยอาศัยคอมพิวเตอร์ควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า โดยเมื่อต้องการส่งกำลังไฟฟ้าจะทำการควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ด้านส่งทำงานในโหมดแรงดันเฟสเออร์ เพื่อที่จะแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปตามสายส่ง จากนั้นควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ด้านรับกำลังไฟฟ้าทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้การซิงโครไนซ์กับระบบทางด้านรับกำลังไฟฟ้าเพื่อช่วยในการหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์และนำกำลังงานที่ได้นี้ช่วยในการจ่ายโหลดต่อไป ซึ่งในการทดสอบจะแบ่งเงื่อนไขการทดสอบคือแรงดันและความถี่ทางด้านรับและด้านส่งกำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน แรงดันและความถี่ทางด้านรับและด้านส่งกำลังไฟฟ้าเท่ากัน และมากไปกว่านั้นจะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน เพื่อให้การออกแบบระบบควบคุมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

Thesis Title	12-Pulse Converters For The Application in HVDC Transmission System
Student	Mr. Chakrapong Charumit
Student ID.	39061097
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	1999
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Siriwat Potivejkul
Thesis Co-Advisor	Dr. Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis is concerned with the power transfer system simulator between two AC sources with remote location via high voltage direct current (HVDC). The system consists of two 12-pulse converters using thyristors as switching devices, and power circuit approach is monopolar. Bi-directional power flow can be controlled through a Personal Computer. A converter acting as a sender is controlled in a rectifying mode in order to transfer power from an AC system to high voltage DC system. An another converter is controlled in an inverting mode based on line commutation in order to convert DC power to AC power for supplying loads and another AC source. The tests have been performed under various conditions of voltage and frequency between the sending and receiving system. Furthermore, discussion of variation of active power controls and reactive power is given. This will be useful for effective power system design .

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อท่าน รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา และท่าน ดร.วิจิตร กิมเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ตลอดจนท่านอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

ขอขอบคุณ บิดาและมารดาที่คอยให้กำลังใจ นักศึกษาปริญญาตรีและปริญญาโทที่ช่วยเหลือในการบันทึกข้อมูลทดสอบ รวมทั้งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ช่วยเหลือด้านเครื่องมือทดสอบที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

จักรพงษ์ จารุมิสร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 พื้นฐานหลักการการทำงานของระบบ HVDC.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ชนิดของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง.....	4
2.2.1 ระบบขั้วเดียว (Monopolar Link).....	4
2.2.2 ระบบขั้วเดียวร่วมกัน (Homopolar Link).....	5
2.2.3 ระบบสองขั้ว (Bipolar Link).....	5
2.3 เปรียบเทียบระบบส่งถ่ายด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงกับกระแสสลับ.....	6
2.3.1 ความมั่นคงของระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	6
2.3.2 การเชื่อมโยงระบบกระแสสลับที่มีความถี่แตกต่างกัน.....	7
2.3.3 เปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างระบบส่ง.....	7
2.3.4 เปรียบเทียบระบบป้องกันการเกิด FAULT.....	7
2.4 หลักการทำงานของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง.....	8
2.5 การออกแบบระบบไฟฟ้ากระแสตรงจำลอง.....	10
2.5.1 ชุด 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2 หม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์.....	15
2.5.3 สมูทติงรีแอกเตอร์(Smoothing Reactor).....	17

บทที่ 3 คอนเวอร์เตอร์ในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง.....	18
3.1 บทนำ.....	18
3.2 คอนเวอร์เตอร์.....	18
3.3 แรงดันด้านระบบคิซี 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์.....	20
3.4 กระแสด้านระบบเอซี (Input Line Current).....	22
3.5 ตัวประกอบกำลัง(Power Factor).....	23
3.6 การทดสอบชุดคอนเวอร์เตอร์.....	25
3.7 ผลกระทบอินดักแตนซ์ด้านระบบเอซี (L_d).....	28
3.8 ผลการทดสอบ Over Lap.....	30
3.9 การทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์.....	32
3.10 การปรับปรุงกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบHVDC.....	34
3.11 สรุปผลการทดสอบ.....	34
บทที่ 4 การควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์.....	35
4.1 บทนำ.....	35
4.2 การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก (Digital to Analog).....	35
4.3 หลักการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	38
4.4 สรุปผล.....	39
บทที่ 5 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	40
5.1 บทนำ.....	40
5.2 การทดสอบที่แรงดันเท่ากันความถี่แตกต่างกัน.....	40
5.2.1 ขั้นตอนการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	41
5.2.2 สรุปผลการทดสอบ.....	52
5.3 แรงดันและความถี่ของระบบเท่ากัน โดยปรับ $\alpha=5^\circ$ และ $136^\circ < \gamma < 150^\circ$	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.1 ลำดับชั้นการทดสอบ.....	54
5.3.2 สรุปผลการทดสอบ.....	62
5.4 แรงดันและความถี่ของระบบเท่ากัน โดยปรับ $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ และ $\gamma = 140^\circ$	64
5.4.1 ลำดับชั้นการทดสอบ.....	64
5.4.2 สรุปผลการทดสอบ.....	71
5.5 การทดสอบที่แรงดันแตกต่างกันความถี่เท่ากัน.....	73
5.5.1 ลำดับชั้นการทดสอบ.....	73
5.5.2 สรุปผลการทดสอบ.....	78
5.6 วิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	79
5.6.1 การทดสอบขณะที่ไม่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	79
5.6.2 การทดสอบขณะส่งกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลด.....	81
5.6.3 การทดสอบขณะส่งกำลังไฟฟ้ามากกว่าโหลดทางด้านรับ.....	83
5.6.4 สรุปผลการทดสอบ.....	85
5.7 การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเสมือนในซัคคอนเวอร์เตอร์.....	87
5.7.1 สรุปผลการทดสอบ.....	89
บทที่ 6 บทสรุปและวิเคราะห์ผล.....	90
6.1 การออกแบบชุดการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	90
6.2 การควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าโดยคอมพิวเตอร์.....	91
6.3 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	91
6.4 การคำนวณกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC.....	92
6.4.1 การคำนวณ $\alpha = 5^\circ$ และ $135^\circ < \gamma < 150^\circ$	93
6.5 ข้อเสนอแนะ.....	96
6.6 โครงการที่พัฒนาต่อไป.....	96
เอกสารอ้างอิง.....	97

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ.....	98
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดสอบการส่งกำลังไฟฟ้า.....	104
ภาคผนวก ค เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	128
ภาคผนวก ง รายละเอียดวงจรต่างในระบบ HVDC.....	136
ภาคผนวก จ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	139
ประวัติผู้เขียน.....	146

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ผลการทดสอบก่อนส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	50
5.2 ผลการทดสอบขณะส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	50
5.3 ขณะยัง ไม่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่แรงดันเท่ากันความถี่แตกต่างกัน.....	51
5.4 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่แรงดันเท่ากันความถี่แตกต่างกัน.....	51
5.5 การส่งถ่ายกำลัง ไฟฟ้า Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันแตกต่างกันและความถี่เท่ากัน.....	78
5.6 ผลการทดสอบขณะ ไม่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	80
5.7 ผลการทดสอบขณะส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลด.....	83
5.8 ผลการทดสอบขณะส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ามากกว่าโหลด.....	85
6.1 ผลการคำนวณในเงื่อนไข $\alpha = 5^\circ$ และ $135^\circ < \gamma < 150^\circ$	94
ผ.3.1 ผลการทดสอบบุคคลคอนเวอร์เตอร์ในโหมดเรกติฟาย โดยปรับ มุมนำกระแส(α)ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 5-90 องศา.....	105
ผ.5.1 ตารางการทดสอบขณะที่ยังไม่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสอง ระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากัน ทั้งสองระบบ.....	106
ผ.5.2 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลัง ไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำ กระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha=5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุม นำกระแส $\gamma = 150^\circ$	107
ผ.5.3 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลัง ไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำ กระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha=5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุม นำกระแส $\gamma = 147^\circ$	108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ผ.5.4 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 145^\circ$	109
ผ.5.5 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$	110
ผ.5.6 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 138^\circ$	111
ผ.5.7 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 136^\circ$	112
ผ.5.8 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 25^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$	113

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ผ.5.9 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชียของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 20^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$	114
ผ.5.10 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชียของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 18^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$	115
ผ.5.11 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชียของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 14^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$	116
ผ.5.12 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชียของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 10^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$	117
ผ.5.13 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชียของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$	118

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ผ.5.14	อัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับอัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือนด้านระบบเอชของชุดคอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้า (เรคตีฟาย) กรณีที่ปรับมุมนำกระแส ด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha=5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $136^\circ < \gamma < 150^\circ$119
ผ.5.15	อัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับอัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือนด้านระบบเอชของชุดคอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (อินเวอร์เตอร์) กรณีที่ปรับมุมนำกระแส ด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha=5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $136^\circ < \gamma < 150^\circ$119
ผ.5.16	อัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับอัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือนด้านระบบเอชของชุดคอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้า (เรคตีฟาย) กรณีที่ปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$120
ผ.5.17	อัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับอัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือนด้านระบบเอชของชุดคอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (อินเวอร์เตอร์) กรณีที่ปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$120

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว 6 พัลส์.....	4
2.2 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว 12 พัลส์.....	5
2.3 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียวร่วมกัน.....	5
2.4 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว (6 พัลส์).....	6
2.5 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว (12 พัลส์).....	6
2.6 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่างๆของระบบส่งกำลังไฟฟ้า.....	7
2.7 สถานะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ขณะปรับมุมนำกระแส 0-180 องศา.....	8
2.8 แรงดันคิซึขณะปรับมุมนำกระแส 0-180 องศา.....	8
2.9 กราฟคุณลักษณะของ V_d และ I_d ที่จุดทำงาน.....	9
2.10 จุดทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์ขณะทำการส่งกำลังไฟฟ้า.....	9
2.11 โครงสร้างของระบบ HVDC จำลอง.....	10
2.12 วงจรการทำงานภายในของ IC TCA 785.....	11
2.13 สัญญาณแรงดัน Synchronize ที่ขา 5.....	12
2.14 สัญญาณแรงดัน Ramp ที่ขา 10.....	12
2.15 สัญญาณที่ขาต่างๆของ TCA 785.....	13
2.16 วงจรสับเบอร์.....	14
2.17 การทำงานของ T1 ก่อนหยุดนำกระแส และ T3 ขณะเริ่มนำกระแส.....	14
2.18 อัตราส่วนของการต่อหม้อแปลงแบบสตาร์/สตาร์ และสตาร์/เดลต้า.....	16
2.19 การต่อหม้อแปลงเลื่อนเฟสเข้าสู่ชุด TCA-785.....	16
3.1 สามเฟส 6 พัลส์ ชุดคอนเวอร์เตอร์.....	18
3.2 ลำดับการทำงานของ ไทริสเตอร์ที่มุมทริก 60 องศา.....	19
3.3 สัญญาณแรงดันทางคานคิซึขณะปรับมุมการนำกระแส 10 ถึง 70 องศา.....	21
3.4 วงจรรวมของระบบ HVDC ที่ใช้ชุด 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์.....	22
3.5 สัญญาณกระแสหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์/สตาร์.....	22
3.6 สัญญาณกระแสหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์/เดลต้า.....	23
3.7 สัญญาณกระแสกระแสรวม 12 พัลส์.....	23
3.8 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ไม่เป็นสัญญาณชาชน์.....	24
3.9 วงจรทดสอบชุดคอนเวอร์เตอร์ในสถานะเรกติฟาย.....	26

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 กราฟเพนเวอร์เฟลคเตอร์เมื่อปรับมุนำกระแสมากขึ้น(จุดที่ 1).....	26
3.11 กราฟ %THD ขณะปรับมุนำกระแส (จุดที่ 1).....	27
3.12 ประสิทธิภาพขณะปรับมุนำกระแส(α)มากขึ้น.....	27
3.13 สัญญาณกระแส (I_L) (ก)มุน $\alpha = 0$ องศา (ข) มุน $\alpha = 70$ องศา.....	27
3.14 วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายที่มี L_S ต่อกับชุดคอนเวอร์เตอร์.....	28
3.15 ช่วงเวลาหยุดนำกระแสที่มีผลมาจาก L_S	29
3.16 กระแสด้านเอซีที่มีผลกระทบจาก L_S	29
3.17 ช่วงเวลา Over Lap ที่มุน $\alpha = 0$ องศา.....	30
3.18 ช่วงเวลา Over Lap ที่มุน $\alpha = 50$ องศา.....	31
3.19 ความสัมพันธ์ของ%THD; กับการเปลี่ยนแปลงมุน Over lap.....	31
3.20 การเกิด Line Notching ของสัญญาณแรงดัน 6 พัลส์.....	32
3.21 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะอินเวอร์เตอร์.....	33
3.22 แรงดัน V_p และกระแส I_p ในโหมคอินเวอร์เตอร์.....	33
3.23 วิธีการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนทางด้านระบบเอซี.....	34
4.1 ระบบควบคุมโดยคอมพิวเตอรื.....	35
4.2 วงจรแยกกราวน์ 8 บิต.....	36
4.3 วงจร R-2R Ladder 8 bit.....	37
4.4 แรงดันดิจิที่ออกจากชุด DAC 255 Step 0-15V.....	37
4.5 หน้าจอแสดงผลของการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	38
4.6 แผนผังขั้นตอนการควบคุมมุนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์.....	39
5.1 การทดสอบที่แรงดันเท่ากันความถี่แตกต่างกัน.....	40
5.2 แรงดันคร่อม SCR ขณะทำงานในโหมคเรคตีฟาย $\alpha = 5$ องศา.....	41
5.3 แรงดันคร่อม SCR ขณะทำงานในโหมคอินเวอร์เตอร์ $\gamma = 150$ องศา.....	42
5.4 แรงดันไฟฟ้าในสายส่งคิซีด้านส่งกำลังไฟฟ้า.....	42
5.5 แรงดันไฟฟ้าในสายส่งคิซีด้านรับกำลังไฟฟ้า.....	43
5.6 แรงดัน V_p และกระแส I_L ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1).....	43
5.7 Harmonic Spectrum กระแส I_L ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1).....	44
5.8 Harmonic Spectrum แรงดัน V_L ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1).....	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 แรงดัน V_p และกระแส I_L คอนเวอร์เตอร์ด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2).....	45
5.10 Harmonic Spectrum กระแส I_L คอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2).....	45
5.11 Harmonic Spectrum แรงดัน V_L คอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2).....	46
5.12 แรงดัน V_p และกระแส I_L คอนเวอร์เตอร์ด้านรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3).....	46
5.13 Harmonic Spectrum กระแส I_L คอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3).....	47
5.14 Harmonic Spectrum แรงดัน V_L คอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3).....	47
5.15 แรงดัน V_p และกระแส I_L ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (จุดที่ 4).....	48
5.16 Harmonic Spectrum กระแส I_L เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (จุดที่ 4).....	48
5.17 Harmonic Spectrum แรงดัน V_L เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (จุดที่ 4).....	49
5.18 วงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ.....	49
5.19 วงจรภายในของคิซิมอเตอร์.....	50
5.20 ตำแหน่งต่างๆของการวัดกำลังไฟฟ้า	53
5.21 แรงดันตกคร่อม SCR ทำงานในโหมดเรกติฟาย.....	54
5.22 แรงดันตกคร่อม SCR ในโหมดอินเวอร์เตอร์มุม $\gamma = 150$ องศา.....	55
5.23 แรงดันดีซีในสายส่งด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha=5$ องศา	55
5.24 แรงดันดีซีในสายส่งด้านรับกำลังไฟฟ้า $\gamma=150$ องศา.....	55
5.25 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Line (V_{AB}) (จุดที่ 1).....	56
5.26 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Phase (V_{AN}) จุดที่ 2.....	56
5.27 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Phase (V_{AN}) จุดที่ 3.....	56
5.28 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Line (V_{AB}) จุดที่ 4.....	57
5.29 กราฟกำลังไฟฟ้า P,Q,S ที่ Substation A ขณะส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1).....	57
5.30 กราฟกำลังไฟฟ้า P,Q,S ที่ไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ A ส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2).....	58
5.31 กราฟกำลังไฟฟ้า P,Q,S ที่ไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3).....	58
5.32 กราฟกำลังไฟฟ้า P,Q,S ที่ Substation B ขณะรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 4).....	58
5.33 ประสิทธิภาพของระบบและสายส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha=5^\circ$ และ $136^\circ < \gamma < 150^\circ$	59
5.34 การเปลี่ยนแปลง %THDi ทางด้านรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3,4).....	59
5.35 การเปลี่ยนแปลง %THDi ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1,2).....	60
5.36 Power Factor ด้านส่งและรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1 และ 4).....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.37 แรงดันคิซี ด้านส่งและรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1 และ 4).....	61
5.38 Harmonic Spectrum ของกระแสที่ Substation A(I_A)จุดที่ 1.....	61
5.39 Harmonic Spectrum ของกระแสที่ไหลเข้า Converter A(I_A) จุดที่ 2.....	61
5.40 Harmonic Spectrum ของกระแสเอชี่ Converter B(I_A) , $\gamma=155^\circ$ จุดที่ 3.....	62
5.41 Harmonic Spectrum ของกระแสเอชี่ Substation B(I_A) , $\gamma=155^\circ$ จุดที่ 4.....	62
5.42 จุดทดสอบและวัดสัญญาณ ไฟฟ้าโดยปรับ $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ และ $\gamma = 140^\circ$	64
5.43 แรงดันตกคร่อม SCR ทำงานในโหมดเรกติฟาย $\alpha=25^\circ$	65
5.44 แรงดันตกคร่อม SCR ทำงานในอินเวอร์เตอร์มูม $\gamma=140^\circ$	65
5.45 แรงดันในสายส่งคิซีที่มูม $\alpha=25^\circ$	65
5.46 แรงดันในสายส่งคิซีที่มูม $\gamma=140^\circ$	66
5.47 สัญญาณกระแส Line (I_A)และแรงดันLine(V_{AB}) (จุดที่ 1).....	66
5.48 สัญญาณกระแส Line (I_A)และแรงดันPhase(V_{AN}) (จุดที่ 2).....	66
5.49 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดันPhase(V_{AN}) (จุดที่ 3).....	67
5.50 สัญญาณกระแส Line (I_A)และแรงดัน Line (V_{AB}) (จุดที่ 4).....	67
5.51 กำลังไฟฟ้า P,Q,Sด้านส่งกำลังไฟฟ้า Substation A (จุดที่ 1).....	67
5.52 กำลังไฟฟ้า P,Q,S ด้านส่งกำลังไฟฟ้าConverter A (จุดที่ 2).....	68
5.53 กำลังไฟฟ้า P,Q,S ด้านรับกำลังไฟฟ้าConverter B (จุดที่ 3).....	68
5.54 กำลังไฟฟ้า P,Q,S ด้านรับกำลังไฟฟ้าSubstation B (จุดที่ 4).....	69
5.55 ประสิทธิภาพของระบบและสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	69
5.56 Power Factor ด้านรับและส่งกำลังไฟฟ้า.....	69
5.57 %THDi ด้านส่งกำลังไฟฟ้า.....	70
5.58 %THDi ด้านรับกำลังไฟฟ้า.....	70
5.59 แรงดันคิซีในสายส่งด้านส่งและรับกำลังไฟฟ้า.....	71
5.60 จุดทดสอบและตำแหน่งต่างๆของการวัดรูปสัญญาณ.....	73
5.61 แรงดันตกคร่อม SCR ในโหมดเรกติฟาย $\alpha=15$ องศา.....	74
5.62 แรงดันคร่อม SCR ในโหมดอินเวอร์เตอร์ $\gamma=162$ องศา.....	74
5.63 แรงดันคิซีด้านส่งกำลังไฟฟ้า.....	74
5.64 แรงดันคิซีด้านรับกำลังไฟฟ้า.....	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.65 แรงดันและกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1).....	75
5.66 แรงดันและกระแสด้านขดคอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2).....	75
5.67 แรงดันและกระแสด้านขดคอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3).....	76
5.68 แรงดันและกระแสระบบเอชิต้านรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 4).....	76
5.69 Harmonic Spectrum กระแส ที่ Substation A ขณะส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1).....	76
5.70 Harmonic Spectrum กระแส ที่ คอนเวอร์เตอร์ A ขณะส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2).....	77
5.71 Harmonic Spectrum กระแส ที่ คอนเวอร์เตอร์ B ขณะรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3).....	77
5.72 Harmonic Spectrum กระแส ที่ Substation B ขณะรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 4).....	77
5.73 วงจรการทดสอบรวมทั้งระบบขณะไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้า.....	79
5.74 แรงดันและกระแส จุดที่ 1 ขณะไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้า.....	80
5.75 แรงดันและกระแส จุดที่ 3 ขณะไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้า.....	80
5.76 แรงดันและกระแส จุดที่ 2 ขณะไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้า.....	81
5.77 วงจรการทดสอบรวมทั้งระบบขณะส่งกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลดทางด้านรับ.....	81
5.78 แรงดันและกระแส จุดที่ 1 ขณะส่งกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลด.....	82
5.79 แรงดันและกระแส จุดที่ 2 ขณะส่งกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลด.....	82
5.80 แรงดันและกระแส จุดที่ 3 ขณะส่งกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลด.....	82
5.81 วงจรการทดสอบรวมทั้งระบบขณะส่งกำลังไฟฟ้ามักกว่าโหลด.....	83
5.82 แรงดันและกระแส จุดที่ 1 ขณะส่งกำลังไฟฟ้ามักกว่าโหลด.....	84
5.83 แรงดันและกระแส จุดที่ 2 ขณะส่งกำลังไฟฟ้ามักกว่าโหลด.....	84
5.84 แรงดันและกระแส จุดที่ 3 ขณะส่งกำลังไฟฟ้ามักกว่าโหลด.....	84
5.85 แรงดันและกระแส จุดที่ 7 ขณะส่งกำลังไฟฟ้ามักกว่าโหลด.....	85
5.86 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าเสมือน กรณี $5^\circ < \alpha < 25^\circ, \gamma = 140^\circ$ ด้านขดอินเวอร์เตอร์ (จุดทดสอบที่ 3).....	87
5.87 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าเสมือน กรณี $5^\circ < \alpha < 25^\circ, \gamma = 140^\circ$ ด้านขดเรกติฟาย (จุดทดสอบที่ 2).....	87
5.88 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าเสมือน กรณี $\alpha = 5^\circ, 136^\circ < \gamma < 150^\circ$ ด้านขดอินเวอร์เตอร์ (จุดทดสอบที่ 3).....	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.89 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าเสมือน	
กรณี $\alpha=5^\circ, 136^\circ < \gamma < 150^\circ$ ด้านชุดเรกติฟาย (จุดทดสอบที่ 2).....	88
6.1 ตำแหน่งต่างๆของผลการคำนวณ.....	93
ก-1 เครื่องมือวัด Harmonic Spectrum.....	99
ก-2 Power Meter.....	99
ก-3 Digital Oscilloscope.....	100
ก-4 ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ.....	100
ก-5 ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	101
ก-6 ชุดกำเนิดสัญญาณกระแสชุปกรณ์ไทรสเตอร์.....	101
ก-7 หม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์.....	102
ก-8 ชุดแยกกราวน์ และชุด DAC แบบ R-2R Ladder.....	102
ก-9 สมุดตั้งรีแอคเตอร์.....	103
ก-10 ชุดคอนเวอร์เตอร์.....	103
ง-1 วงจรรวมของชุดควบคุมมูนำกระแสโดยใช้คอมพิวเตอร์.....	137
ง-2 วงจรรวมของชุดกำเนิดสัญญาณนำกระแสของไทรสเตอร์.....	138

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันขีดความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าภายในประเทศ เริ่มที่จะไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า และทรัพยากรที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าก็เริ่มขาดแคลน ในจัดทำกำลังงานทดแทนเพื่อให้สอดคล้องต่อความต้องการ คือ การสร้างโรงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มกำลังผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการภายในประเทศและในกรณีที่ไม่ต้องการสร้างโรงไฟฟ้าใหม่ภายในประเทศ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องซื้อพลังงานไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้านเพื่อมาชดเชยการใช้ไฟฟ้าภายในประเทศให้เพียงพอต่อความต้องการ เช่น ซื้อไฟฟ้าจากประเทศลาวมาใช้ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในส่วนภาคใต้ก็จะมีโครงการซื้อพลังงานไฟฟ้าจากประเทศมาเลเซีย ซึ่งก็ติดปัญหาความแตกต่างในด้านระบบผลิตของประเทศมาเลเซียที่ใช้ความถี่ 60Hz ดังนั้นจึงไม่สามารถเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงกับประเทศไทยได้

จากปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวมาแล้ว พบว่าการส่งด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสามารถเชื่อมโยงการส่งกำลังไฟฟ้าจากสองแหล่งที่มีความถี่แตกต่างกันได้ เช่น 50Hz กับ 60Hz ได้ โดยใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์แปลงผัน และยังสามารถลดค่าความสูญเสียในสายส่งที่ระยะทางไกลๆได้ ทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งสูงกว่าการส่งด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ และเมื่อระยะทางเท่ากันและพิกัดการส่งเท่ากัน การส่งด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสตรงก็ยังมีราคาก่อสร้างระบบสายส่งที่ต่ำกว่าระบบการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยกระแสสลับ อีกทั้งยังสามารถช่วยเสริมกำลังไฟฟ้าขณะที่ในประเทศใช้ไฟฟ้าสูงสุดต่อวัน(Peak Load)เพื่อลดค่าเชื้อเพลิงที่จ่ายให้กับโรงไฟฟ้า

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้เพื่อจัดสร้างชุดทดสอบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์แบบโมโนโพล่าเพื่อเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี โดยมีวัตถุประสงค์หลักดังต่อไปนี้

- 1) เพื่อศึกษาเทคนิคการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบสองควอร์เรนท์
- 2) เพื่อศึกษาหลักการควบคุมและเทคนิคการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์
- 3) เพื่อศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังขณะทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าและแนวทางแก้ไข

4) เพื่อเป็นพื้นฐานในการวิจัยและพัฒนาาระบบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1) ในการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ใช้ชุด 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์สามารถบังคับให้ชุดคอนเวอร์เตอร์ทำงานได้ 2 สถานะการทำงานคือ สถานะเรกติฟาย และสถานะอินเวอร์เตอร์โดยปรับมุนำกระแสของอุปกรณ์ไทรสเตอร์ตั้งแต่ 0-180 องศา

2) หลักการควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงทำได้โดยปรับมุนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า ให้ทำงานในสถานะเรกติฟาย และชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์ ในการควบคุมปริมาณการส่งกำลังไฟฟ้ามีตัวแปรที่สำคัญคือปริมาณกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังไฟฟ้าดีซี โดยสามารถควบคุมปริมาณแรงดันได้โดยควบคุมมุนำกระแสของเรกติฟายเออร์และควบคุมกระแสได้โดยควบคุมมุนำกระแสของอินเวอร์เตอร์

3) ผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากชุด 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์จะมีลำดับที่ 11,13,23,25 และอื่นๆ ซึ่งเมื่อเทียบกับชุด 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ที่มีลำดับกระแสฮาร์มอนิก 5,7,11,13 และอื่นๆ จะพบว่าการใช้ชุด 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ มี %THD_i ที่ต่ำกว่าทำให้ชุดฟิลเตอร์มีขนาดเล็กและลดค่าสูญเสียในระบบลงได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

โดยในวิทยานิพนธ์เป็นการจำลองชุดการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ใช้ชุด 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ เป็นตัวแปลงจากระบบเอซีเป็นดีซีและดีซีเป็นเอซี โดยระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าต่อวงจรแบบโมโน โพลาร์ และใช้อุปกรณ์ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ซึ่งสามารถทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยการปรับมุนำกระแสของไทรสเตอร์ให้คอนเวอร์เตอร์ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าทำงานในสถานะเรกติฟายเออร์แปลงจากระบบเอซีไปเป็นระบบดีซี โดยผ่านตามสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และปรับมุนำกระแสให้คอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้า ทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนกลับจากระบบดีซีเป็นระบบเอซี ซึ่งในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้านี้จะใช้คอมพิวเตอรืเป็นอุปกรณ์ควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับไปมาระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งที่มีความถี่แตกต่างกันได้ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่ง โดยแบ่งเงื่อนไขการทดสอบไว้ 2 กรณีคือ แรงดันและความถี่ทางด้านรับและด้านส่งกำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน แรงดันและความถี่ทางด้านรับและด้านส่งกำลังไฟฟ้าเท่ากัน

1.5 ขอบเขตการวิจัย

- 1) สร้างชุดต้นแบบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์แบบ โมโน โฟลา โดย ใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า
- 2) ทำการวิเคราะห์ Power Flow ของระบบและผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยที่มีอยู่เดิม ซึ่งงานวิจัยเดิมนั้นเป็นการศึกษา การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้ชุด 6 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ แบบ โมโน โฟลา ใน วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้ชุด 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ การพัฒนานี้สามารถทำให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ในระบบเอชทางด้านรับกำลังไฟฟ้า และทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณกระแสในระบบเอชมีรูปสัญญาณเข้าใกล้รูป สัญญาณซายน์มากยิ่งขึ้นซึ่งรูปสัญญาณกระแสที่ได้นี้เรียกว่า 12 Step ในการแบ่งขั้นตอนการศึกษานี้สามารถแบ่งขั้นตอนต่างได้ดังนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีของระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
- 2) ออกแบบและสร้างชุดทดสอบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า
- 3) ทำการทดสอบและแก้ไขให้เป็นไปตามหลักทฤษฎี
- 4) บันทึกผลการทดสอบ
- 5) วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ

บทที่ 2

พื้นฐานหลักการทำงานของระบบ HVDC

2.1 บทนำ

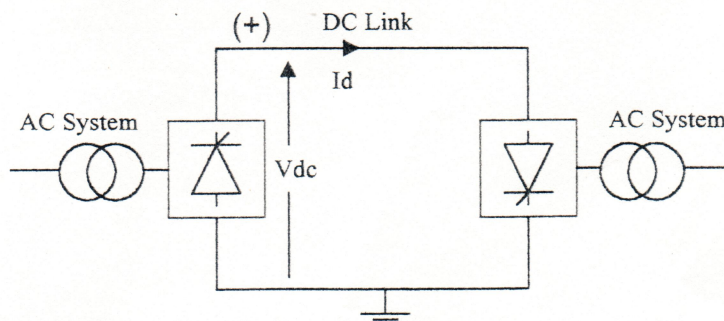
จากพื้นฐานทางวิศวกรรมไฟฟ้านั้น ระบบการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จะมีค่าสมรรถนะที่โดยไม่แปรเปลี่ยนไปตามเวลาทำให้มีความสามารถส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเทียบกับระบบเอซี (AC) ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงชนิดและรูปแบบต่างๆของระบบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้ 6 พัลส์และ 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ รวมทั้งข้อดีข้อเสียของการเชื่อมโยงระบบคิซีเมื่อเทียบกับระบบเอซีที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และอธิบายลำดับขั้นตอนของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในสถานะต่างๆอย่างละเอียด[5]

2.2 ชนิดของระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

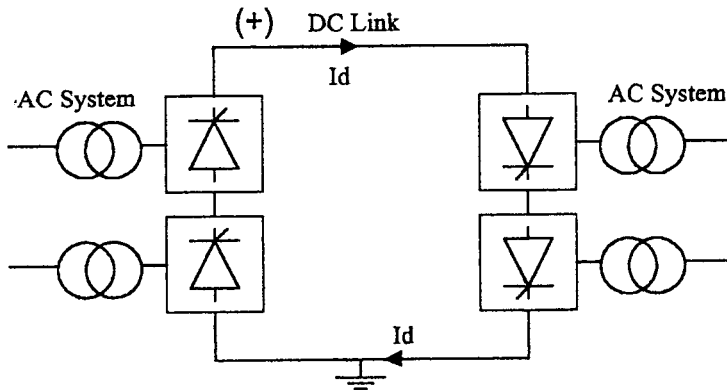
ระบบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบใหญ่คือ

2.2.1 ระบบขั้วเดียว (Monopolar Link)

ในระบบนี้จะมีสายส่งที่เป็นตัวนำเพียงเส้นเดียวซึ่งส่วนมากจะใช้สายส่งกำลังแบบ Overhead Line หรือสายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine) หรือใช้ทั้งสองแบบรวมกันและจะใช้พื้นดินหรือทะเลเป็นตัวส่งกลับโดยส่วนใหญ่จะมีศักดาทางไฟฟ้าที่สายส่งกำลังเป็นบวกดังแสดงดังรูปที่ 2.1 เป็นการส่งด้วย 6 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ และรูป 2.2 เป็นการส่งด้วย 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปใช้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มีพิกัดไม่สูงมากนักพิกัดของกระแสประมาณ 200 ถึง 1000 แอมป์ระยะทางการส่งมากกว่า 25 กิโลเมตรและพิกัดกำลังประมาณ 250 ถึง 500 MW ซึ่งมีข้อเสียคือเมื่อเกิดFaultในระบบหรือสายส่งขาดจะไม่สามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้



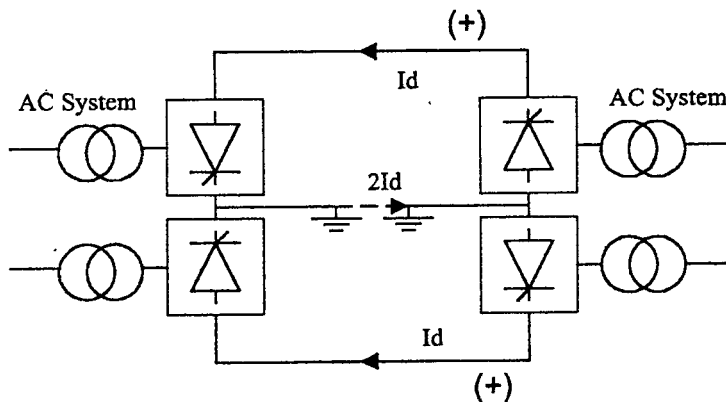
รูปที่ 2.1 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว 6 พัลส์



รูปที่ 2.2 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว 12 พัลส์

2.2.2 ระบบขั้วเดียวร่วมกัน (Homopolar Link)

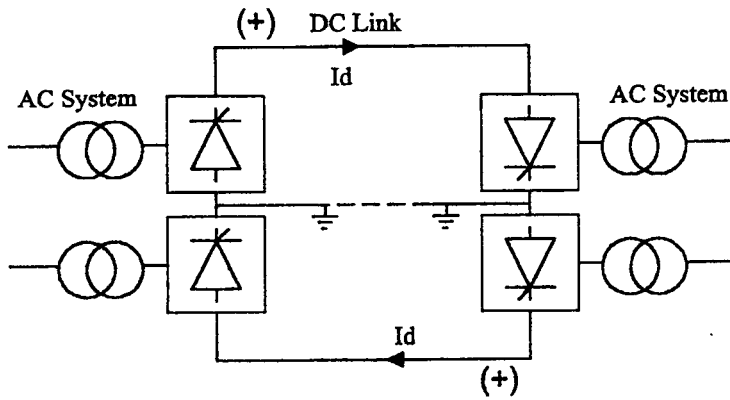
ในระบบนี้ ใช้สายส่งตัวนำสองเส้น ซึ่งมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวกทั้งสองเส้น แล้วใช้พื้นดินเป็นทางเดินกลับ และถ้าหากเกิดมีเหตุเสียหายหรือข้อผิดพลาด (Fault) บนตัวนำใดตัวหนึ่ง ตัวนำที่เหลืออยู่จะทำหน้าที่จ่ายโหลดเต็มพิกัดแทนตัวนำที่เสียไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3



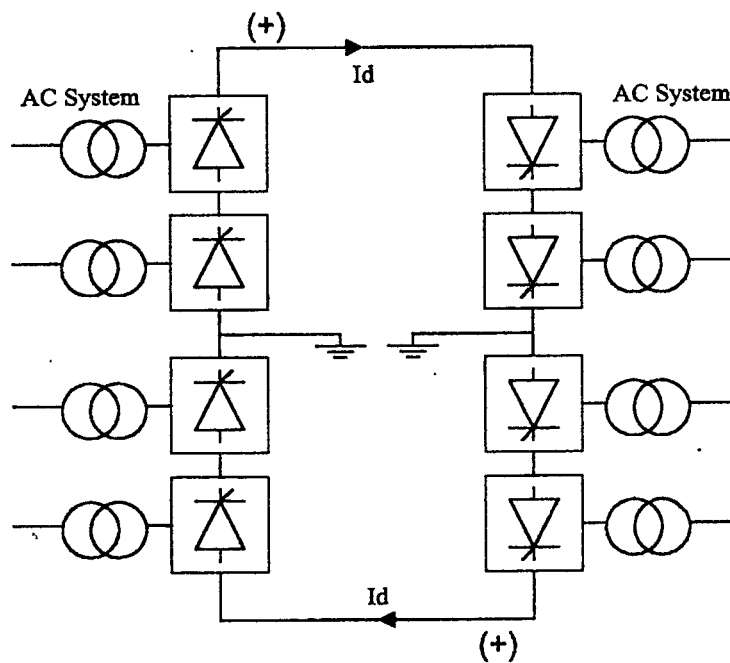
รูปที่ 2.3 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียวร่วมกัน

2.2.3 ระบบสองขั้ว (Bipolar Link)

ในระบบนี้จะมีตัวนำอยู่สองตัวนำ โดยตัวนำแต่ละตัวจะมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวก (+) และลบ (-) ซึ่งแต่ละขั้วจะมีชุดคอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดการทำงานโดยเป็นอิสระต่อกัน เมื่อเกิดเหตุเสียหายใดๆ ขึ้นบนตัวนำใดตัวนำหนึ่ง ตัวนำที่เหลือก็จะทำการจ่ายโหลดเพียงครึ่งหนึ่งของพิกัดกำลังทั้งหมด โดยวงจรการส่งจะกลายเป็นแบบโมโนโพล ในทั่วไปการส่งด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบไบโพลานี้นิยมส่งกำลังไฟฟ้าที่พิกัด ± 500 กิโลโวลต์ 1500 เมกวัตต์ระยะทางการส่งประมาณ 800 กิโลเมตร



รูปที่ 2.4 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว (6 พัลส์)



รูปที่ 2.5 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว (12 พัลส์)

2.3 เปรียบเทียบระบบส่งถ่ายด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงกับกระแสสลับ

2.3.1 ความมั่นคงของระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

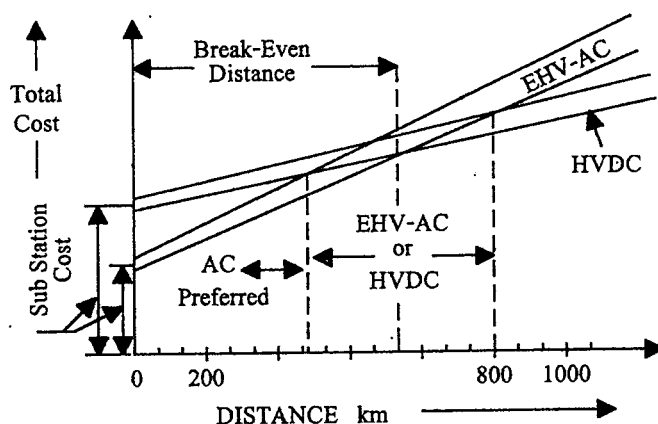
ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะมีค่าความน่าเชื่อถือสูงทางด้านความมั่นคงของการส่งกำลังงานไฟฟ้าเนื่องจากระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้วจะมีความสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องซึ่งถ้าเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบสองขั้ว สายตัวนำหนึ่งในสองของของระบบสองขั้วจะถูกต่อลง Ground ระบบสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้โดยระบบขั้วเดียวแทน

2.3.2 การเชื่อมโยงระบบกระแสสลับที่มีความถี่แตกต่างกัน

ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง จะสามารถเชื่อมโยงระบบที่มีความถี่แตกต่างกันได้ โดยไม่ต้องมีเงื่อนไขว่าแรงดันของสองระบบเอชไอจะต้องมีขนาดเท่ากันความถี่ในระบบต้องเท่ากันและ Phase sequence เหมือนกัน เนื่องจากชุดคอนเวอร์เตอร์จะเป็นอุปกรณ์แยกระบบให้

2.3.3 เปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างระบบส่ง

ราคาค่าต้นทุนการก่อสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับผลรวมของราคาค่าก่อสร้าง Substation รวมกับราคาค่าก่อสร้างของสายส่งต่อความยาวสายทั้งหมด(กิโลเมตร) และยังรวมไปถึงราคาค่าก่อสร้างอื่นๆอีก[5] ซึ่งจากรูปที่ 2.6 เป็นการแสดงราคาการก่อสร้างระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง(HVDC)เทียบกับระบบการส่งด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ(EHV-AC)ที่พิกัดกำลัง



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่างๆของระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

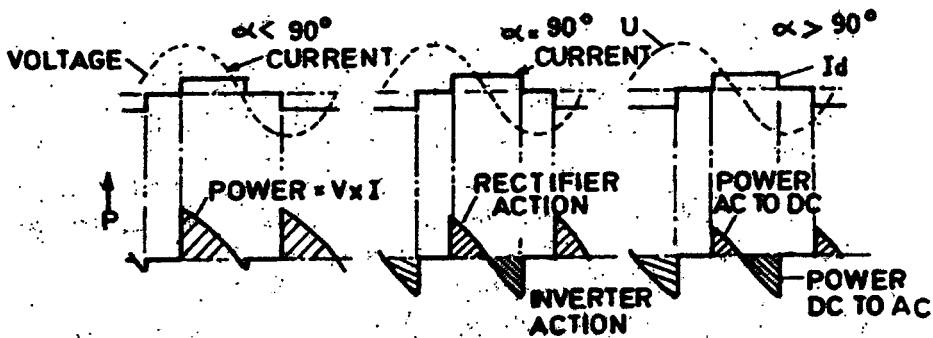
การส่งเท่ากัน จากกราฟราคาต้นทุนของ Substation HVDC ที่ระยะทางการส่งไม่เกิน 800 กิโลเมตร จะมีราคาสูงเมื่อเทียบกับ การส่งด้วยระบบ AC แต่เมื่อต้องการส่งกำลังไฟฟ้าที่ระยะทางไกลๆเกิน 800 กิโลเมตร พบว่าการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงจะมีราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำกว่าระบบการส่งด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

2.3.4 เปรียบเทียบระบบป้องกันการเกิด FAULT

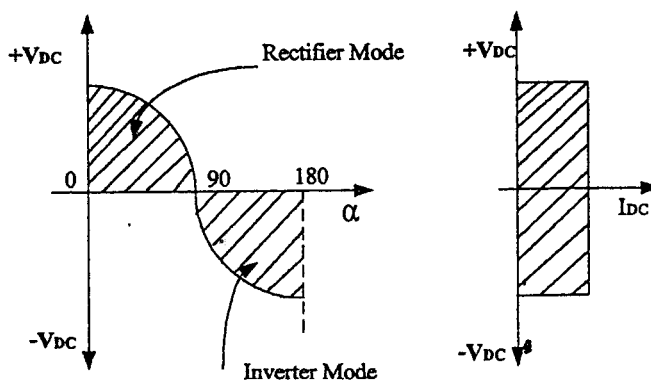
ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ยังไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าระดับแรงดันได้เหมือนระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าได้หลายระดับ ซึ่งมีกำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงน้อยมาก และยังไม่มียุทธศาสตร์ตัดคอนหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้กับกระแสตรงแรงสูง เนื่องจากระบบไฟฟ้ากระแสตรงจะมีกระแสไหลต่อเนื่องตลอดเวลาซึ่งจะทำให้เกิดการอาร์ค (Arc) ได้ง่าย และรุนแรง ขณะที่หน้าสัมผัสของอุปกรณ์ตัดคอนแยกออกจากกันขณะมีไหลล ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนานำเอาสารกึ่งตัวนำมาใช้เป็นสวิตช์

2.4 หลักการทำงานของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอหลักการเบื้องต้นของการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งผ่านทางสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งในการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 2.2 โดยชุดคอนเวอร์เตอร์นี้สามารถทำงานได้ในสองสภาวะการทำงานตามรูปที่ 2.7 โดยเมื่อต้องการควบคุมให้ชุดคอนเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะเรกติฟายจะต้องปรับมุมนำกระแส(α)ให้อยู่ระหว่าง 0 องศาแต่ไม่เกิน 90 องศา และถ้าต้องการควบคุมให้ชุดคอนเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ จะต้องควบคุมมุมนำกระแสให้มากขึ้น โดยมากกว่า 90 องศา และน้อยกว่า 180 องศา ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ขอเรียกมุมนำกระแสทางด้านสภาวะอินเวอร์เตอร์ เพื่อแบ่งแยกมุมนำกระแสระหว่างด้านส่งกำลังไฟฟ้าและด้านรับกำลังไฟฟ้าว่า Extinction Angle (γ) ซึ่งก็คือมุม α ที่อยู่ระหว่าง 90-180 องศา นั่นเอง และเมื่อปรับมุมนำกระแสมากกว่า 90 องศา จะเห็นว่าชุดคอนเวอร์เตอร์จะสามารถทำงานใน



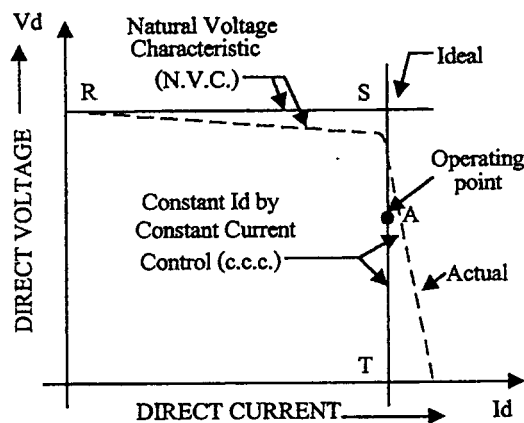
รูปที่ 2.7 สภาวะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ขณะปรับมุมนำกระแส 0-180 องศา



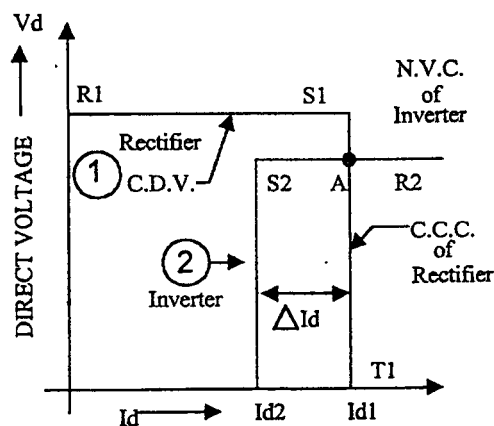
รูปที่ 2.8 แรงดันคิซีขณะปรับมุมนำกระแส 0-180 องศา

สภาวะอินเวอร์เตอร์ โดยที่แรงดันที่สายส่งไฟฟ้าด้านรับกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบดังรูปที่ 2.8 ซึ่งก็หมายความว่าสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงคืนกลับไปยังระบบเอซีได้ แต่มุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันก็จะล่าหลังเกิน 90 องศาทำให้เกิดค่า Reactive Power ไหลเข้าสู่คอน

เวอร์เตอร์ และกระแสในสายส่งกำลังไฟฟ้าสามารถไหลได้ทิศทางเดียว ในขณะที่ทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า สามารถอธิบายคุณลักษณะพื้นฐานของการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามรูปที่ 2.9 โดยให้แกน X เป็นแกนกระแสในสายส่งและแกน Y เป็นแกนแรงดันในสายส่ง จากกราฟในช่วงของเส้นตรง(RS) เป็นแรงดันครอปในสายส่ง(N.V.C.)ขึ้นอยู่กับ การปรับมุนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ในสถานะเรกติฟายเออร์และกระแสกับความต้านทานตัวนำในสายส่งกระแสตรงซึ่งสามารถแยกเป็นกรณีในอุดมคติเส้นทึบและกรณีปฏิบัติเส้นประ ในช่วงกราฟแกนตั้ง (ST) เป็นการควบคุมกระแสให้คงที่ในสายส่งกำลังไฟฟ้า(C.C.C.)ขณะที่ทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า ขั้นตอนการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องปรับมุนำกระแสชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในสถานะเรกติฟายโดยควบคุมกระแสในสายส่งให้คงที่ ในขณะที่เดียวกันก็ปรับมุนำกระแสชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจากรูปที่ 2.9 ขณะปรับมุนำกระแสชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับให้ทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์จะเกิดการลัดวงจรขึ้นทำให้เกิดกระแสสูงขึ้นในสายส่งที่จุด T



รูปที่ 2.9 กราฟคุณลักษณะของ V_d และ I_d ที่จุดทำงาน



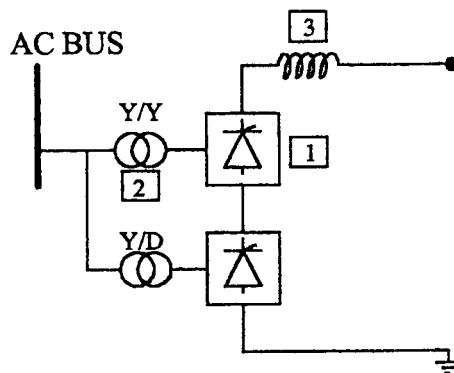
รูปที่ 2.10 จุดทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์ขณะทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

โดยในสภาวะนี้จะต้องควบคุมให้กระแสในสายส่งคงที่ซึ่งในทางปฏิบัติจะเป็นไปตามเส้นประและเมื่อสามารถคอมมิวเตชันจุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ได้ก็จะมีกำลังไฟฟ้าไหลผ่านในสายส่ง จากรูปที่ 2.10 แสดงจุดทำงานขณะส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

จะเห็นว่า I_{d2} เป็นกระแสอ้างอิงในขณะที่ทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า โดยจะรักษาให้ ΔI_d ประมาณ 10% [4] เมื่อเทียบกับ I_{d1} ที่จุดทำงานของระบบ โดยที่แรงดันคิซีของจุดคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์จะต่ำกว่าจุดคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในสภาวะเรกติฟายเสมอ

2.5 การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจำลอง

ในการออกแบบส่วนประกอบของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงนี้ ใช้วงจรการส่งแบบโมโนโพล โดยใช้จุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสต่ออนุกรมกันดังรูปที่ 2.11 พิกัดแรงดันที่ AC BUS เท่ากับ $200V_{LL}$ ผ่านหม้อแปลงแรงดันขึ้น 1:2 โดยมีแรงดันทางด้าน Secondary เท่ากับ $400V_{LL}$ เข้าสู่จุดคอนเวอร์เตอร์ และพิกัดแรงดันคิซีที่มุมกระแส (α) ที่ 0 องศา มีค่าเท่ากับ $1070V_{DC}$ ตามสมการที่ 3.3 โดยออกแบบให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าที่พิกัด $3,000W_{DC}$ ความต้านทานสายส่งมีค่าเท่ากับ 5Ω และกระแสในสายส่งที่พิกัดประมาณ 3A โดยสามารถแบ่งอุปกรณ์ประกอบต่างๆของระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้ 3 ส่วนใหญ่ๆดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของระบบ HVDC จำลอง

โครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจำลอง

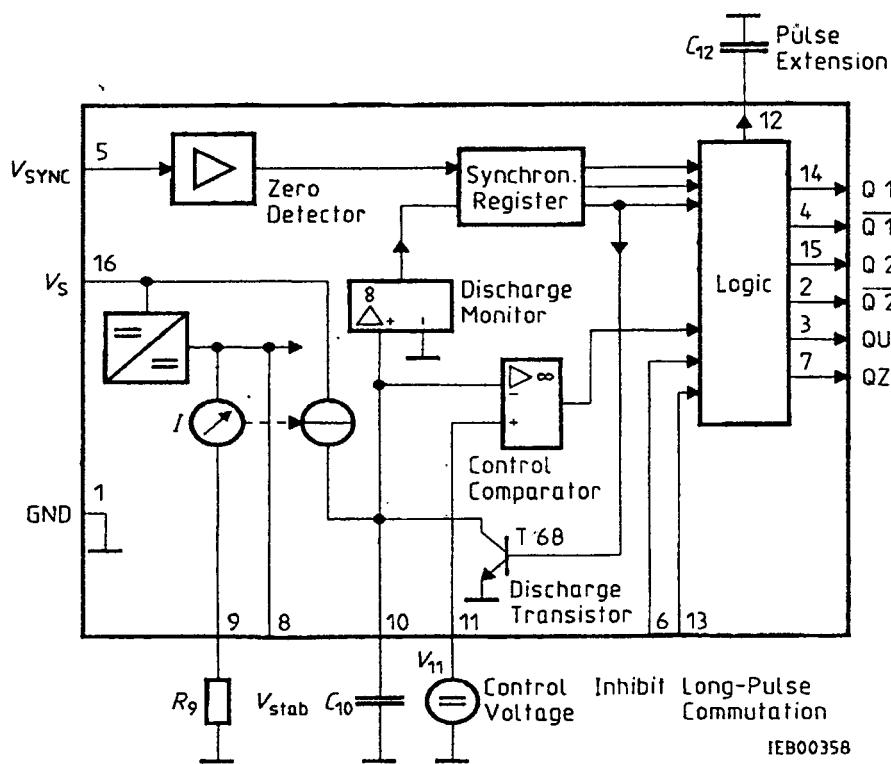
1. ชุด 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์
2. ชุดหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์
3. ชุดสมุดคิงรีแอคเตอร์

2.5.1 ชุด 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์

ในการสร้างชุด 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงนี้ ประกอบไปด้วย 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ สองชุดต่ออนุกรมกันดังรูปที่ 2.11 อุปกรณ์ที่ใช้เป็น SCR รุ่น 25R1A120 พิกัดแรงดัน 1200V และกระแส 25A ที่พิกัด ซึ่งมีรายละเอียดของ SCR ในภาคผนวก ค. โดยที่ 6 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ชุดบนต่ออยู่กับหม้อแปลงสตาร์/สตาร์และ 6 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ ชุดล่างต่ออยู่กับหม้อแปลงสตาร์/เดลต้า และเนื่องจากการต่อหม้อแปลงสตาร์/เดลต้า นี้เองทำให้เอาต์พุตของ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ชุดล่างมีแรงดันเฟสล่าหลัง 6 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ชุดบนอยู่ 30 องศา เนื่องจากต่อแบบ Dy1 จึงทำให้แรงดันค้ำดันคิซี ของชุด 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์มีขนาดเป็นสองเท่าของ 6 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ โดยจะกล่าวถึงโคจรละเอียดในบทที่ 3

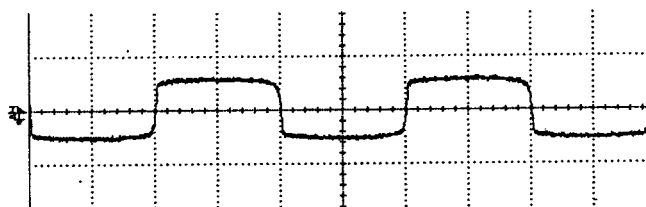
ในการควบคุมการนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์นี้ ได้ใช้ IC สำเร็จรูปเบอร์ TCA 785 เป็นชุดกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนอุปกรณ์ไทรสเตอร์ให้นำกระแส ซึ่งสามารถปรับมุมนำกระแสของ SCR ได้โดยการปรับแรงดันควบคุมคิซีที่ขา 11 ของ IC ตามรูปที่ 2.12 ในการควบคุมแรงดันคิซีที่ขา 11 ของ IC ใช้คอมพิวเตอรืในการควบคุม ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่ 4

โดยหลักการสร้างสัญญาณทริกเกจของ SCR เริ่มจากการทำให้ SCR ในวงจรคอนเวอร์เตอร์มีลำดับการทำงานให้ถูกต้องตามสัญญาณแรงดันเอชิจทางด้านอินพุท โดยการนำสัญญาณเอชิจที่ได้จากอินพุทมาลดทอนให้เท่ากับ ± 0.7 โวลท์เอชิจเข้าที่ขา 5 ของ IC ตามรูปที่ 2.13

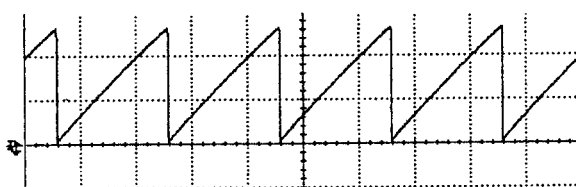


รูปที่ 2.12 วงจรการทำงานภายในของ IC TCA 785

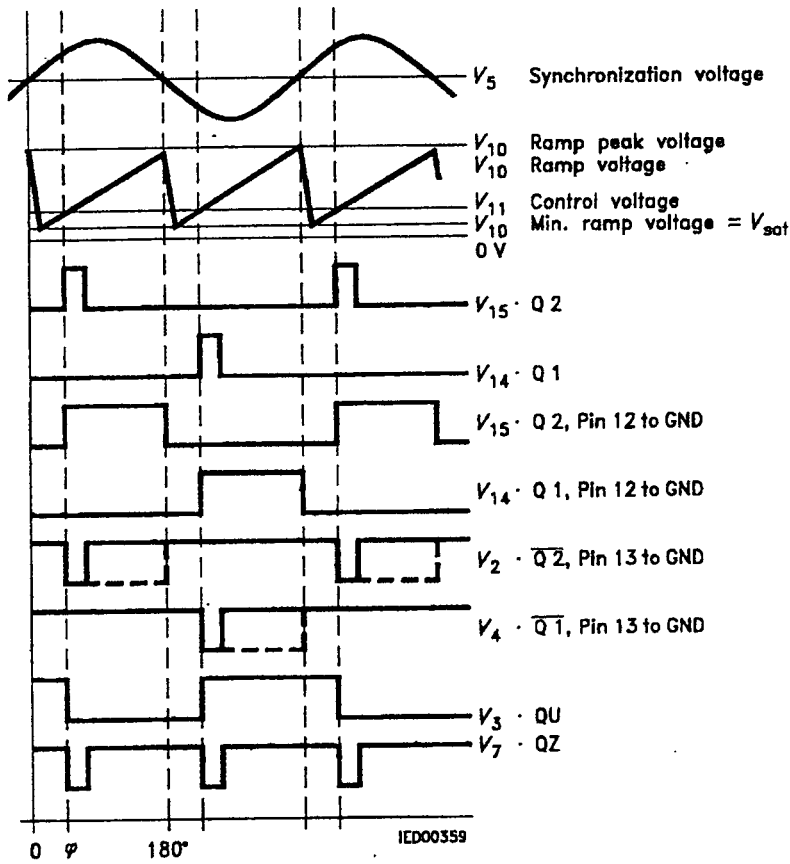
จากนั้นสัญญาณที่ได้จะผ่านวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์ไปยังส่วนของวงจรเชิงโครโมโซม จิตเตอร์ ซึ่งควบคุมการสร้างสัญญาณแรมพ์ที่เกิดจากการเก็บประจุของ C_{10} ด้วยกระแสคงที่ ซึ่ง กำหนดความชันของสัญญาณแรมพ์โดยการปรับตัวต้านทาน R_9 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขา 11 (Control Comparator) สัญญาณที่ขา 10 และ ขา 11 จะถูกนำไปสร้าง สัญญาณพัลส์เพื่อนำไปจุดชนวนทรานซิสเตอร์ โดยที่สัญญาณพัลส์ที่สร้างขึ้นจะถูกส่งออกที่ขา 14 และ 15 ของไอซีและมีมุมต่างเฟสกัน 180 องศา ตามรูปที่ 2.15 และในรูปที่ 2.13 เป็นสัญญาณเข้า ขา 5 ของ TCA-785 ซึ่งเป็นสัญญาณ Synchronize ผ่านไดโอดต่อกลับทิศ ซึ่งสัญญาณแรงดัน จะมี ลักษณะคล้ายสัญญาณซายน์ โดยสัญญาณนี้จะนำไปแปลงเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 สัญญาณแรงดัน Synchronize ที่ขา 5



รูปที่ 2.14 สัญญาณแรงดัน Ramp ที่ขา 10



รูปที่ 2.15 สัญญาณที่ขาต่างๆของ TCA 785

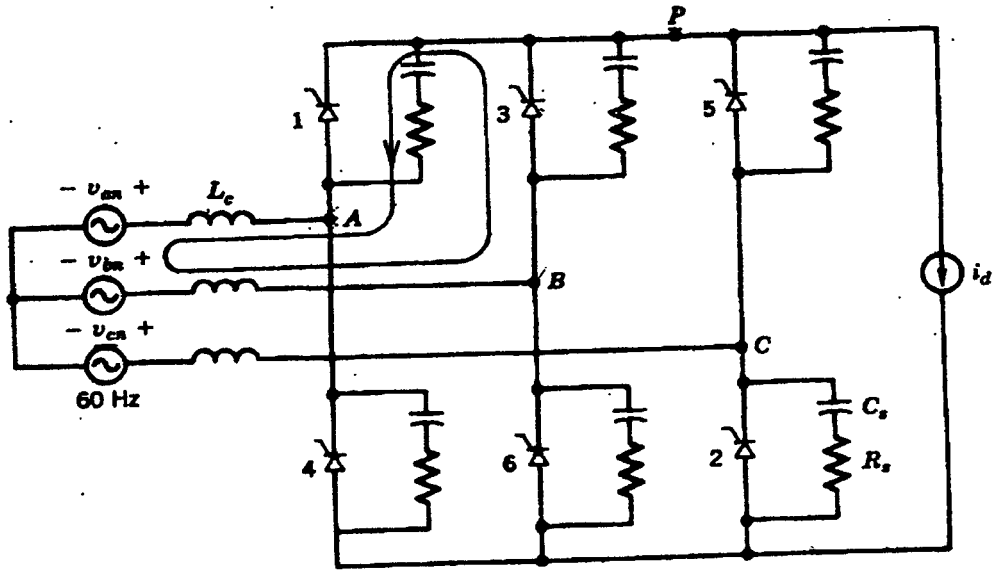
ในการควบคุมการนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ 1 ชุดจะใช้ TCA 785 ทั้งหมด 3 ชุดและทั้งหมดจะต้องเข้าห้อแปลงสัญญาณกระตุ้นเพื่อเพิ่มกระแสในการจุดชนวน ไทริสเตอร์

โดยวงจรที่ให้ในการออกแบบสัญญาณทริกของไทริสเตอร์เป็นแบบพัลส์คู่ ตามวงจรในภาคผนวก ง.

-การออกแบบชุดวงจรสับเบอร์ด

ในชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ไทริสเตอร์ในการสวิทซ์จึงจำเป็นต้องต่อชุดวงจรสับเบอร์ดโดยหน้าที่ของวงจรสับเบอร์ดสามารถแบ่งย่อยๆได้ดังต่อไปนี้

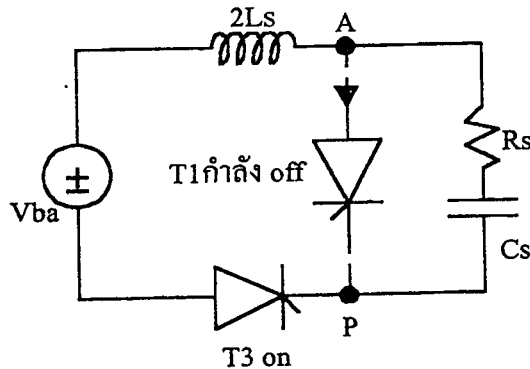
1. จำกัดแรงดันที่ตกคร่อมตัว ไทริสเตอร์ ในขณะที่เกิดสภาวะ turn-off transients
2. จำกัดกระแสที่จ่ายให้กับตัว ไทริสเตอร์ ในขณะที่เกิดสภาวะ turn-on transients
3. จำกัดอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส (di/dt) ในขณะที่เกิดสภาวะ turn-on
4. จำกัดอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดัน (dv/dt) ที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์ในขณะที่เกิดสภาวะ turn-off



รูปที่ 2.16 วงจรสับเบอร์

จากรูปที่ 3.2 ในบทที่ 3 แสดงการลำดับการทำงานของ SCR แต่ละตัวที่มุมทริก 60 องศา เมื่อพิจารณาทางด้านระบบเอซิจจะมี L_s ค่อกันกับแหล่งจ่ายอยู่ซึ่งก็คือค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงนั่นเองโดยที่ค่าอินดักแตนซ์นี้จะทำให้กระแสที่ไหลในระบบต่อเนื่อง ทำให้มีผลเสียคือ ไทริสเตอร์ไม่สามารถหยุดนำกระแสได้ในทันทีทันใด

ยกตัวอย่างเช่นรูปที่ 2.17 ในสภาวะที่ไทริสเตอร์เบอร์ 1 และ 2 ทำงาน จากนั้นในเวลาต่อมาจึงทริกให้ SCR เบอร์ 3 ทำงานที่มุม 30 องศาซึ่งจะเห็นได้ว่าก่อนที่ T1 จะหยุดนำกระแสและ T3 จะเริ่มนำกระแสจะทำให้ เกิดลูปวงจรตามรูปที่ 2.16 เมื่อพิจารณาในช่วงไทริสเตอร์ T1 หยุดนำกระแสจะเกิด มีแรงดันตกคร่อมอย่างรวดเร็วจึงจำเป็นต้องวงจรสับเบอร์หรือ ตัวเก็บประจุเพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อม T1 มากนักและกระแสที่ไหลย้อนกลับ ที่ผ่าน T3 ก็จะไม่ไหลผ่าน วงจรสับเบอร์ของ T1 แทน ตามรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การทำงานของ T1 ก่อนหยุดนำกระแส และ T3 ขณะเริ่มนำกระแส

จากรูปวงจรสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\text{จะได้ } X_C = \omega L_C = 0.05 \frac{V_{LL}}{I_d \sqrt{3}} \quad \Omega \quad (2.1)$$

เมื่อ V_{LL} คือ ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส ไลน์ทูไลน์
 I_d คือ ค่ากระแสโหลด

เราจะใช้ค่า C_s ที่สภาวะ Optimum เมื่อ $\omega t = 314$, ที่ 50Hz

$$\text{จะได้ } C_s = C_{base} (\mu F) = 0.6 \frac{I_d}{V_{LL}} \quad \mu F \quad (2.2)$$

$$\text{และจะได้ค่า } R = R_{opt} = \frac{20V_{LL}}{I_d} \quad \Omega \quad (2.3)$$

กำลังสูญเสียในวงจรสับเบอร์ สามารถคำนวณได้จาก

$$W_{SNUBBER} = 3C_s V_{LL}^2 \quad (2.4)$$

แทนค่าโดย $I_d = 3 \text{ A}$, $V_{LL} = 400 \text{ V}$

$$\text{จะได้ว่า } C_s = 0.6 \frac{I_d}{V_{LL}} = \frac{0.6(3)}{400} = 0.004 \mu F$$

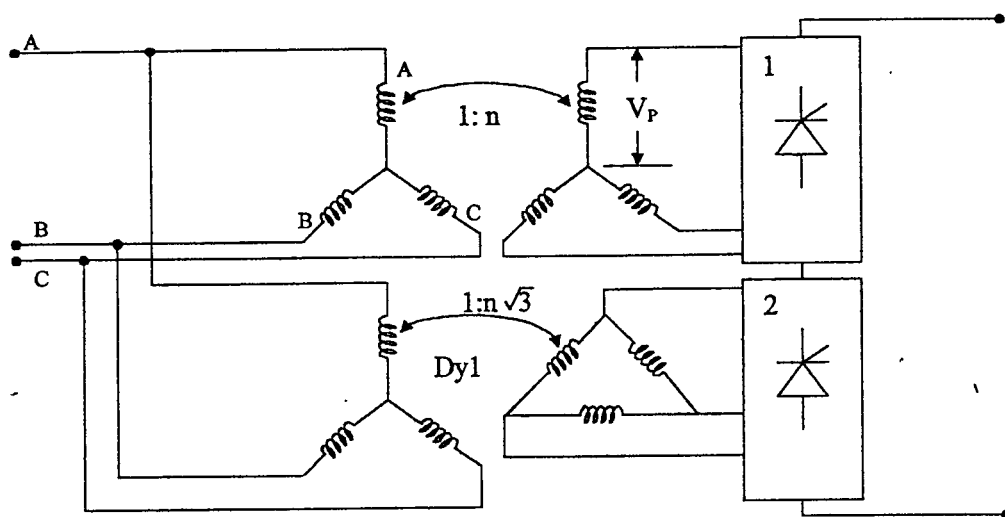
$$R = \frac{20V_{LL}}{I_d} = \frac{20(400)}{3} = 2,666 \quad \Omega$$

$$W = 3C_s V_{LL}^2 = 3(4 * 10^{-9}) (400)^2 = 1.92 \text{ mW}$$

2.5.2 หม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

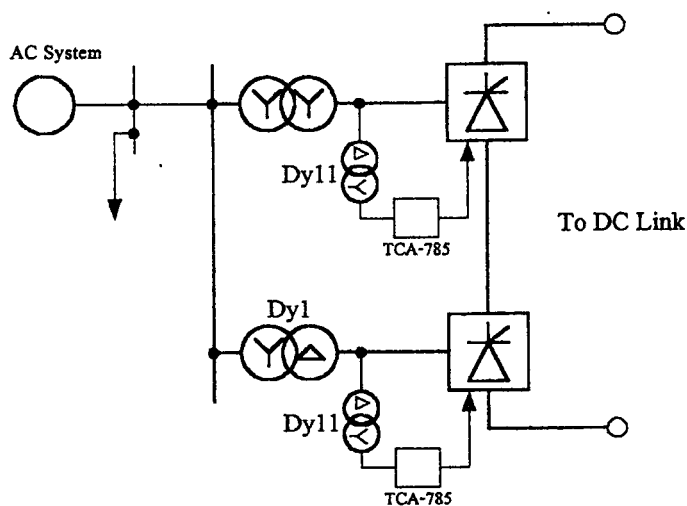
ในการต่อหม้อแปลงของระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาจากรูปคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 มีการต่อหม้อแปลงแบบสตาร์/สตาร์ โดยใช้หม้อแปลง 1 เฟส 3 ชุด แต่ละชุดมีขนาดพิกัด 1 kVA อัตราส่วน 1:2 และคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 มีการต่อแบบสตาร์/เดลต้าแบบ Dy 1 ซึ่งจะให้มีแรงดันเฟส

ทางด้านแรงต่ำล้าหลังทางด้านแรงดันสูงอยู่ 30 องศา โดยหม้อแปลงที่ใช้เป็นหม้อแปลง 1 เฟส 3 ชุด แต่ละชุดมีขนาดพิกัด 1 kVA อัตราส่วน $1:2\sqrt{3}$ จากรูปที่ 2.18 เนื่องจากในทางด้าน



รูปที่ 2.18 อัตราส่วนของการต่อหม้อแปลงแบบสตาร์/สตาร์ และสตาร์/เดลต้า

Secondary ของหม้อแปลงที่ต่อแบบ สตาร์มีแรงดัน $V_{LL} = \sqrt{3}V_p$ และแบบเดลต้ามีแรงดัน $V_{LL} = V_p$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการต่อหม้อแปลงแบบ สตาร์/เดลต้า จะมีแรงดัน V_{LL} น้อยกว่า การต่อหม้อแปลงแบบ สตาร์/สตาร์ อยู่ $\sqrt{3}$ เท่า ดังนั้นจึงออกแบบให้ อัตราส่วนของขดลวดในแต่ละเฟสที่มีการต่อแบบ สตาร์/สตาร์ มีอัตราส่วนเท่ากับ $1:n$ และ สตาร์/เดลต้า มีอัตราส่วนเท่ากับ $1:\sqrt{3}n$ จึงจะทำให้แรงดัน ทางด้าน Secondary มีขนาดเท่ากัน โดยกำหนดให้ n คืออัตราส่วนของแรงดันต่อเฟสของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ 2 เท่าโดยจะมีแรงดัน 3 เฟส $220V_{LL}/400V_{LL}$



รูปที่ 2.19 การต่อหม้อแปลงเลื่อนเฟส เข้าสู่ TCA-785

ซึ่งในการสร้างสัญญาณทริก SCR จำเป็นที่จะต้องเพิ่มชุดหม้อแปลงแรงดันต่ำ โดยต่อแบบ Dy11 ตามรูปที่ 2.19 เพื่อให้การควบคุมมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ สามารถนำกระแสได้ตั้งแต่ 0-180 องศา โดยแรงดันค้ำแรงต่ำของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ $30V_{LL}$ ซึ่งจะต่อเข้ากับชุด TCA-785 ที่ขา 5 โดยจะกล่าวถึงในบทต่อไป

2.5.3 สมูทติงรีแอกเตอร์ (Smoothing Reactor)

หน้าที่ของสมูทติงรีแอกเตอร์[2]

- 1) ป้องกันผลเนื่องมาจากการนำกระแสที่ผิดพลาดในขณะที่คอนเวอร์เตอร์ทำงานอยู่ โหมคของอินเวอร์เตอร์โดยการลดอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสในวงจรบริจ
- 2) ทำให้คลื่นระลอกเรียบขึ้น
- 3) ลดฮาร์โมนิกส์ของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง
- 4) จำกัดค่ายอดขของกระแสในวงจรเรกติฟายเออร์ที่เกิดจากการลัดวงจรในสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

โดยค่าของสมูทติงรีแอกเตอร์ที่ในการจำลองระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าเท่ากับ 800 mH

บทที่ 3

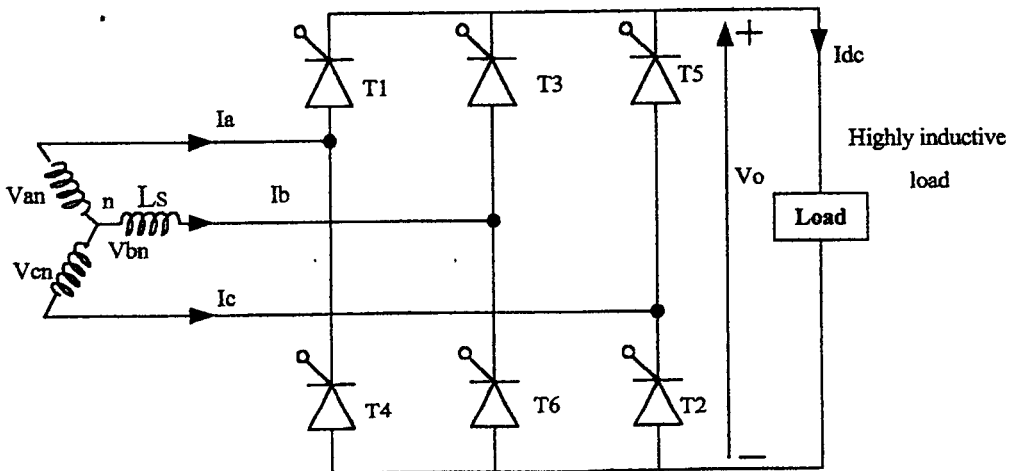
คอนเวอร์เตอร์ในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

3.1 บทนำ

ในการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรง สิ่งที่สำคัญในการแปลงระบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงหรือแปลงจากระบบไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับก็คือ ชุดคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งในการทำวิทยานิพนธ์นี้ใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส พูลคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้อุปกรณ์ไทรสเตอร์(SCR)เป็นอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่งตามรูปที่ 3.1 ในการทำงานของคอนเวอร์เตอร์นี้ สามารถทำงานได้สองสถานะคือสถานะเรกติฟายและสถานะอินเวอร์เตอร์โดยกระแสที่ไหลในวงจรสามารถไหลได้ทิศทางเดียว โดยในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์และ 12 พัลส์ รวมไปถึงผลกระทบต่างๆที่มีผลต่อระบบ อาทิเช่นผลกระทบจากฮาร์โมนิกส์และการพิคทีียนของรูปสัญญาณกระแสและแรงดันทางด้านระบบเอซี

3.2 คอนเวอร์เตอร์

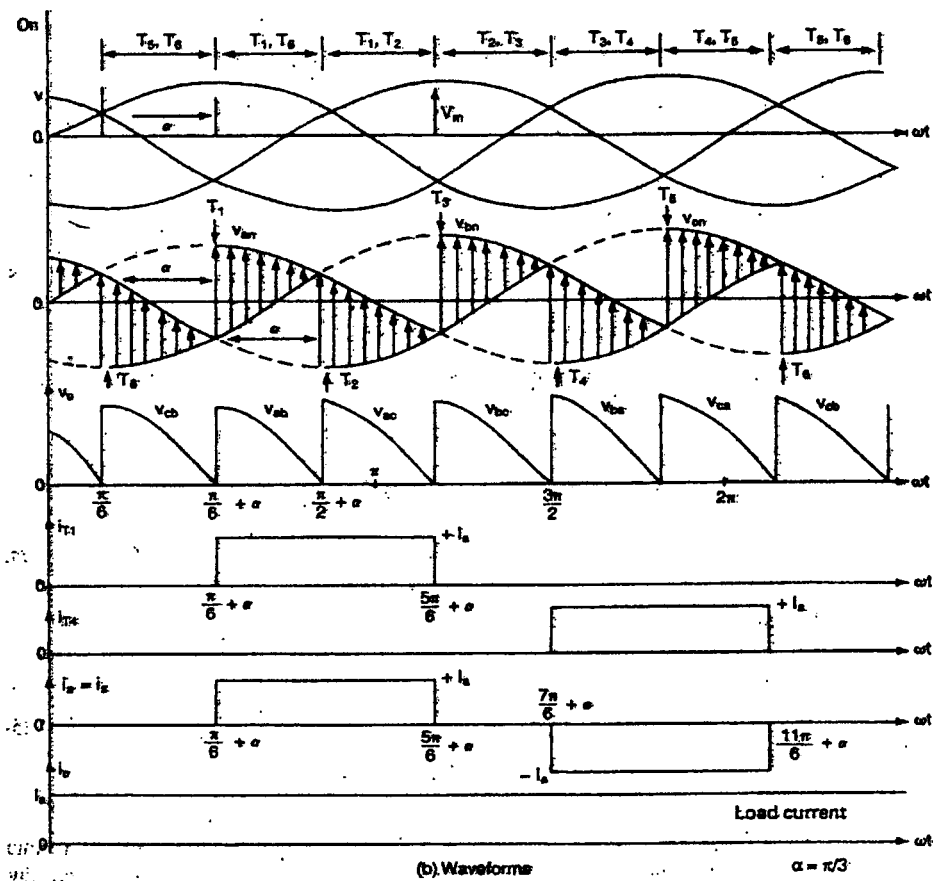
อันดับแรกจะพิจารณาที่ชุด 6 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ [5] ก่อน โดยสมมุติให้อินคักแทนซ์ในหม้อแปลง(L_s)มีค่าเท่ากับศูนย์และ I_{dc} คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สามเฟส 6 พัลส์ พูลคอนเวอร์เตอร์

ในการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์สามเฟส สามารถควบคุมการทำงานของไทรสเตอร์ได้สองสถานะการทำงานคือ สถานะเรกติฟายและสถานะอินเวอร์เตอร์ โดยที่การทำงานในสถานะ

เรคติไฟจะต้องปรับมุมนำกระแส (α) ของไทรสเตอร์อยู่ระหว่าง 0 องศาถึง 90 องศาและเมื่อต้องการให้คอนเวอร์เตอร์นี้ทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์จะต้องปรับมุมนำกระแส (γ) ไทรสเตอร์ที่มุมระหว่าง 90 องศาถึง 180 องศา ซึ่งจากรูปที่ 3.1 สามารถนำมาเขียนลำดับการทำงานของไทรสเตอร์ได้ดังต่อไปนี้คือ พิจารณาเมื่อจุดชนวนให้ไทรสเตอร์นำกระแสที่มุม 60 องศา โดยจ่ายแรงดันกระแสสลับตามเฟสให้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ในสถานะแรก แรงดันที่เฟสจะเป็นบวกและแรงดันเฟสบีเป็นลบ ทำให้ไทรสเตอร์ T1และT6นำกระแส ในเวลาต่อมาแรงดันเฟสเอเป็นบวกและแรงดันเฟสซีเป็นลบทำให้ไทรสเตอร์ T1และT2นำกระแส ซึ่งสามารถสรุปการทำงานของไทรสเตอร์ต่อไปเป็นคู่ๆ ดังนี้คือ 32,34,54,56,16,12 ตามรูปการทำงานที่ 3.2



รูปที่3.2 ลำดับการทำงานของไทรสเตอร์ที่มุมทริก 60 องศา

โดยเมื่อต้องการหา แรงดันเอาต์พุตที่สามารถพิจารณาจากรูปสัญญาณ V_{DC} ที่เกิดจากคู่ของไทรสเตอร์คู่ใดคู่หนึ่งก็ได้ ยกตัวอย่างเช่น ไทรสเตอร์ T1 กับ T6 ซึ่งมีแรงดัน V_{ab} จ่ายให้กับโหลดและพื้นที่ใต้กราฟของแรงดันอยู่ในช่วง $(\pi/6 + \alpha) \leq \omega t \leq (\pi/2 + \alpha)$ และสามารถนำค่าต่างๆเขียนเป็นสมการ

โดยแรงดัน Line-Neutral หาได้จาก

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_m \sin \omega t \\ V_{bn} &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{cn} &= V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

และแรงดัน Line-to-Line

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{an} - V_{bn} = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \\ V_{bc} &= V_{bn} - V_{cn} = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \\ V_{ca} &= V_{cn} - V_{an} = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

แรงดันทางด้านดิวตี้หาได้โดยไม่คิดผลกระทบจากอินดักแตนซ์ในหม้อแปลง (L_S)

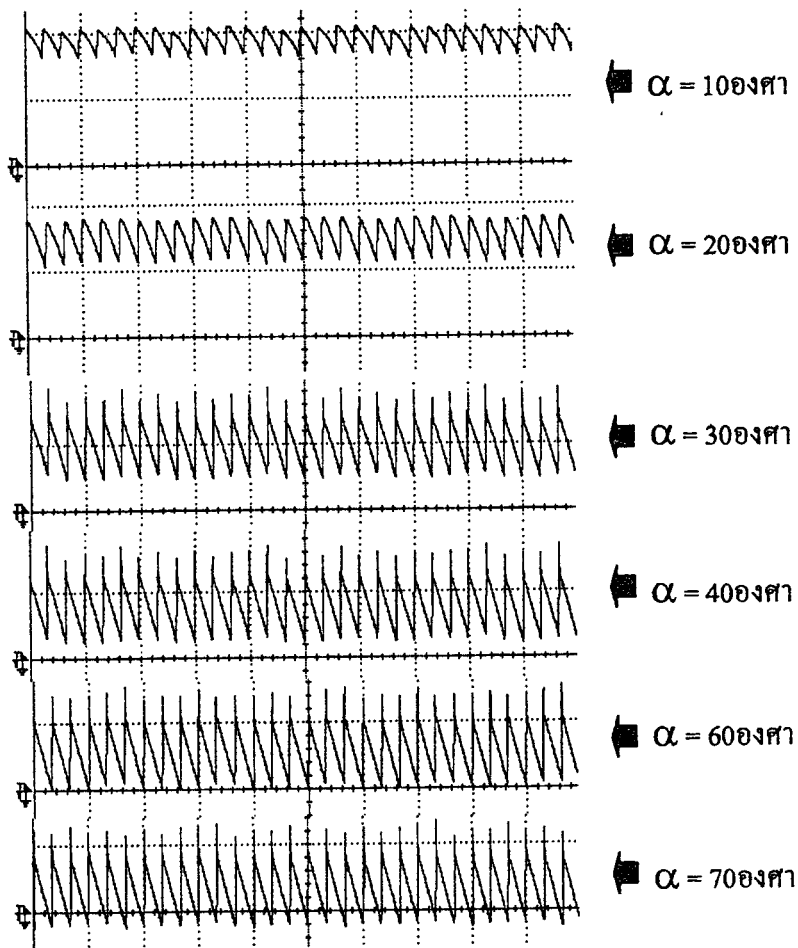
$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} V_{ab} d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t) \\ &= 3 \frac{\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha \end{aligned}$$

$$\text{หรือ} \quad V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha \quad (\text{ไม่คิดอินดักแตนซ์ในหม้อแปลง } (L_S)) \quad (3.3)$$

3.3 แรงดันด้านระบบดิวตี้ 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์

ในการทดสอบระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง[6] ใช้ระบบ Monopolar Link ตามรูปที่ 2.2 ในบทที่ 2 ในการปรับมุมการนำกระแส ไทริสเตอร์ตั้งแต่ 0-180 องศา พบว่าเมื่อปรับมุมนำกระแสมากขึ้นแรงดันทางด้านดิวตี้ถูกคิดลบมากขึ้นตามรูปที่ 3.3 นั้นหมายความว่าขณะที่มุมนำกระแสมากขึ้น 90 องศา คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์และมีการส่งคืนกำลังงานไฟฟ้ากลับไปยังด้านระบบเอซี โดยที่ มุม γ ของการทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 180 องศา ลบกับ มุมการนำกระแส ในสภาวะเรกติฟาย Delay angle(α) ซึ่งจะให้แรงดันด้านดิวตี้คิดลบมากที่สุด

สุด โดยทั่วไปมุมนำกระแสทางด้านอินเวอร์เตอร์จะใช้สัญลักษณ์ γ (Extinction angle) และความถี่ของสัญญาณทางด้านเอาต์พุตจะมีค่าของริปเปิลเท่ากับ 12 เท่าของความถี่ทางด้านอินพุต (50Hz)



รูปที่ 3.3 สัญญาณแรงดันทางด้านดิซีส 12 พัลส์ ขณะปรับมุมการนำกระแส 10 ถึง 70 องศา

โดยแรงดันดิซีสของชุด 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ ได้จากการนำแรงดันของชุด 6 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ มารวมกันตามสมการที่ 3.4 [4]

$$V_{DC} = V_{DCY} + V_{DCA} = \frac{3\sqrt{2}V_{L-L}}{\pi} \cos\alpha + \frac{3\sqrt{2}V_{L-L}}{\pi} \cos\alpha = \frac{6\sqrt{2}V_{L-L}}{\pi} \cos\alpha$$

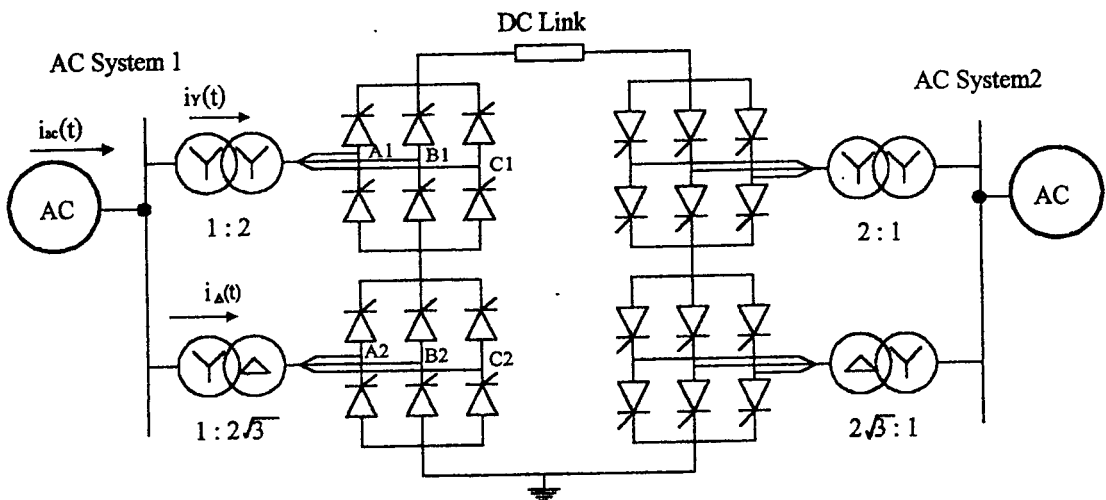
หรือ

$$V_{DC} = 2.7V_{LL} \cos\alpha \quad (3.4)$$

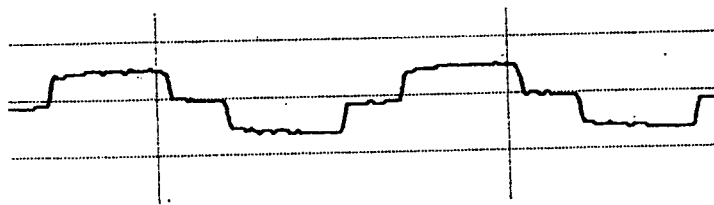
3.4 กระแสด้านเอซี (Input Line Current)

จากรูปที่ 3.4 วงจรชุด 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ พิจารณาสัญญาณกระแสทางด้านระบบเอซี ในขณะที่มีการต่อหม้อแปลงแบบสตาร์/สตาร์จะมีรูปสัญญาณเป็น Quasi Step ดังรูปที่ 3.5 และสัญญาณกระแสทางด้านระบบเอซี ในขณะที่มีการต่อหม้อแปลงแบบสตาร์/เดลต้าจะมีรูปสัญญาณเป็น 6- Step ดังรูปที่ 3.6 และกระแสรวมทั้งระบบจะได้เป็น 12-Step ตามรูปที่ 3.7 เราสามารถวิเคราะห์สัญญาณกระแส สาร์โมนิคส์ต่างๆ โดยใช้ อนุกรมฟูเรียร์จากสมการ 3.5

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (3.5)$$



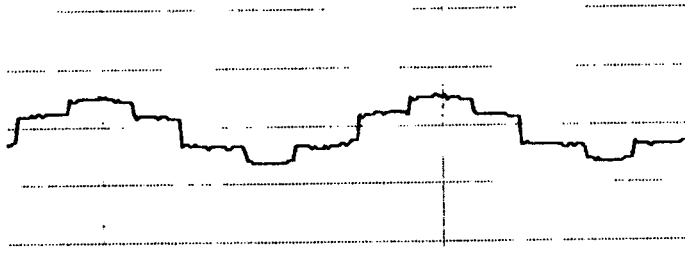
รูปที่ 3.4 วงจรรวมของระบบHVDCที่ใช้ชุด 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.5 สัญญาณกระแสหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์/สตาร์

สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์/สตาร์ รูปสัญญาณที่ได้เป็น Quasi step สามารถวิเคราะห์หาค่าของกระแสที่ไหลได้ดังสมการที่ 3.6[6]

$$i_Y(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \dots \right) \quad (3.6)$$

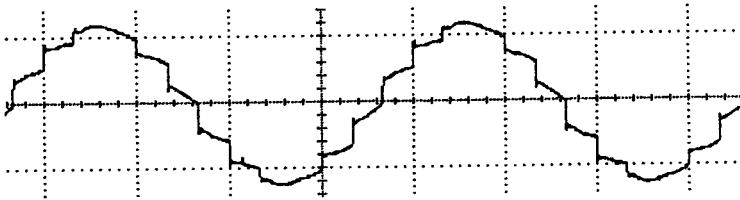


รูปที่ 3.6 สัญญาณกระแสหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์/เดลต้า

สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์/เดลต้า สามารถวิเคราะห์หาค่าของกระแสที่ไหลได้ดังสมการที่ 3.7[4]

$$i_{\Delta}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \dots \right) \quad (3.7)$$

กระแสรวม 12 พัลส์ สามารถวิเคราะห์หาค่าของกระแสที่ไหลได้ดังสมการที่ 3.8[4]

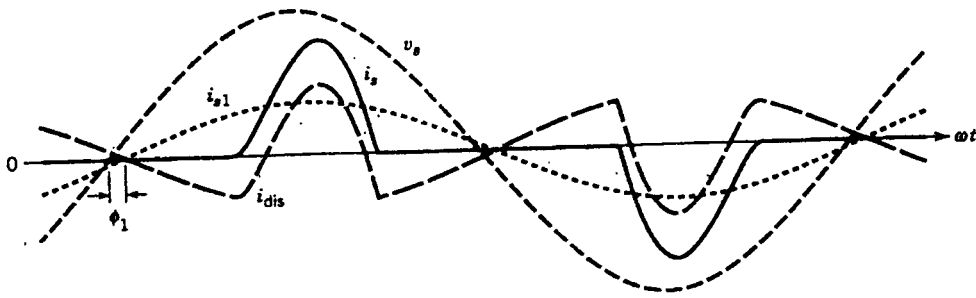


รูปที่ 3.7 สัญญาณกระแสกระแสรวม 12 พัลส์

$$i_{ac}(t) = i_Y(t) + i_{\Delta}(t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t \dots \right) \quad (3.8)$$

3.5 ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

เพาเวอร์แฟคเตอร์เป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการนำกำลังไฟฟ้ามาใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้กับระบบหรือสามารถนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริง (Real power, P) ต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power, S) ในกรณีที่มีกระแสและแรงดันทางด้านอินพุทของระบบเป็นรูปสัญญาณไซน์ (Sinusoidal) สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 3.9



รูปที่ 3.8 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ไม่เป็นสัญญาณซายน์

$$\text{Power factor} = \frac{P}{S} \quad (3.9)$$

และในกรณีที่สัญญาณกระแสทางด้านอินพุทไม่เป็นสัญญาณซายน์(Nonsinusoidal) ตามรูปที่ 3.8 เราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงได้จาก

$$P = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} P(t) dt = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} v_s(t) i_s(t) dt \quad (3.10)$$

เมื่อ T_1 = คาบเวลาที่ความถี่ 50Hz

$P(t)$ = กำลังไฟฟ้าจริง

และถ้าสัญญาณแรงดันเป็นสัญญาณซายน์เราสามารถหาค่า v_s ได้จาก

$$v_s = \sqrt{2} V_s \sin \omega t$$

เนื่องจากกระแสทางด้านอินพุท(i_s)เกิดการบิดเพี้ยน(Distortion)ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบของกระแสออกเป็นสองส่วนคือกระแส Fundametal(i_{s1}) หรือ Line frequency(f_1) และองค์ประกอบกระแสฮาร์โมนิกส์(i_{sh}) โดยที่ h ความถี่ของฮาร์โมนิกส์เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลัก $f_h = hf_1$

$$i_s(t) = i_{s1}(t) + \sum_{h \neq 1} i_{sh}(t) \quad (3.11)$$

สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$i_s(t) = \sqrt{2}I_{s1} \sin(\omega_1 t - \phi_1) + \sum_{h \neq 1} \sqrt{2}I_{sh} (\sin \omega_h t - \phi_h) \quad (3.12)$$

เมื่อให้ ϕ_1 เป็นมุมต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันอินพุตที่เป็นสัญญาณขาเข้าซึ่งจากสมการที่ 3.10 และ 3.12 สามารถเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าจริงได้จาก

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \sqrt{2}V_s \sin \omega_1 t \cdot \sqrt{2}I_{sh} \sin(\omega_1 t - \phi_1) dt \\ &= V_s I_{s1} \cos \phi_1 \end{aligned} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.9 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$PF = \frac{V_s I_{s1} \cos \phi_1}{V_s I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \phi_1 \quad (3.14)$$

สามารถหาค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ในกรณีกระแสที่ไม่เป็นขาเข้าได้จาก

$$PF = \frac{I_{s1}}{I_s} DPF \quad (3.15)$$

โดยที่ $DPF = \cos \phi_1$ โดยย่อมาจาก Displacement power factor

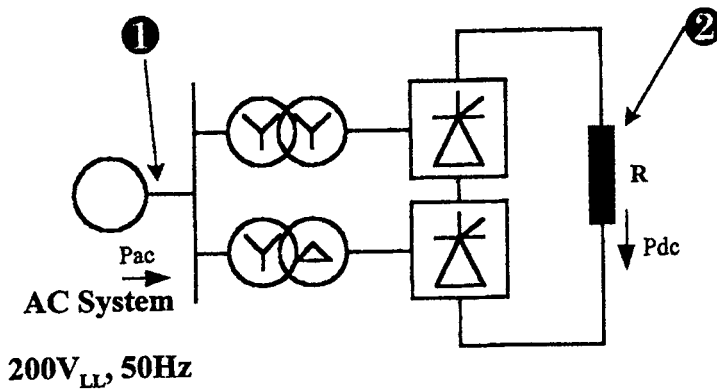
และ

$$\%THDi = 100 * \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{I_{sh}}{I_{s1}} \right)^2} \quad (3.16)$$

3.6 การทดสอบชุดคอนเวอร์เตอร์

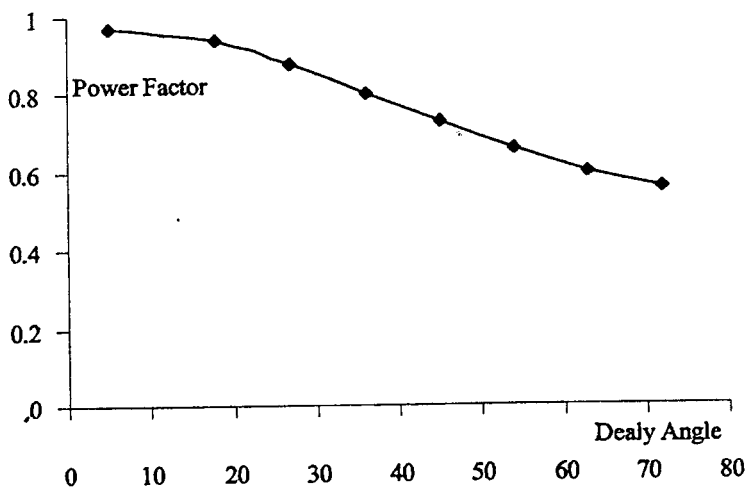
จากการทดสอบชุด 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ โดยการต่อโหลดทางด้านระบบดีซี โดยการต่อโหลดเป็นค่าความต้านทาน (โหลดไฟ) ตามรูปที่ 3.9 กำหนดให้กระแสดีซีที่พิกัดมีค่าไม่เกิน 1A และแรงดันเอซีเท่ากับ 200V_{LL}, 50Hz โดยมีลำดับขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ปรับมุมนำกระแส α เพิ่มขึ้นจาก 0 องศา
2. บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าด้านเอซีและดีซี
3. บันทึกค่า %THDi และ %THDv

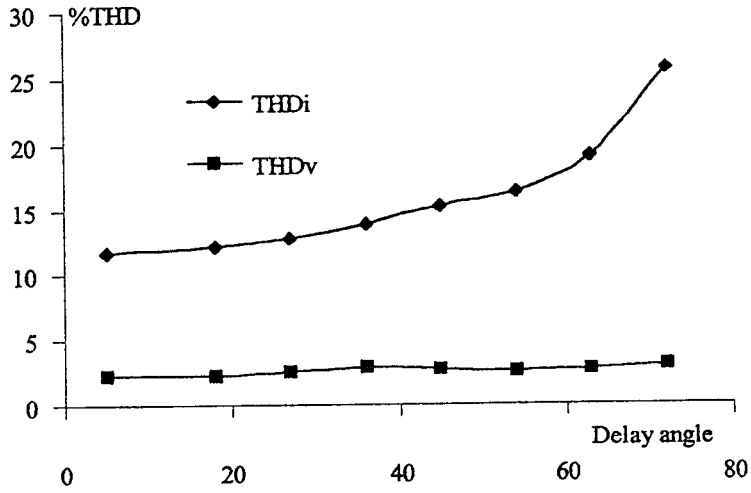


รูปที่ 3.9 วงจรทดสอบชุดคอนเวอร์เตอร์ในสถานะเรกติไฟ

เมื่อทำการทดสอบโดยให้แรงดันคงที่ที่ $200V_{LL}$ ความถี่ $50Hz$ และทำการปรับมุมนำกระแสตั้งแต่ 0 จนถึง 70 องศา โดยคงค่าโหลดคงที่ โดยผลการทดสอบแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก. ตารางที่ ผ.3.1 ซึ่งผลจากการทดสอบเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบตามรูปที่ 3.10 มีค่าต่ำลงเนื่องจากรูปสัญญาณกระแสในระบบผิดเพี้ยนและมุมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามสมการที่ (3.16) และเมื่อปรับมุมนำกระแสให้มียุคมากขึ้นพบว่า %THDi มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงดัน ด้านคิซิมี่ค่ารีปเปลสูงขึ้นตามรูปที่ 3.3 เป็นผลจากการทดสอบเมื่อปรับมุมนำกระแสมากขึ้น ทำให้รูปสัญญาณกระแสทางด้านเอซิมี่การผิดเพี้ยนไปจากรูป 12 Step จึงทำให้ค่า %THDi สูงขึ้นตามรูปที่ 3.11 และเมื่อปรับมุมนำกระแสมากขึ้นแต่ช่วงเวลาดำเนินการนำกระแสของ SCR ยังเท่ากับ 120 องศาเหมือนเดิม จากรูปที่ 3.13 เป็นรูปสัญญาณกระแสที่ได้จากการทดสอบที่มุมนำกระแส 0 องศาและ 70 องศาจะเห็นได้ว่าที่รูป (ข) สัญญาณกระแสผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณขาเข้าไปมากจากเหตุผลดัง

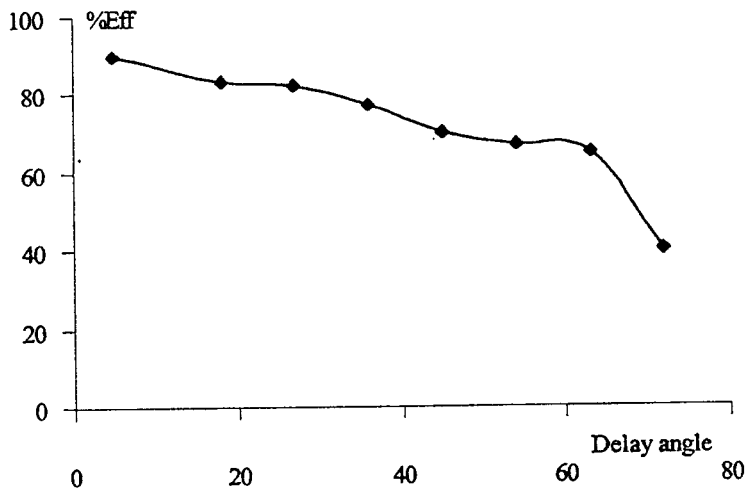


รูปที่ 3.10 กราฟเพาเวอร์แฟคเตอร์เมื่อปรับมุมนำกระแสมากขึ้น(จุดที่ 1)

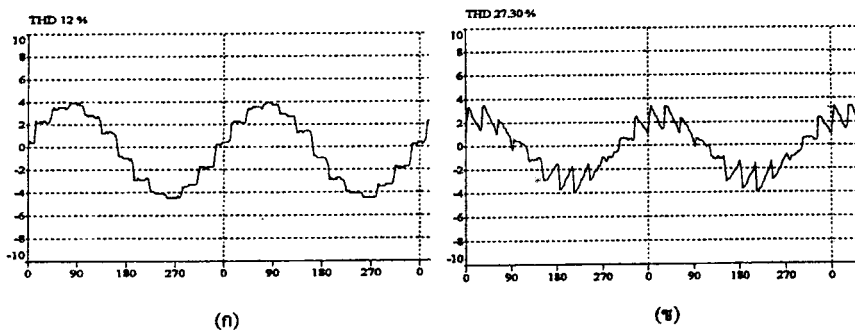


รูปที่ 3.11 กราฟ %THD ขณะปรับมุมนำกระแส(จุดที่ 1)

กล่าวทำให้ค่าประสิทธิภาพของระบบมีค่าต่ำลงเมื่อปรับมุมนำกระแสมากขึ้น ในการทดสอบจะเห็นว่าค่า %THDv ในระบบสูงขึ้นเล็กน้อยซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.12 ประสิทธิภาพขณะปรับมุมนำกระแส(α)มากขึ้น



รูปที่ 3.13 สัญญาณกระแส (I_a) (ก)มุม $\alpha = 0$ องศา (ข) มุม $\alpha = 70$ องศา

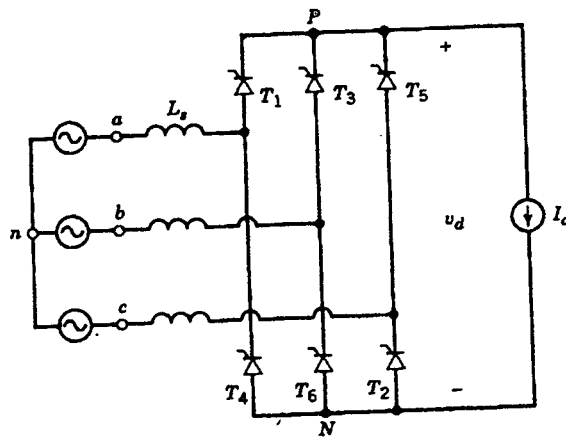
จากรูปที่ 3.13 สัญญาณกระแส (I_L) ในรูป (ข) มีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนจากรูป (ก) เนื่องจากจากรูปร่างของกระแสทางด้านดีซีมีลักษณะคล้ายสัญญาณแรงดันดีซีเมื่อมีมุมนำกระแสเปลี่ยนไป ซึ่งในวงจรคอนเวอร์เตอร์กระแสในระบบเอซีจะเป็นอันเดียวกันกับกระแสดีซี จะทำให้รูปร่างของสัญญาณเปลี่ยนไปจากเดิมที่มีมุมนำกระแส 0 องศา

3.7 ผลกระทบอินดักแตนซ์ด้านระบบเอซี (L_S)

โดยปกติทั่วไปทางด้านระบบเอซีจะมี ค่าอินดักแตนซ์ที่แฝงอยู่ในหม้อแปลงดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งค่า L_S โดยประมาณ ไม่เกิน 5% ของความต้านทานทั้งหมด

$$\omega L_S \geq 0.05 \frac{V_{LL}/\sqrt{3}}{I_{S1}} \quad (3.17)$$

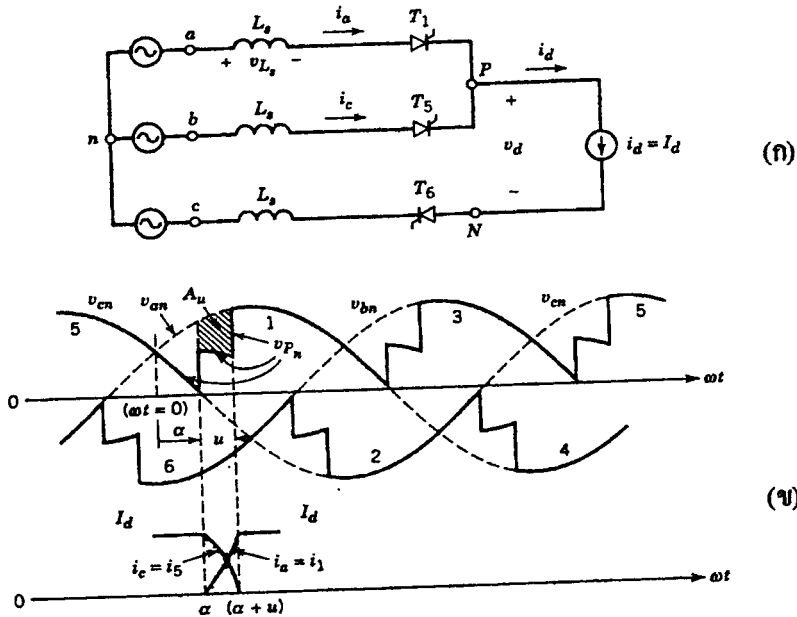
เมื่อพิจารณาช่วงการหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์ที่แสดงตามรูปที่ 3.2 โดยลำดับการทำงานของไทรสเตอร์เริ่มจาก T5 กำลังจะหยุดนำกระแสและในขณะเดียวกัน T1 กำลังจะเริ่มนำกระแสโดยที่ T6 นำกระแสอยู่ตลอด จะมีผลของ L_S เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งด้วยคั้งรูป 3.15(ก) มีผลทำให้แรงดันเอาต์พุตลดน้อยลงไปเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของ A_U และช่วงเวลา หยุดนำกระแสของ T5 ใช้เวลานานมากขึ้นเท่ากับ $\alpha+U$ และช่วงเวลานำกระแสของ T1 เท่ากับ $\alpha+U$ โดยที่ ช่วงเวลาการ



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายที่มี L_S ต่อกับชุดคอนเวอร์เตอร์

คอมมิวเตชันจะเท่ากับ $\alpha < \omega t < \alpha + U$ จากรูปที่ 3.15(ข) ซึ่งทำให้เกิดผลเสียกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากถ้าค่า L_S มีค่ามากๆ ทำให้เกิดการถ่วงวงจรขึ้นได้และแรงดันทางด้านดีซีลดน้อยลงอีกทั้งยัง

ทำให้ค่า %THD_v ของระบบสูงขึ้นดังรูปที่ 3.15 เป็นการแสดงผลกระทบของ L_S ที่มีต่อระบบ โดยสามารถคำนวณค่า A_U ได้จากสมการ 3.19



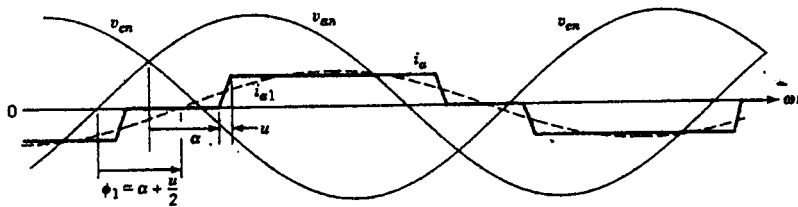
รูปที่ 3.15 ช่วงเวลาหยุดนำกระแสที่มีผลมาจาก L_S

จากรูป 3.15(ก) สามารถเขียนสมการ KVL เพื่อหา V_{Pn} ได้จาก

$$V_{Pn} = V_{an} - V_{Ls}$$

โดยที่

$$V_{Ls} = L_S \frac{di_a}{dt} \tag{3.18}$$



รูปที่ 3.16 กระแสด้านเอซที่มีผลกระทบจาก L_S

ในรูปที่ 3.16 เมื่อในระบบมีผลของ L_S เกิดขึ้นจะทำให้ช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงของสัญญาณกระแส มีค่าเวลามากขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดมุม Over Lap ขึ้นตามที่อธิบายไว้ข้างต้น จากรูปที่ 3.14 (ข) สามารถหาพื้นที่ A_U ได้ตามสมการ

$$A_u = \int_{\alpha}^{\alpha+u} V_{L_s} d(\omega t) \quad (3.19)$$

และจากสมการที่ 3.18 แทนลงในสมการ 3.19 โดยแบ่งช่วงเวลา $\omega t = \alpha$ ถึง $\omega t = \alpha + u$ จะได้

$$A_u = \omega L_s \int_{\alpha}^{\alpha+u} di_a = \omega L_s I_d \quad (3.20)$$

สามารถหาแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยได้จาก

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha - \frac{3\omega L_s}{\pi} I_d \quad (\text{กรณี 6 พัลส์}) \quad (3.21)$$

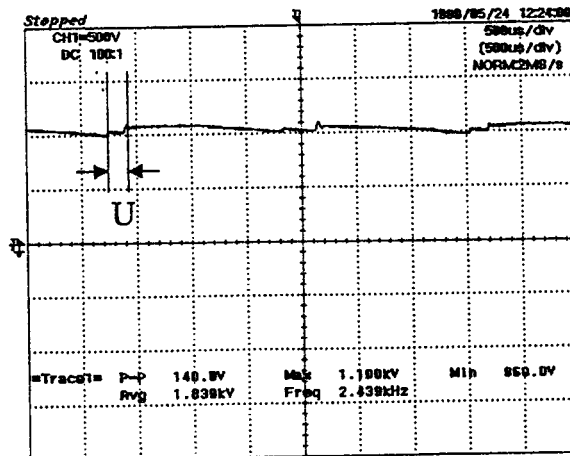
$$V_d = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha - \frac{6\omega L_s}{\pi} I_d \quad (\text{กรณี 12 พัลส์})$$

โดยความสัมพันธ์ของค่า Over Lap สามารถหาได้จาก

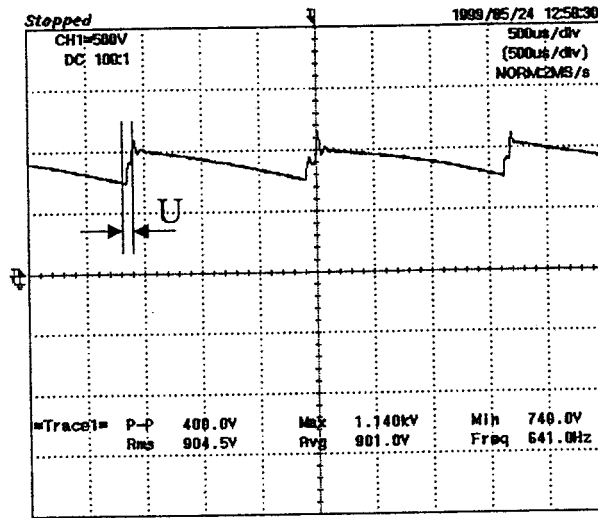
$$\cos(\alpha + u) = \cos \alpha - \frac{2\omega L_s}{\sqrt{2}V_{LL}} I_d \quad (3.22)$$

3.8 ผลการทดสอบ Over Lap

จากผลการทดสอบการปรับมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์พบว่าเมื่อปรับมุมนำกระแสมากขึ้นทำให้ค่าของ ช่วงเวลาหุคนำกระแส (U) มีค่าน้อยลง จากสมการที่ 3.22 พบว่า

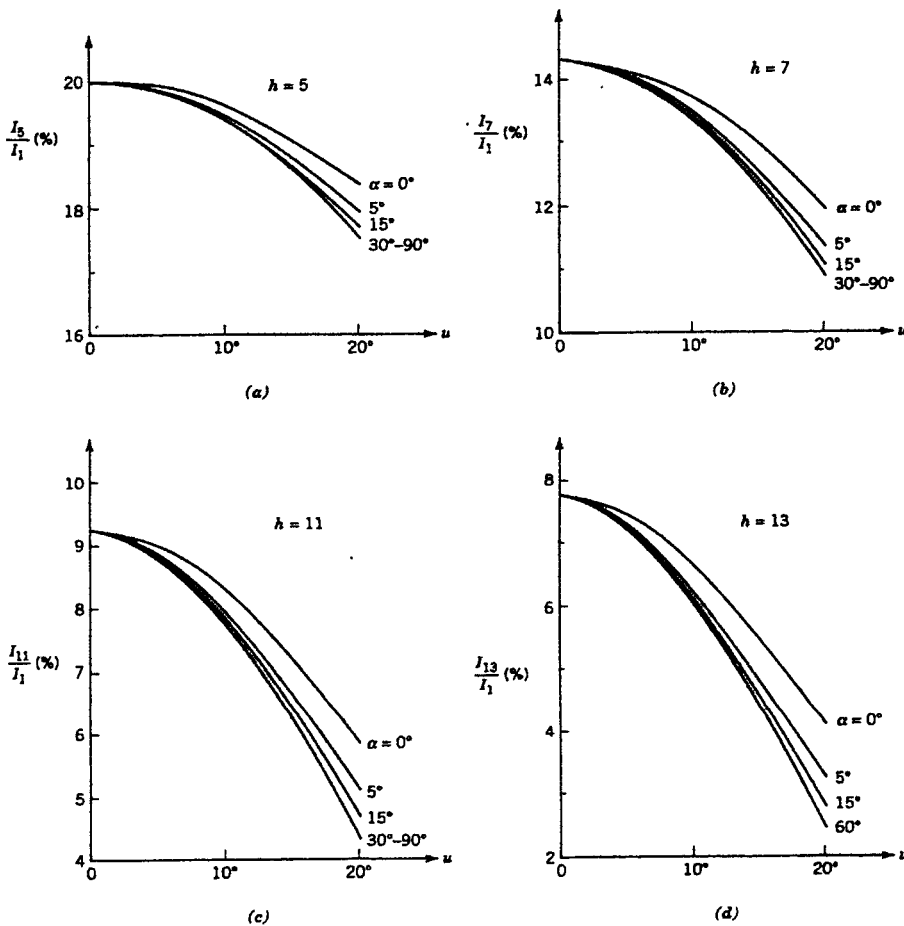


รูปที่ 3.17 ช่วงเวลา Over Lap ที่มุม $\alpha = 0$ องศา



รูปที่ 3.18 ช่วงเวลา Over Lap ที่มุม $\alpha = 50$ องศา

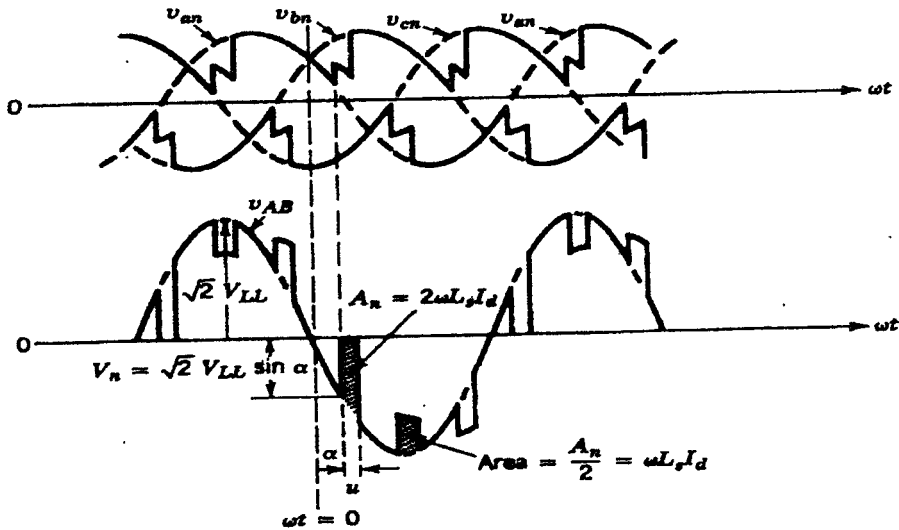
ช่วงเวลาของ Over Lap ขึ้นอยู่กับมุมนำกระแสและกระแสทางด้านดีซี โดยที่ I_u มีค่ามาก A_u ก็จะมีค่ามากตาม จากรูป 3.17 ถ้ามุมนำกระแสต่ำ ค่า A_u ก็จะมีค่ามากและรูป 3.17 มุมนำกระแส มากพื้นที่ใต้กราฟ A_u ก็จะมีค่าต่ำตามรูปที่ 3.18 ซึ่งจะเป็นไปตามสมการที่ 3.20



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ของ %THDi กับค่าการเปลี่ยนแปลงมุม Over Lap

โดยจากรูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าของมุม Over Lap มีค่ามากขึ้นทำให้ %HDI ลดน้อยลงเนื่องมาจากแอมพลิจูดของกระแส Fundametal ลดต่ำลง

และจากช่วงเวลาหยุดนำกระแสที่มากขึ้นทำให้เกิดลัทธิควเจอร์ ระหว่างที่ไทรสเตอร์หยุดนำกระแสของเฟส A และเฟส B ทำให้เกิด Deep notches 2 ครั้งในครึ่งไซเคิลเกิดบวกของ V_{AB} ตามรูปที่ 3.20 โดยสามารถหาค่า A_U ได้จาก $2V_{Ls} = A_U = 2\omega L_s I_d$



รูปที่ 3.20 การเกิด Line Notching ของสัญญาณแรงดัน 6 พัลส์

3.9 การทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์

ในการทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์จะต้องปรับ Extinction angle γ ให้อยู่ระหว่าง 90° - 180° โดยที่ มุม extinction angle γ สำหรับอินเวอร์เตอร์กำหนดอยู่ในเทอม α และ U สามารถเขียนสมการได้เป็น $\gamma = 180^\circ - (\alpha + U)$ เมื่อ α คือมุม delay angle (ทางด้านเรกติไฟาย) และ U คือการ comutation ของมุม Over lap และแรงดันด้านอินพุตคิซิกของชุดอินเวอร์เตอร์หาได้จาก

$$V_{dc} = 2.7V_{LL} \cos \gamma - \frac{6\omega L_s}{\pi} I_d \quad (12 \text{ Pulse}) \quad (3.23)$$

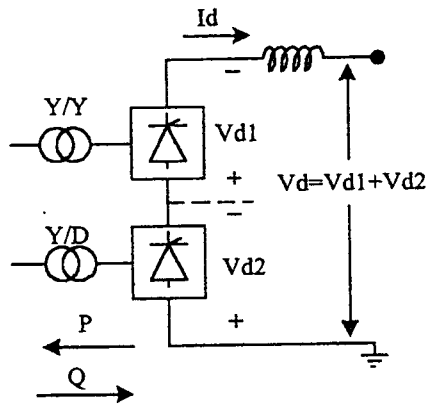
ในการทำงานของสถานะอินเวอร์เตอร์นี้ ทำให้ทางด้านระบบเอซีมีกระแสล้าหลังแรงดันเฟสมากกว่า 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.22 จึงจะสามารถทำให้กำลังไฟฟ้าผ่านไปยังด้านระบบเอซีได้ โดยชุดคอนเวอร์เตอร์ต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อให้ $L_s = 0$

$U = 0$ ในสมการที่ และ $\gamma = 180^\circ - (\alpha)$ สามารถเขียนสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ดังสมการดังต่อไปนี้

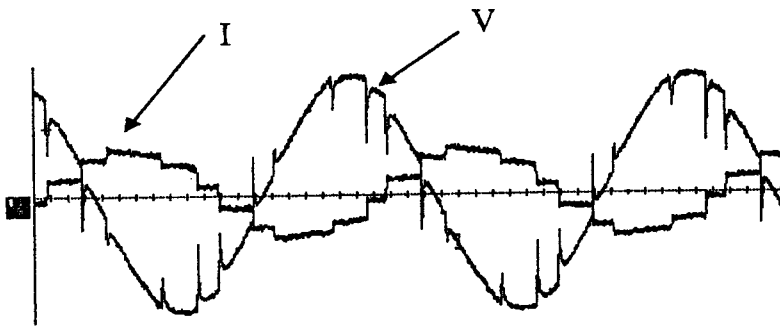
$$Q_1 = 2.7V_{LL}I_d \sin \gamma \quad (3.24)$$

และสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงได้จากสมการที่ 3.25.

$$P_{d1} = 2.7V_{LL}I_d \cos \gamma \quad (3.25)$$



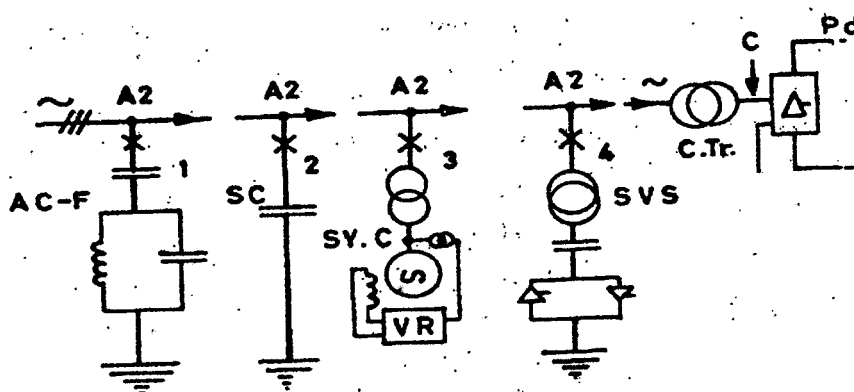
รูปที่ 3.21 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.22 แรงดัน V_p และกระแส I_p ในโหมดอินเวอร์เตอร์

ในการเริ่มเข้าสู่สภาวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปการปรับมุมนำกระแสจะต้องเริ่มปรับตั้งแต่มุม 90 องศาเพิ่มขึ้นไปจนถึงมุม 180 องศา จะเห็นว่าแรงดันทางด้านระบบคิซีจะมีค่าคิดลบมากขึ้นเมื่อมีการปรับมุมนำกระแสสูง ซึ่งในการส่งกำลังไฟฟ้าจะต้องปรับมุมนำกระแสทางด้านอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าแรงดันต่ำกว่าทางด้านเรกติฟายเสมอ จึงจะสามารถส่งกำลังไฟฟ้าจากค่านเรกติฟายไปยังอินเวอร์เตอร์ได้

3.10 การปรับปรุง กำลังไฟฟ้าเสมือน ในระบบ HVDC



รูปที่ 3.23 วิธีการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนทางด้านระบบเอซี

1. AC filter capacitors
2. AC shunt capacitors
3. Synchronous condensers
4. Static Var Sources (SVS)

โดยทั่วไปในระบบ HVDC ที่ต่อเชื่อมโยระบบเอซี เมื่อมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจะเกิดกำลังไฟฟ้าเสมือน ประมาณ 60% [4] ของ กำลังไฟฟ้าจริง อันเนื่องมาจากการปรับมุมนำกระแสใน ชุกคอนเวอร์เตอร์ และค่า Reactance ในหม้อแปลง ซึ่งเราสามารถชดเชย กำลังไฟฟ้าเสมือนใน AC BUS ได้โดยใช้คาปาซิเตอร์ ฟิลเตอร์, Shunt capacitors, Synchronous Condensers , Static Var Souse

3.11 สรุปผลการทดสอบ

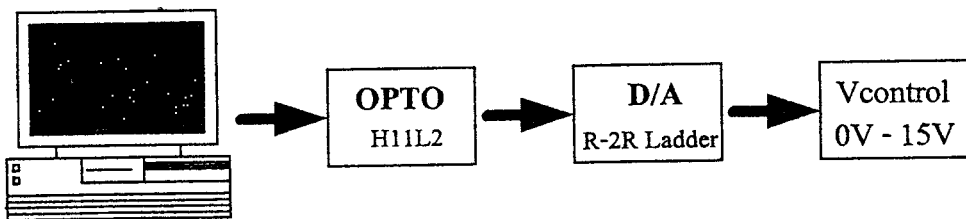
ในการปรับขนาดแรงดันคัตซีของชุกคอนเวอร์เตอร์ สามารถทำได้โดยการปรับมุมนำกระแส(α) ให้มีค่ามากขึ้นหรือต่ำลง โดยจะพบว่าเมื่อปรับมุมนำกระแสเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง ซึ่งเป็นผลมาจากมุมต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันมีค่ามากขึ้น การผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณกระแส(%THDi)มากขึ้น และการเกิดมุม Overlapทำให้ค่า %THDv ด้านเอซีมีค่ามากขึ้น และทำให้แรงดันคัตซีของชุกคอนเวอร์เตอร์มีค่าไม่คงที่ (ลดลงหรือเพิ่มขึ้น) โดยขึ้นอยู่กับค่าของกระแส I_d ตามสมการที่ 3.23 ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในชุกคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่คงที่ โดยขึ้นอยู่กับมุมนำกระแส(α) และกระแสที่ไหลในระบบ

บทที่ 4

การควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร้

4.1 บทนำ

ในการควบคุมการส่งถ่ายกำลังงานไฟฟ้า จะใช้โปรแกรม DELPHI ต่ออินเตอร์เฟส D/A เข้ากับชุด 12 บิตส์ คอนเวอร์เตอร์ โดยมีชุดออปโตแยกกราว์นของชุดคอนเวอร์เตอร์ของภาครับและภาคส่งออกจากกัน ข้อดีของการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร้คือสามารถทำการควบคุมได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากในการเริ่มส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องทำการปรับมุนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านส่งให้ทำงานอยู่ในสภาวะเรคติฟาย หลังจากนั้นจะต้องปรับมุนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์ด้านรับกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในขณะที่ปรับให้ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์นี้จะเกิดการล้ควงจรขึ้นชั่วขณะในสายส่งกำลังไฟฟ้า นานจนกว่า SCR จะสามารถหยุดนำกระแสได้ (Commutation) การควบคุมด้วยคอมพิวเตอร้จึงถูกนำมาใช้เพื่อสะดวกและรวดเร็วในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า โดยมีหลักการควบคุมดังรูปที่ 4.1



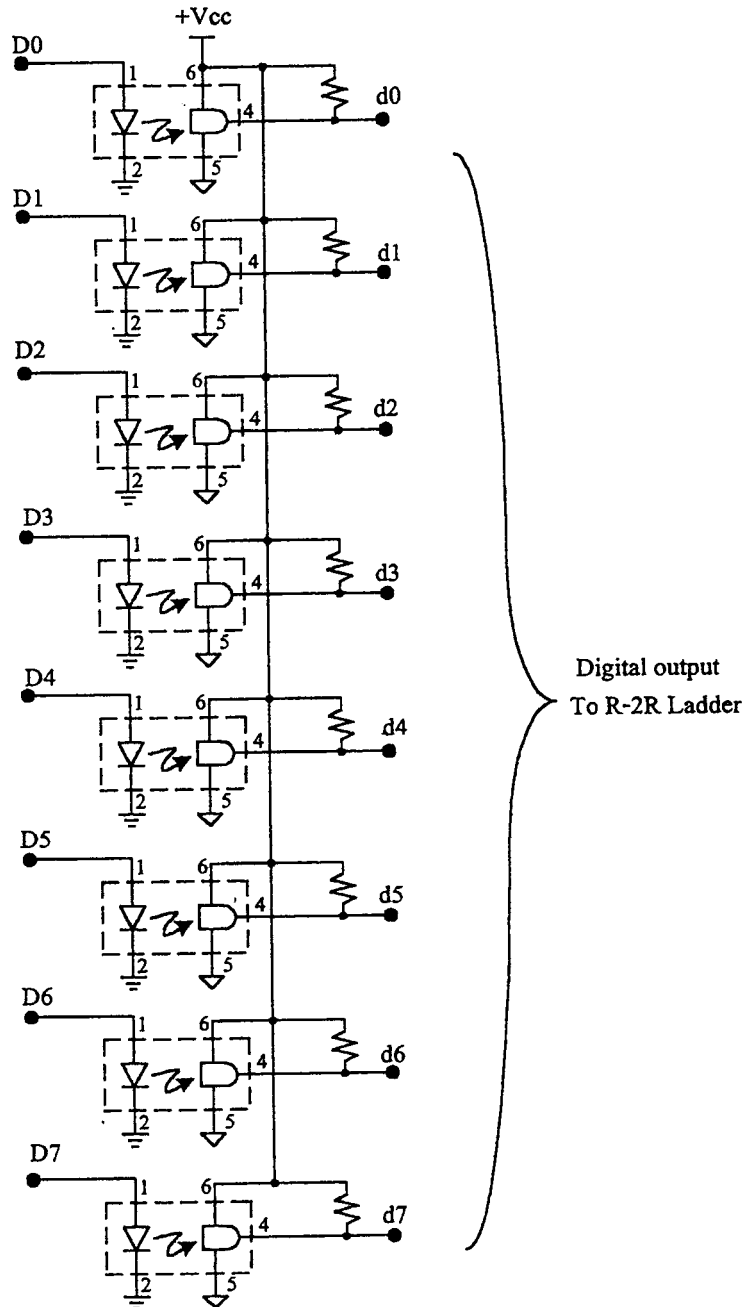
รูปที่ 4.1 ระบบควบคุมโดยคอมพิวเตอร้

4.2 การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก (Digital to Analog)

ในการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า จะใช้ IC TCA 785 ซึ่งเป็น IC สำเร็จรูปสามารถสร้างสัญญาณแรงดันบิตส์ 2 สัญญาณที่กลับเฟสกัน ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยการควบคุมมุนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์ สามารถทำได้โดยการปรับระดับสัญญาณแรงดัน Vcontrol ที่ขา 11 ของ TCA 785 ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำคอมพิวเตอร้เข้ามาควบคุม การปรับมุนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ โดยการสร้างสัญญาณแรงดันคี่ซีที่ขา 11

การเขียนโปรแกรมการควบคุมใช้โปรแกรม DELPHI โดยเขียนคำสั่งออกทาง Port 8 bit เข้าการ์ด I/O ของบริษัท ETT รุ่น ET-PCDIO ซึ่งในการ์คนี้มี IC 8255 จำนวน 1 ชุด 3 Port โดยให้ Port A ควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์ที่สับสเตรชัน A และ Port B ควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์ที่สับสเตรชัน

B ซึ่งสัญญาณควบคุมที่ออกจาก Port ทั้งสองจะต้องมีการแยกกราวด์สัญญาณควบคุม เนื่องจากเกิดการรบกวนขึ้นในระบบทำให้เกิดการลัดวงจรเกิดขึ้น ในการแยกกราวด์ทำได้ใช้ OPTO H11L2 ตามรูปที่ 4.2 ซึ่งจะต้องแยกทั้ง 8 บิต



รูปที่ 4.2 วงจรแยกกราวด์ 8 บิต

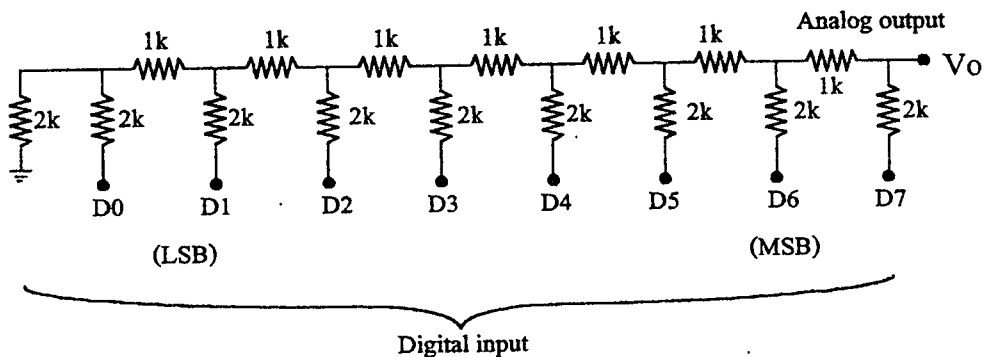
จากนั้นนำสัญญาณที่ออกจาก OPTO H11L2 เข้าสู่ชุด R-2R Ladder 8 bit ดังรูปที่ 4.3 โดยมีระดับสัญญาณแรงดันทั้งหมด 255 ชั้น ตามรูปที่ 4.4 ชั้นละ 0.059V ดังสมการที่ 4.1

$$V_o = \frac{E}{2^{N-n}} \tag{4.1}$$

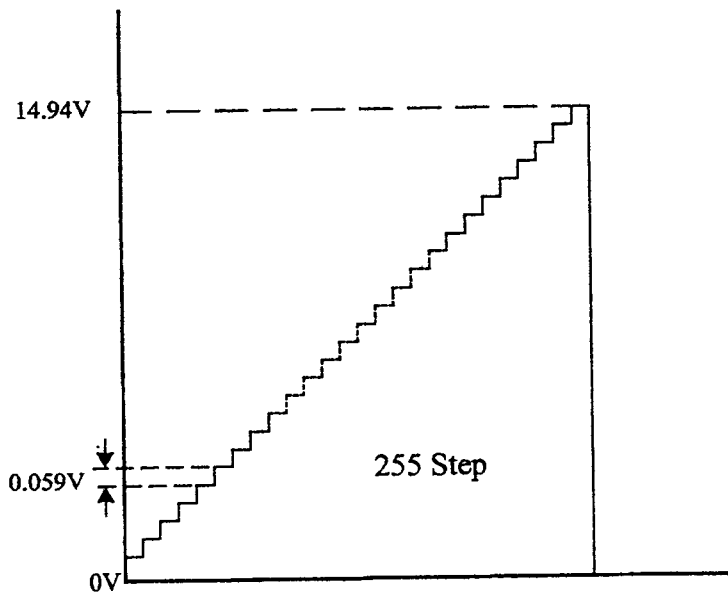
เมื่อ E = ระดับสัญญาณดิจิทัล (+15V)

V_o = แรงดันดิจิทัล

N = จำนวนบิต(8 bit)

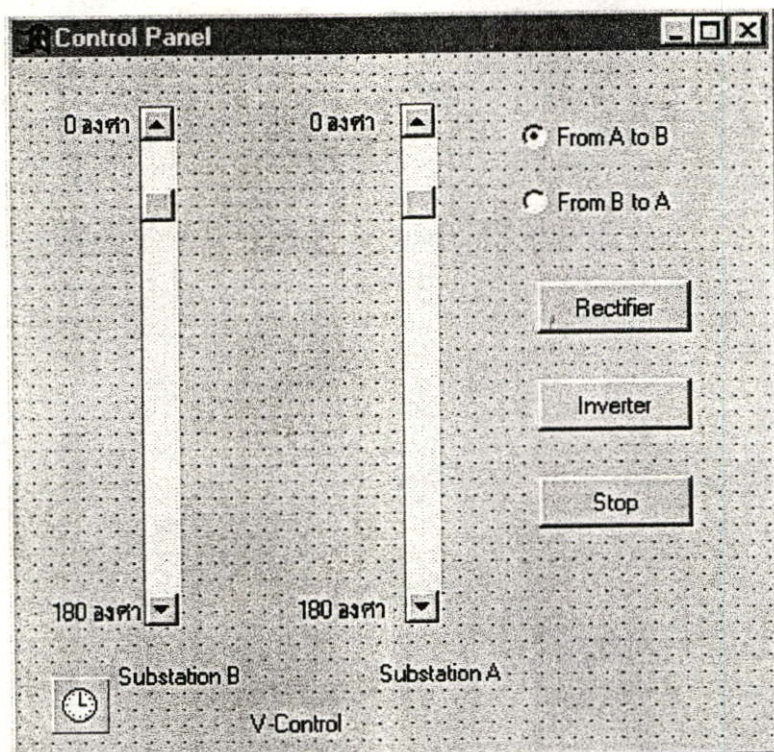


รูปที่ 4.3 วงจร R-2R Ladder 8 bit



รูปที่ 4.4 แรงดันดิจิทัลที่ออกจากชุด DAC 255 Step 0-15V

เมื่อทำการสร้างสัญญาณแรงดัน 0-15V ก็นำสัญญาณแรงดันที่ได้ต่อเข้ากับขา 11 ของ TCA 785 เพื่อทำการควบคุมมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ต่อไปโดยวงจรรวมทั้งหมดสามารถศึกษาได้จาก ภาคผนวก ง.

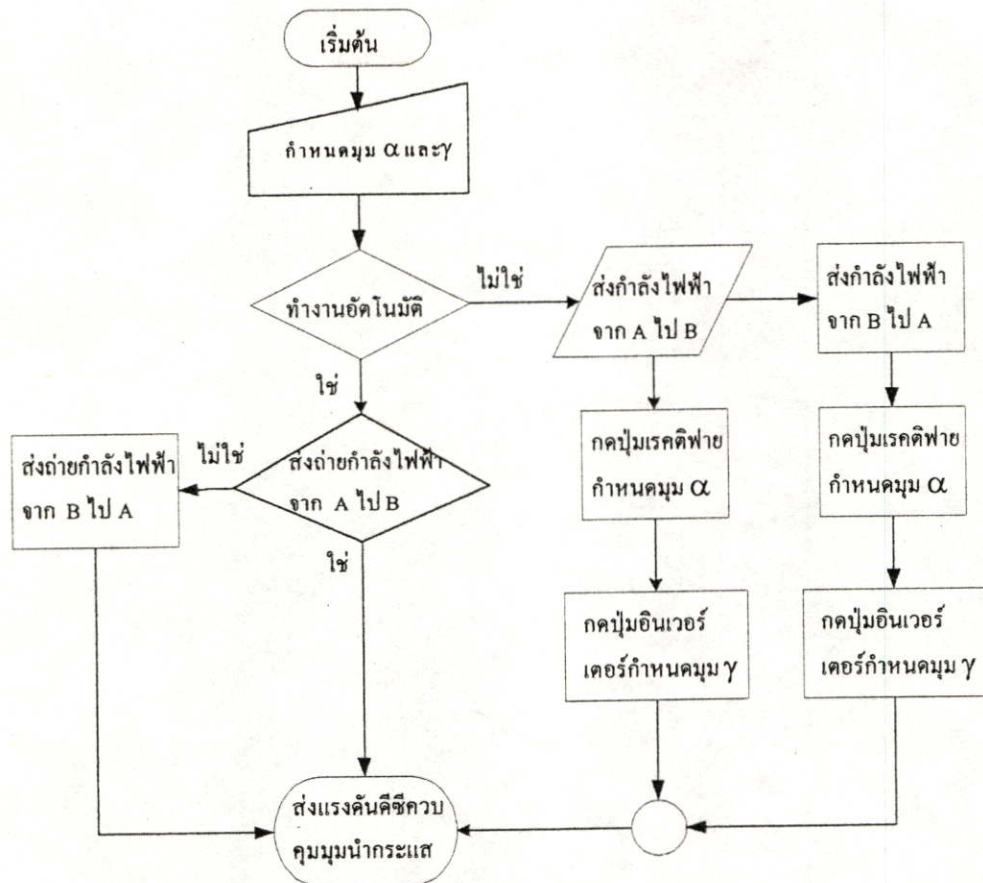


รูปที่ 4.5 หน้าจอแสดงผลของการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

4.3 หลักการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

ในการใช้โปรแกรมการควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์ ให้ทำงานในสถานะเรกติฟายและในสถานะอินเวอร์เตอร์ ขณะที่ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจะเริ่มต้นจากขั้นตอนการเลือกให้โปรแกรมทำงานส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B หรือ Substation B ไปยัง Substation A โดยเลือกจาก ฟอรัมของ Control Panel ตามรูปที่ 4.5 จากนั้นกดปุ่มเรกติฟายโดยสามารถตั้งค่ามุมนำกระแส (α) ได้ในโปรแกรม ขึ้นต่อไปกดปุ่ม อินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะทำให้ชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์ โดยสามารถกำหนดค่ามุมนำกระแส (γ) ได้ในโปรแกรม ซึ่งในโปรแกรมจะมี การตั้งเวลาการกำหนดมุมนำกระแสในการเริ่มสถานะอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าต่ำกว่ากำหนดเล็กน้อย เพื่อให้จำกัดกระแสที่ไหลผ่านไทรสเตอร์มีค่าไม่มากซึ่งจะทำให้ชุดคอนเวอร์เตอร์เสียหาย จากนั้นตั้งเวลาให้มุมนำกระแสสูงขึ้นตามกระแสที่กำหนดไว้

ในการกำหนดมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์นี้ สามารถใช้การปรับด้วยสกรอร์บาร์ที่ Substation A และ ที่ Substation B โดยสกรอร์บาร์นี้จะตั้งค่าเป็นเลขฐาน 16 ตั้งแต่ 0-255 ซึ่งการปรับแบบอัตโนมัติอาจมีค่าคลาดเคลื่อนในการกำหนดมุมนำกระแส ถ้าต้นขั้นการปรับจะเป็นไปตามรูปที่ 4.6 โดยมีตัวอย่างโปรแกรมในภาคผนวก ง.



รูปที่ 4.6 แผนผังขั้นตอนการควบคุมมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์

4.4 สรุปผล

ในการควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้คอมพิวเตอร์นี้ เป็นแบบรูปเปิดซึ่งในการควบคุมมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ จะควบคุมให้ด้านส่งกำลังไฟฟ้าทำงานในสภาวะเรกติฟาย โดยมีมุมนำกระแสไม่เกิน 90 องศา และควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์ด้านรับกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ โดยมีมุมนำกระแสมากกว่า 90 องศา ในการควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์นี้จะใช้ชุดอินเตอร์เฟสแปลงสัญญาณดิจิตอล 8 บิตไปเป็นสัญญาณ อนุภาค (สัญญาณแรงดันคิซีควม 0-15V) ซึ่งการควบคุมนี้จะนำสัญญาณแรงดันคิซีควมต่อเข้ากับ TCA 785 ซึ่งมีทั้งหมด 4 ชุด ตามรูปในภาคผนวก ง-1 โดยแบ่งเป็น ชุดคอนเวอร์เตอร์ด้านส่ง 2 ชุด และชุดคอนเวอร์เตอร์ด้านรับ 2 ชุด ในการออกแบบชุดอินเตอร์เฟสเพื่อควบคุมมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดนี้จะต้องแยกกราวน้ออกจากกันทั้งหมด มิฉะนั้นจะทำให้เกิดการลัดวงจรของระบบกำลังทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้ การควบคุมสามารถตั้งค่ามุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ในขณะที่ส่งกำลังไฟฟ้า หรือจะเลื่อนสกอบาร์ควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์ที่หน้าจอกอมพิวเตอร์ก็ได้

บทที่ 5

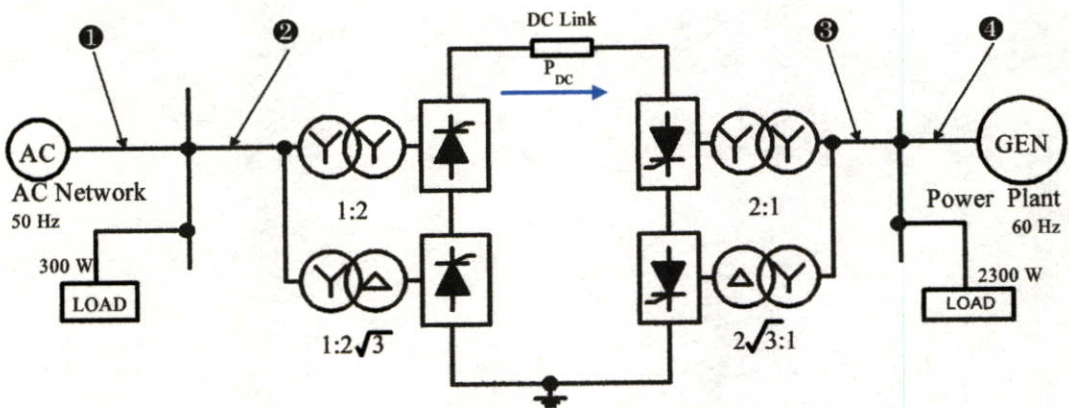
การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

5.1 บทนำ

ในบทที่ 5 นี้จะกล่าวถึง การจำลองการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อเชื่อมโยงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งเข้าด้วยกัน โดยจะทำการศึกษากำลังไฟฟ้า Active Power , Reactive Power และ Apparent Power ที่มีผลต่อมุนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ ทั้งทางด้านรับและด้านส่งกำลังไฟฟ้า อีกทั้งยังวิเคราะห์ผลของการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณการแสและแรงดันขณะทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า ที่ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบรวมมีค่าต่ำลง โดยมีเงื่อนไขการทดสอบ 4 ขั้นตอนคือ

1. การทดสอบที่แรงดันเท่ากันความถี่แตกต่างกัน
2. การทดสอบที่แรงดันและความถี่ของระบบเท่ากันปรับมุม $\alpha=5^\circ$ และ $136^\circ < \gamma < 150^\circ$
3. การทดสอบที่แรงดันและความถี่ของระบบเท่ากันปรับมุม $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ และ $\gamma=140^\circ$
4. การทดสอบที่แรงดันแตกต่างกันและความถี่เท่ากัน

5.2 การทดสอบที่แรงดันเท่ากันความถี่แตกต่างกัน

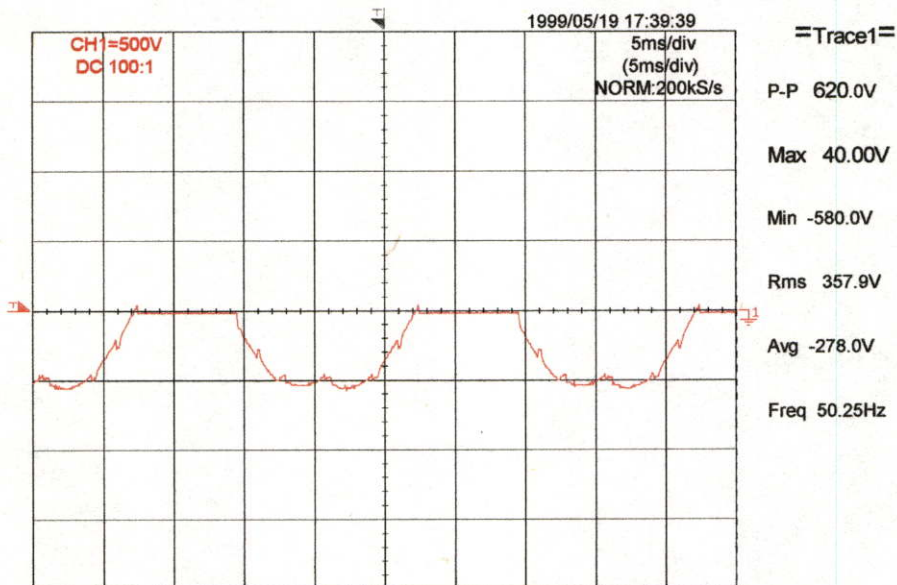


รูปที่ 5.1 การทดสอบที่แรงดันเท่ากันความถี่แตกต่างกัน

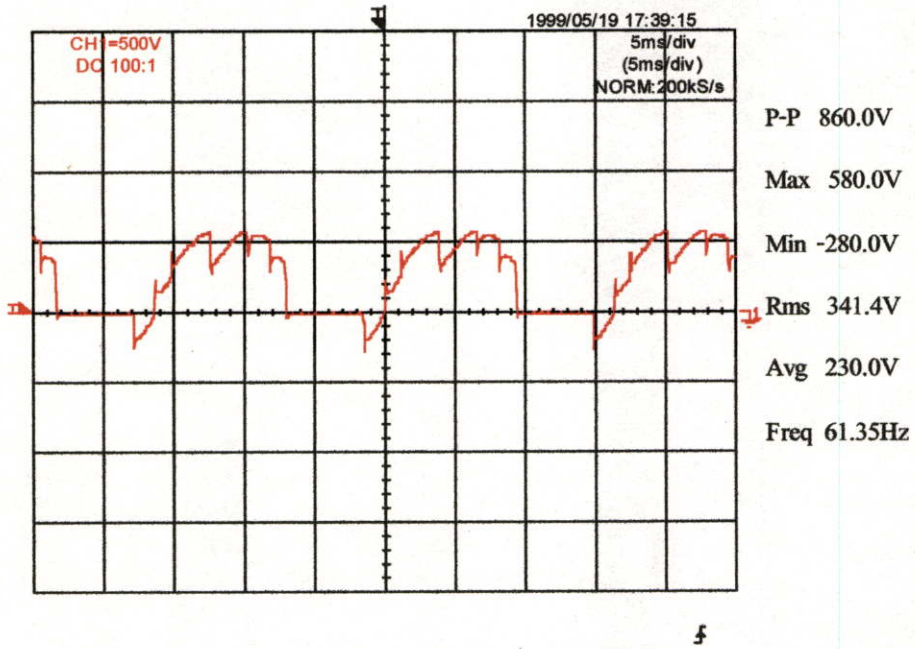
ในการทดสอบทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าใช้ Auto Transformer 15A โดยปรับให้มีแรงดันเอาพุท $200V_{LL}$ จ่ายภาระโหลดตลอดไฟขณะที่ยังไม่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า 300W และทางด้านรับกำลังไฟฟ้าใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3kW กำเนิดแรงดันเอาพุท $200V_{LL}$ ที่ความถี่ 60Hz จ่ายภาระโหลดตลอดไฟขณะที่ยังไม่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า 2300W โดยมีผลทดสอบดังต่อไปนี้

5.2.1 ขั้นตอนการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

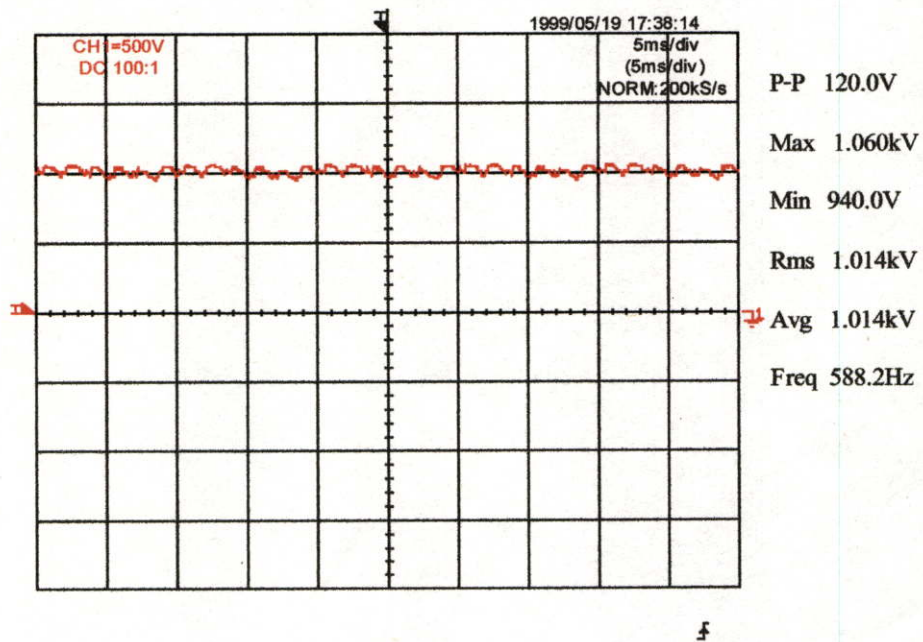
- ปรับมุมนำกระแส(α) ของชุดคอนเวอเตอร์ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในสภาวะเรกติฟาย ตามรูปที่ 5.2 เป็นแรงดันตกคร่อมแรงดันคร่อม SCR ขณะทำงานในสภาวะเรกติฟาย $\alpha = 5^\circ$
- ปรับมุมนำกระแส(γ) ของชุดคอนเวอเตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ ตามรูปที่ 5.3 เป็นแรงดันตกคร่อมแรงดันคร่อม SCR ขณะทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในการทดสอบจะปรับมุม γ ให้มีค่าเท่ากับ 150 องศา
- บันทึกผลการส่งกำลังไฟฟ้างดังแสดงในรูปที่ 5.2-5.17



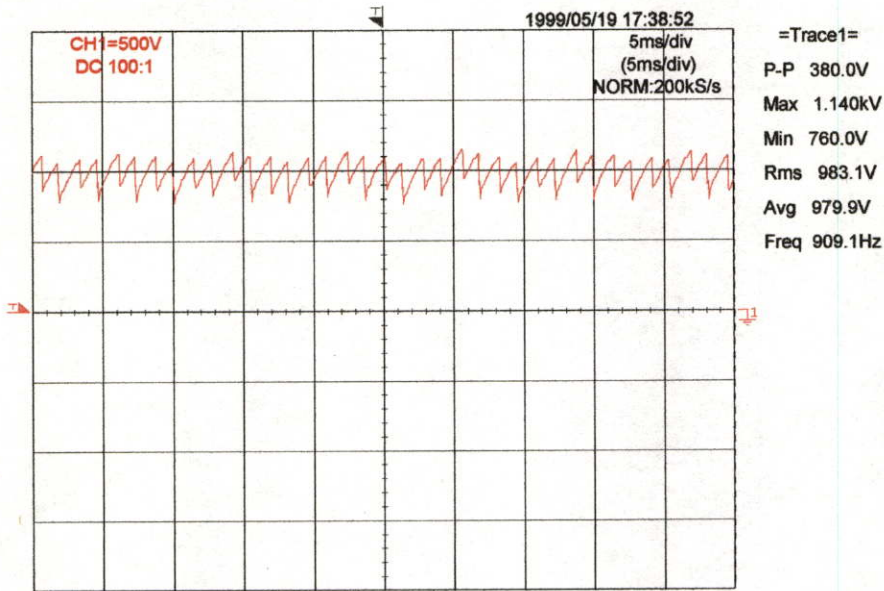
รูปที่ 5.2 แรงดันคร่อม SCR ขณะทำงานในโหมดเรกติฟาย $\alpha = 5$ องศา



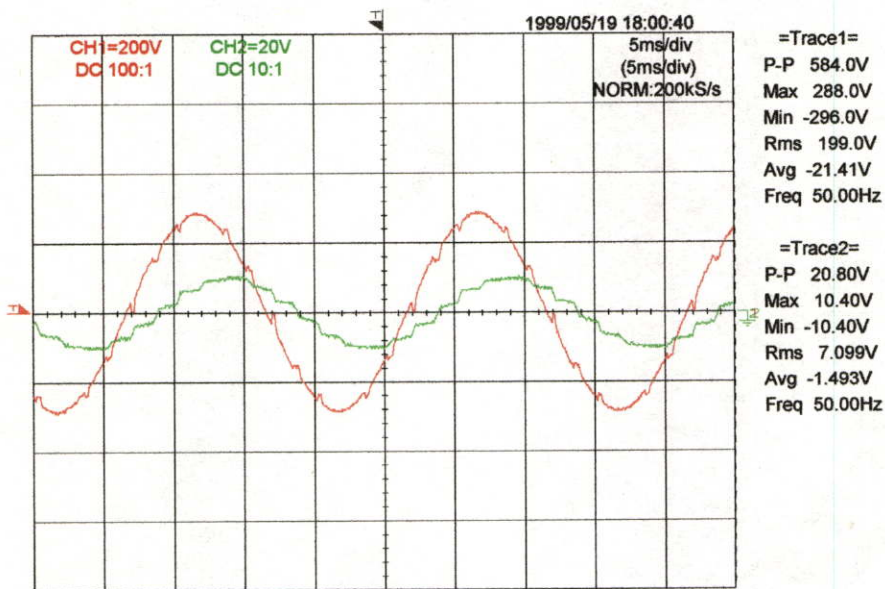
รูปที่ 5.3 แรงดันคร่อม SCR ขณะทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ $\gamma = 150$ องศา



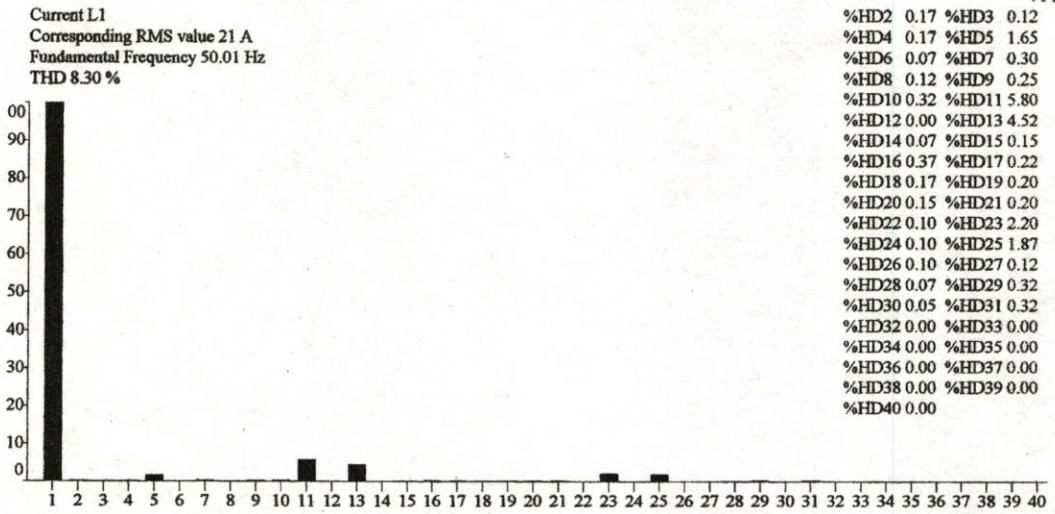
รูปที่ 5.4 แรงดันไฟฟ้าในสายส่งคิซิด้านส่งกำลังไฟฟ้า



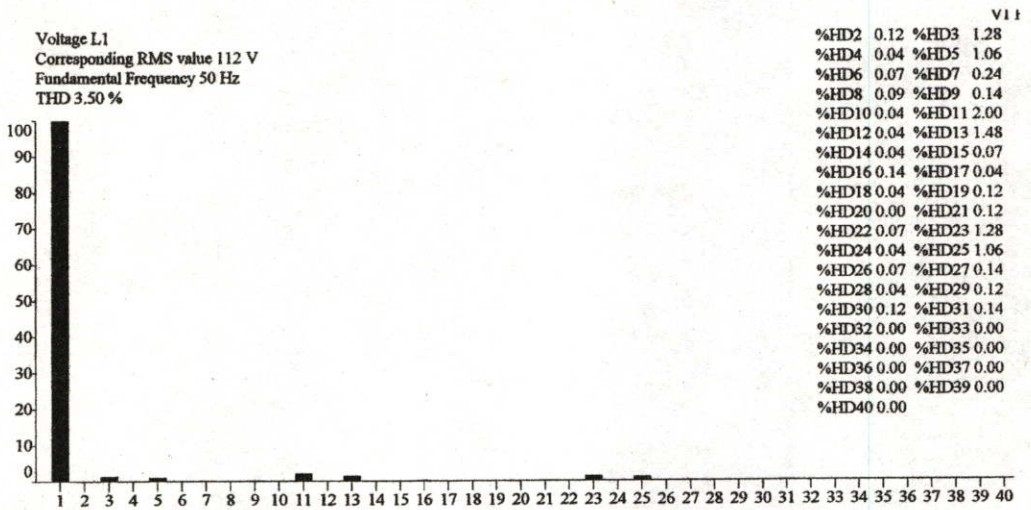
รูปที่ 5.5 แรงดันไฟฟ้าในสายส่งคี่ด้านรับกำลังไฟฟ้า



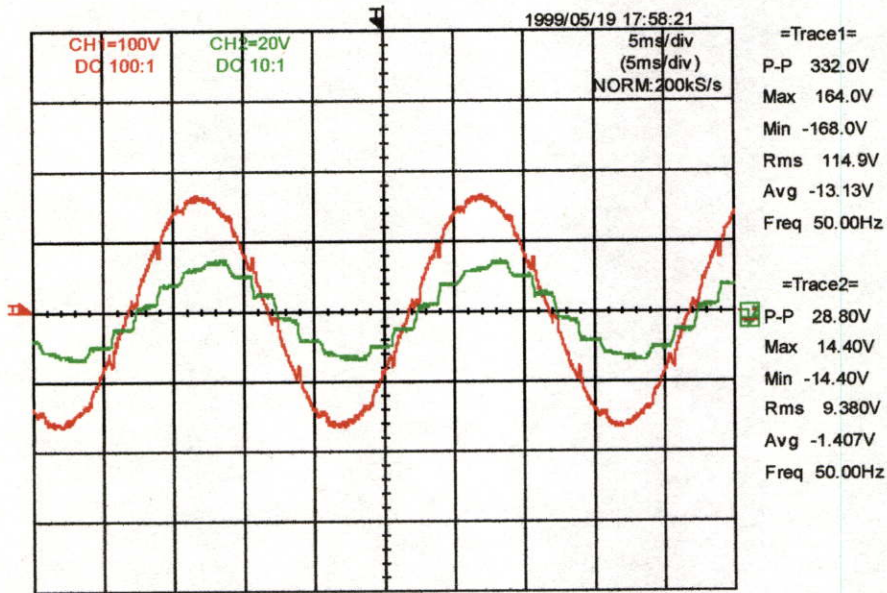
รูปที่ 5.6 แรงดัน V_P และกระแส I_L ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1)



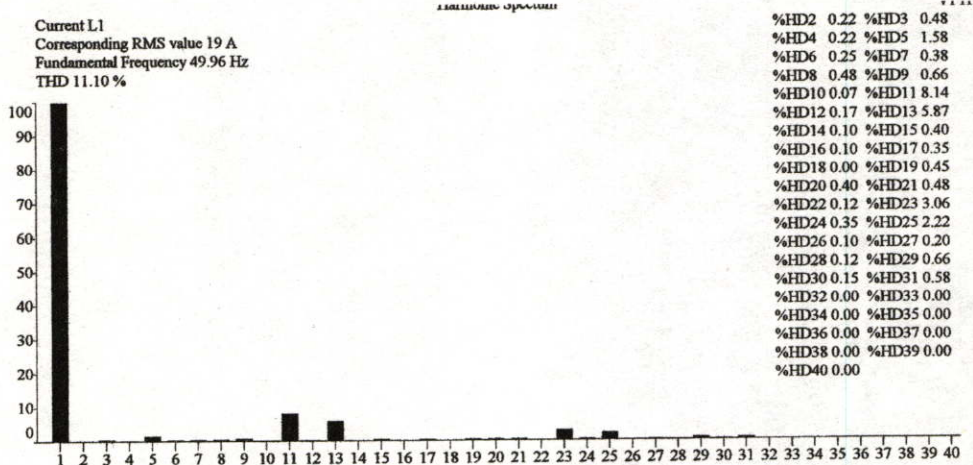
รูปที่ 5.7 Harmonic Spectrum กระแส I_L ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1)



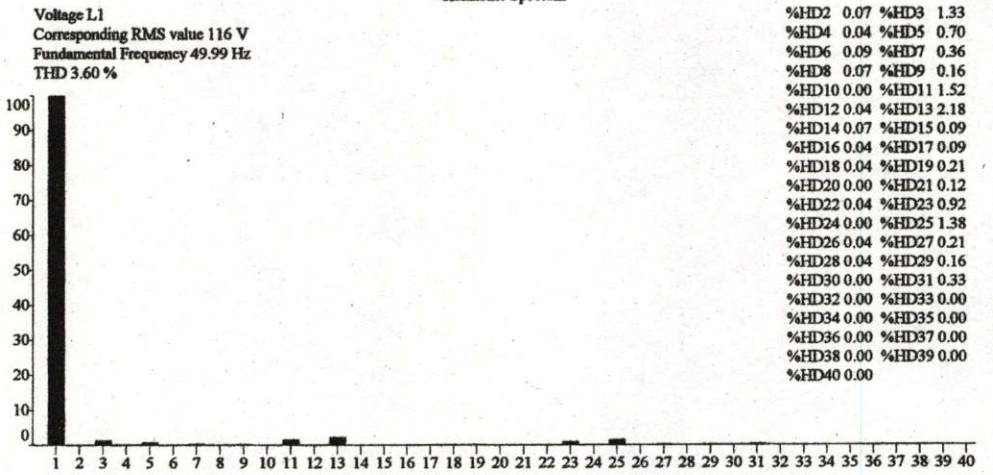
รูปที่ 5.8 Harmonic Spectrum แรงดัน V_L ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1)



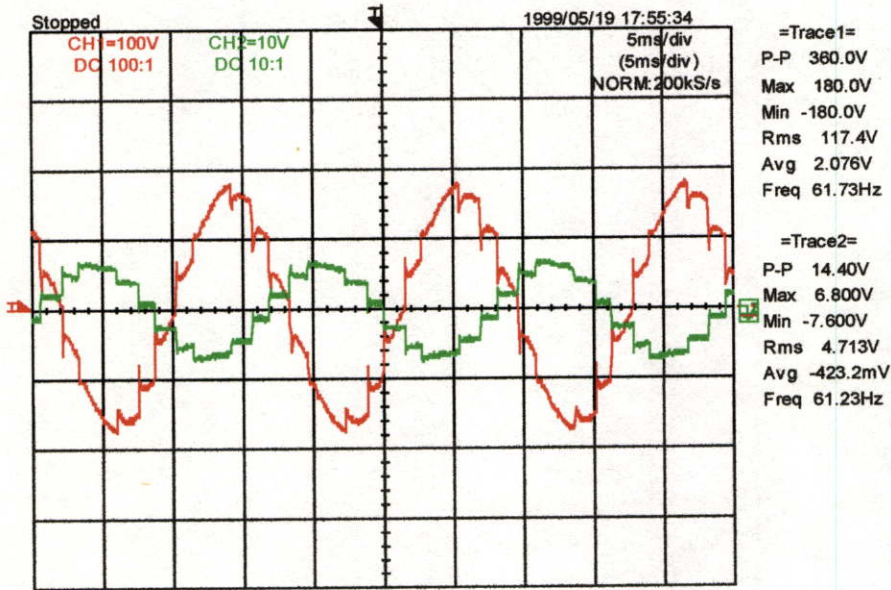
รูปที่ 5.9 แรงดัน V_P และกระแส I_L คอนเวอร์เตอร์ด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2)



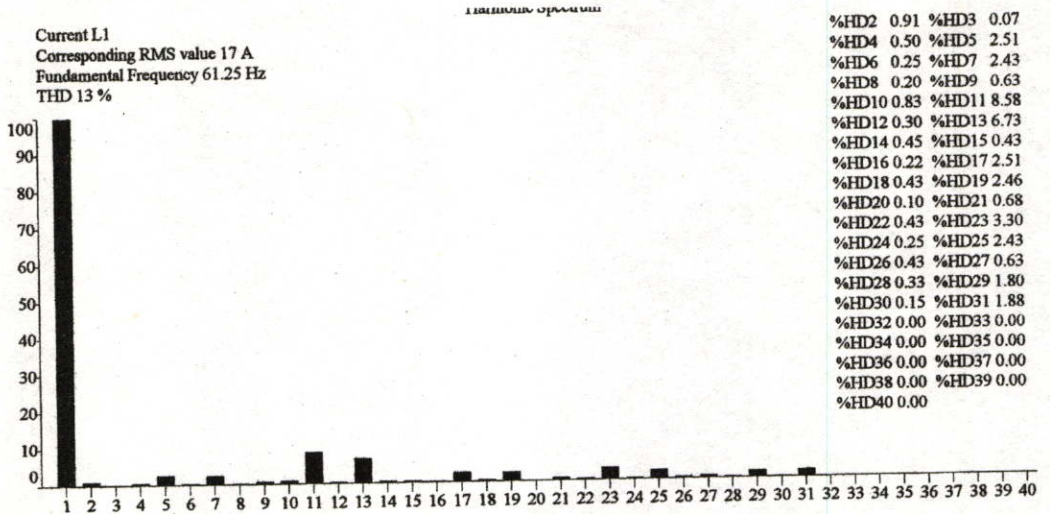
รูปที่ 5.10 Harmonic Spectrum กระแส I_L คอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2)



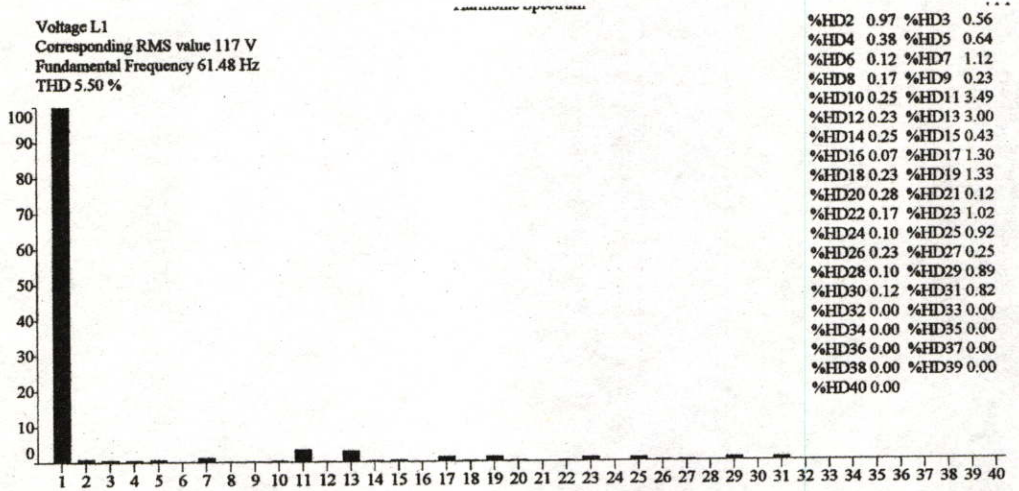
รูปที่ 5.11 Harmonic Spectrum แรงดัน V_L คอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2)



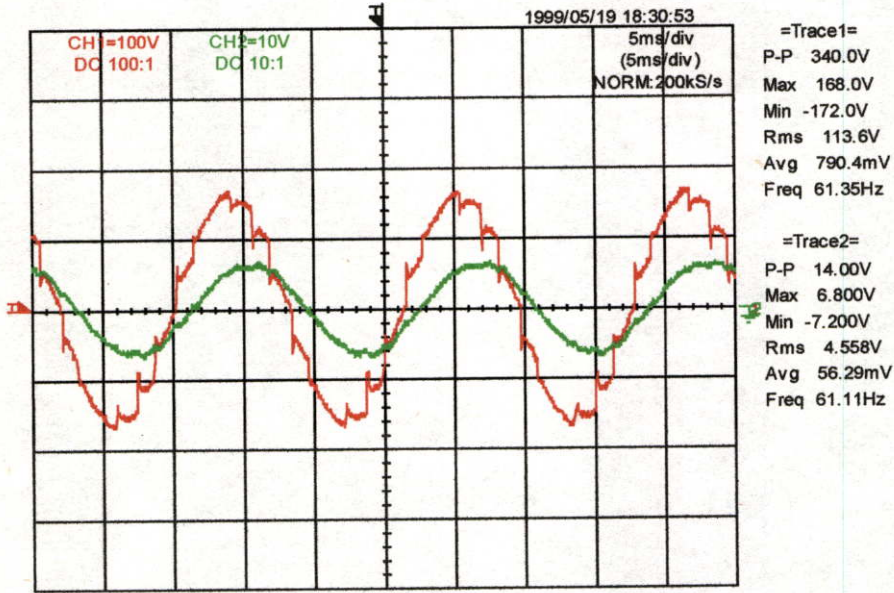
รูปที่ 5.12 แรงดัน V_p และกระแส I_L คอนเวอร์เตอร์ด้านรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3)



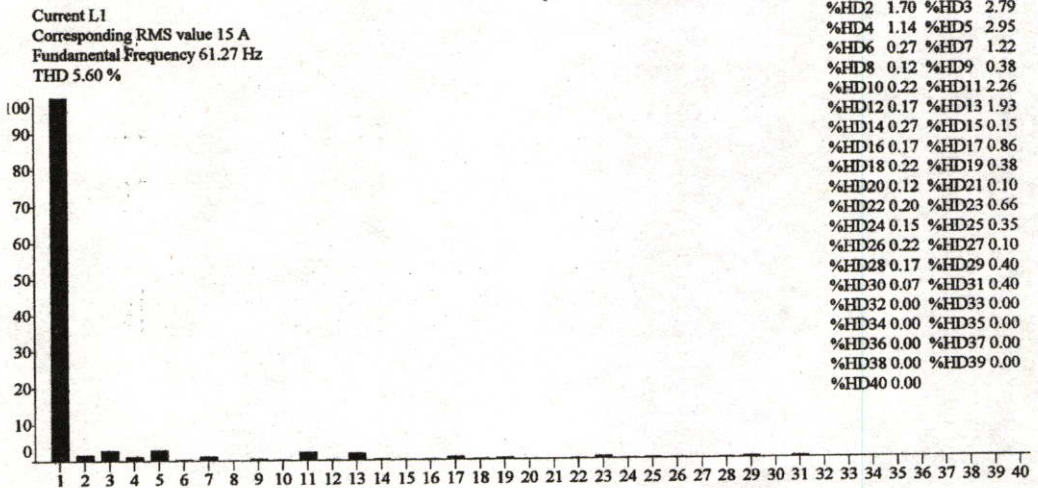
รูปที่ 5.13 Harmonic Spectrum กระแส I_L คอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3)



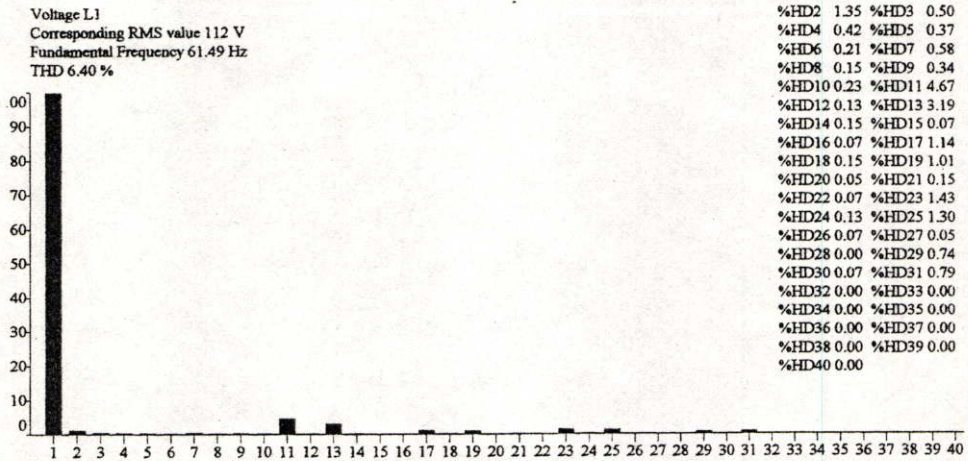
รูปที่ 5.14 Harmonic Spectrum แรงดัน V_L คอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3)



รูปที่ 5.15 แรงดัน V_p และกระแส I_L ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไฟฟ้า (จุดที่ 4)



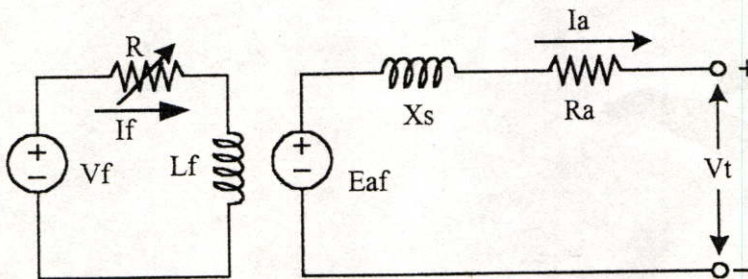
รูปที่ 5.16 Harmonic Spectrum กระแส I_L เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (จุดที่ 4)



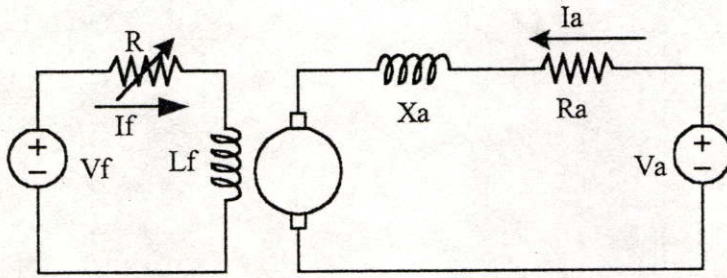
รูปที่ 5.17 Harmonic Spectrum แรงดัน V_L เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (จุดที่ 4)

โดยในขณะที่ทำการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า จะทำการเริ่มเดินคิซิมอเตอร์ที่เป็นตัวค้นกำลัง โดยป้อนแรงดันในขาคอมเมอร์เซอร์ของคิซิมอเตอร์ที่พิกัด 220V และป้อนแรงดันคิซิมอเตอร์ในขาค Field ของคิซิมอเตอร์ที่พิกัด 220V และเมื่อคิซิมอเตอร์เริ่มหมุนจะทำการป้อนกระแส Excited ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายภาระโหลดอยู่ ให้มีแรงดันที่ขั้ว V_L เท่ากับ 116V ความถี่ 60Hz โดยการเพิ่มความเร็วยกของคิซิมอเตอร์(ลดกระแส Field ของคิซิมอเตอร์) โดยมีผลการทดสอบตามตารางที่ 5.1

จากนั้นทำการปรับมุนากระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ให้ทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ามาขาค เซยกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะต้องทำการควบคุมแรงดัน V_L และความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่ขณะส่งกำลังงานไฟฟ้า เนื่องจากแรงดัน V_L เปลี่ยนแปลงจะไม่สามารถทำให้ไทรสเตอร์หยุดนำกระแสได้ สามารถบันทึกผลการทดสอบขณะส่งกำลังไฟฟ้าตาม ตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.18 วงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 5.19 วงจรภายในของคีมอเตอร์

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบก่อนส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

ก่อนส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า			
Item	DC Motor	Item	AC Generator
I_a	11.5A	-	-
I_f	0.2A	I_f	0.53A
V_f	220V	V_f	60V
V_a	220V	V_t	116V

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบขณะส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

ขณะส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า			
Item	DC Motor	Item	AC Generator
I_a	5A	-	-
I_f	0.3A	I_f	0.4A
V_f	220V	V_f	49V
V_a	220V	V_t	116V

ตารางที่ 5.3 ขณะยังไม่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่แรงดันเท่ากันความถี่แตกต่างกัน

รายการ	AC Network(1)	Converter A(2)	Converter B(3)	AC Generator(4)
I_G	1.3A	-	-	6.63A
V_{LL}	200V	-	-	200V
PF	0.99	-	-	0.99
P	300W	-	-	2300W
Q	-	-	-	-
S	300W	-	-	2300W
Frequency	50Hz	-	-	60Hz
DC Link				
I_{DC}	V_{DC1}	V_{DC2}	P_{DC}	
-	-	-	-	

ตารางที่ 5.4 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่แรงดันเท่ากันความถี่แตกต่างกัน

รายการ	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	AC Network(1)	จุดที่ 2	จุดที่ 3	AC Generator(4)
I_G	6A	4.44A	4	3.86A
V_{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.99	0.98	0.85	0.77
P	2030W	1460W	1200W	1050W
Q	277VAR	340VAR	740VAR	820VAR
S	2050VA	1500VA	1400VA	1330VA
Frequency	50Hz	50Hz	60Hz	60Hz
%THDi	8.30%	11.10%	13%	5.60%
%THDv	3.50%	3.50%	5.50%	6.40%
DC Link				
I_{DC}	V_{DC1}	V_{DC2}	P_{DC}	
1.4A	1014V	980V	1372W	

$$\text{ประสิทธิภาพของสายส่งกำลังไฟฟ้า} = \frac{P_{DC \text{ output}}}{P_{DC \text{ input}}} * 100 = 97\%$$

$$\text{ประสิทธิภาพของทั้งระบบ} = \frac{P_{\text{output}}(3)}{P_{\text{input}}(2)} * 100 = 82\%$$

5.2.2 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่แรงดันของระบบไฟฟ้ากระแสสลับทั้งสองเท่ากัน และความถี่แตกต่างกัน โดยที่ Substation A มีความถี่ 50Hz และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีความถี่ 60Hz โดยปรับมุมนำกระแสทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า ให้ทำงานในสภาวะเรคตีฟายมีมุมนำกระแส $\alpha=5$ องศา และปรับมุมนำกระแสทางด้านรับกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ โดยมีมุมนำกระแส γ เท่ากับ 150 องศา ส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กำลังจ่ายภาระโหลด

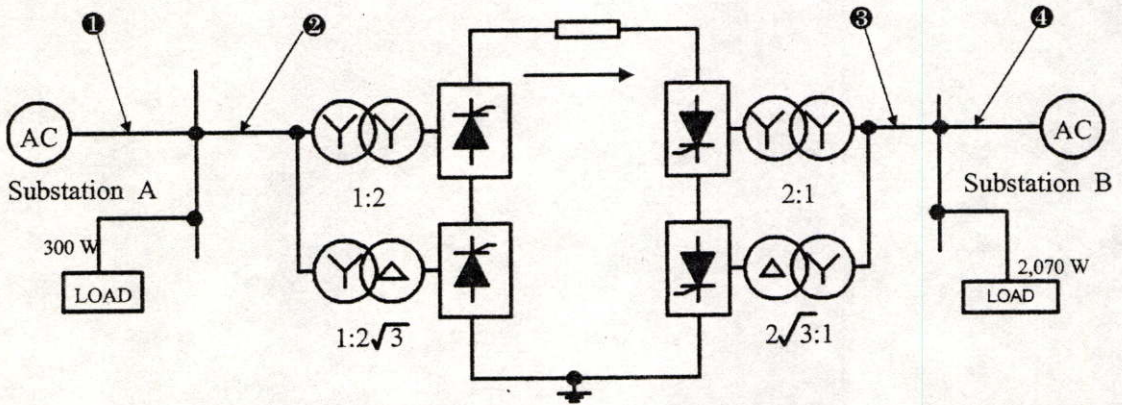
โดยที่ก่อนมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายภาระโหลดที่ 2300W ที่ความถี่ 60Hz ตามตารางที่ 5.1 และหลังจากที่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก AC Network ไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าช่วยจ่ายโหลด 1050W ตามตารางที่ 5.4 โดยกำลังไฟฟ้าที่ส่งมาช่วยโหลดมีค่าเท่ากับ 1200W โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในการช่วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดเท่ากับ 45.6%

เมื่อพิจารณาที่คิซิมอเตอร์ซึ่งเป็นตัวดันกำลังขับให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ตามตารางที่ 5.1 และ 5.2 ขณะที่ยังไม่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าพบว่ากระแส I_a เท่ากับ 11.5 แอมป์ และที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกระแสสลับมีค่า I_f เท่ากับ 0.53 แอมป์ ในขณะที่ทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ามาช่วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากเครื่องกำเนิดมีค่าลดลงเป็นผลทำให้แรงดัน V_t ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น และความเร็วรอบของคิซิมอเตอร์มีค่าสูงขึ้น ทำให้ต้องลดกระแส Excited (I_p) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลงเป็น 0.4A และลดความเร็วรอบของคิซิมอเตอร์โดยเพิ่มกระแส Field ของคิซิมอเตอร์เพื่อทำให้แรงดัน V_t ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคงที่ ซึ่งจะให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ได้จริง

ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระบบเอชีสองระบบมีความถี่แตกต่างกัน สามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้ เนื่องจากชุดคอนเวอร์เตอร์ ด้านส่งกำลังไฟฟ้าแปลงกำลังไฟฟ้าจาก AC เป็น DC และชุดคอนเวอร์เตอร์ ด้านรับกำลังไฟฟ้าแปลงกำลังไฟฟ้าจาก DC เป็น AC ซึ่งในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจะเห็นว่า ความถี่ไม่มีผลในการส่งกำลังไฟฟ้า เนื่องจาก DC Link ไม่มีผลกับความถี่ และชุดคอนเวอร์เตอร์ทั้งทางด้านรับและด้านส่งกำลังไฟฟ้ามีการ ซิงโครไนซ์แรงดันจากการไฟฟ้าทำให้การ Turn ON และ Turn OFF ของชุดไทรสเตอร์เป็นไปตามความถี่ของระบบไฟฟ้ากระแสสลับทั้งสองด้าน

5.3 แรงดันและความถี่ของระบบเท่ากันโดยปรับ $\alpha=5^\circ$ และ $136^\circ < \gamma < 150^\circ$

การทดสอบจะใช้ Auto transformer พิกัดกระแส 15A จำลองเป็น Substation A และ Auto transformer พิกัดกระแส 10A จำลองเป็น Substation B โดยที่ขณะที่ยังไม่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า ด้าน Substation A ต่อโหลดความต้านทาน(โหลดไฟ) ประมาณ 300W และ Substation B ต่อโหลดความต้านทาน(โหลดไฟ) ประมาณ 2,070W เนื่องจากต้องการควบคุมกระแสที่ Substation ทั้งสองไม่ให้เกิดพิกัดกระแสที่ตั้งไว้ ในการกำหนดพิกัดกำลังการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจะกำหนดไว้ที่ 1,000-3,000W เนื่องจากขณะทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ามีการปรับมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ทำให้มีค่า Reactive Power สูงขึ้นเป็นผลให้กระแสทางด้านส่งและรับกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นตาม



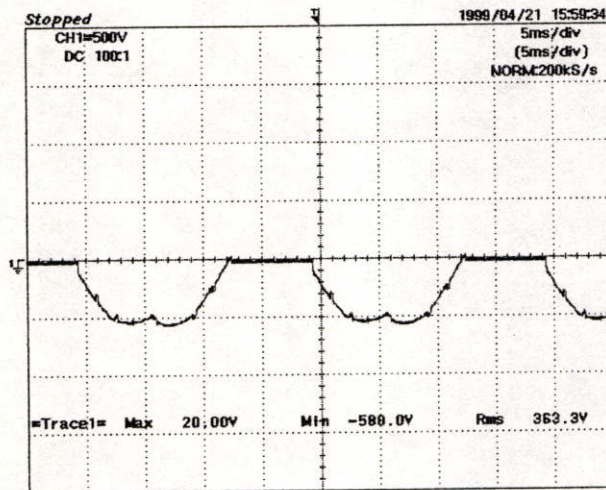
รูปที่ 5.20 ตำแหน่งต่างๆของการวัดกำลังไฟฟ้า

ในการทดสอบจะปรับแรงดันที่ Substation ทั้งสองให้มีพิกัดแรงดัน $200 V_{LL}$ ความถี่ 50 Hz โดยในการทดสอบนี้จะปรับมุมนำกระแส ทางด้านชุดคอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้า(Dealy Angle) ให้คงที่ที่ 0 องศา จากนั้นปรับมุมนำกระแสชุดคอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า(Extinction Angle) ให้มีค่าลดลง ทำให้การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบมากขึ้น อันเนื่องมาจากผลต่างของแรงดันในสายส่งกำลังไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น กระแสในสายส่งกำลังไฟฟ้าจึงมีค่าสูงขึ้น ในการทดสอบวัดค่ากำลังไฟฟ้าใช้เครื่องมือวัดของ Chauvin Arnoux รุ่น C.A 8201 Made in France และเครื่องวัด Harmonic Analyzer มีรายละเอียดข้อมูลของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ทดสอบในภาคผนวก ก

5.3.1 ลำดับขั้นการทดสอบ

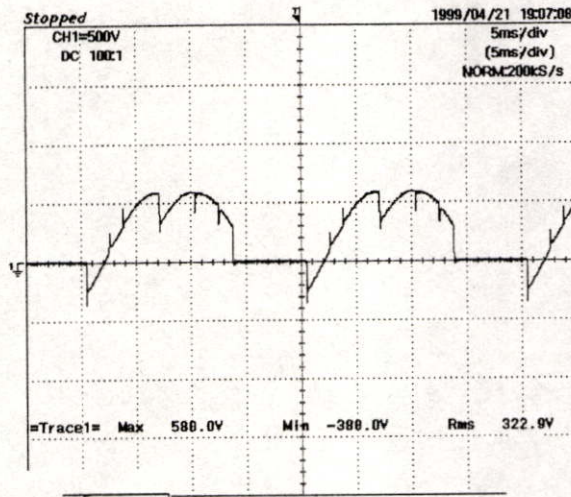
1. เริ่มต้นการทดสอบปรับมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ด้านส่งกำลังไฟฟ้า ให้ทำงานในโหมดเรกติฟายที่ มุม $\alpha = 5$ องศาที่ ตลอดการทดสอบ
2. ปรับมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้า ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ มุมนำกระแส γ อยู่ระหว่าง 136-150 องศา
3. บันทึกผลการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าและรูปสัญญาณต่างๆตามรูปที่ 5.20
4. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบในขณะที่ทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าบันทึกรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม SCR ที่ชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า ตามรูปที่ 5.21 เป็นแรงดันคร่อม SCR ทำงานในโหมดเรกติฟายที่มุมนำกระแส Delay Angle (α) = 5 องศา

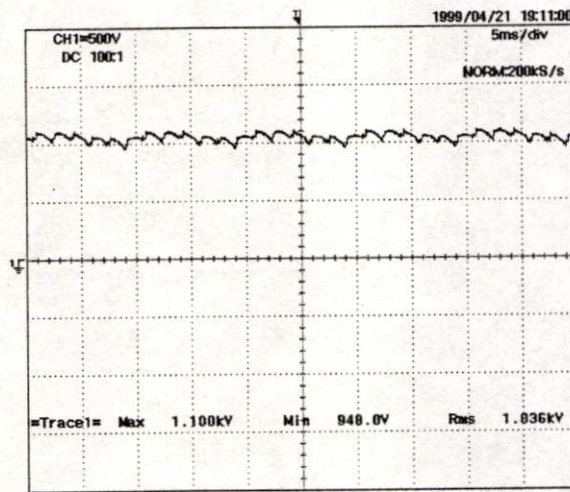


รูปที่ 5.21 แรงดันตกคร่อม SCR ทำงานในโหมดเรกติฟาย

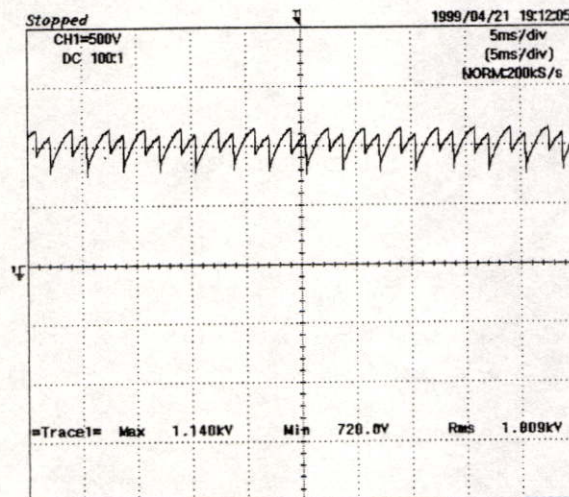
และตามรูปที่ 5.22 เป็นแรงดันคร่อม SCR ที่ชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ ที่มุมนำกระแส Extinction Angle (γ) = 150 องศา โดยรูปสัญญาณที่จุด 1,2,3 และ 4 ตามรูปที่ 5.25 ถึง รูปที่ 5.28 กำหนดให้รูปสัญญาณที่มี Amplitude สูงเป็นรูปสัญญาณแรงดันและรูปสัญญาณที่มี Amplitude ต่ำเป็นรูปสัญญาณกระแส โดยเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันและกระแสในแต่ละจุดที่ทำการวัดสัญญาณ



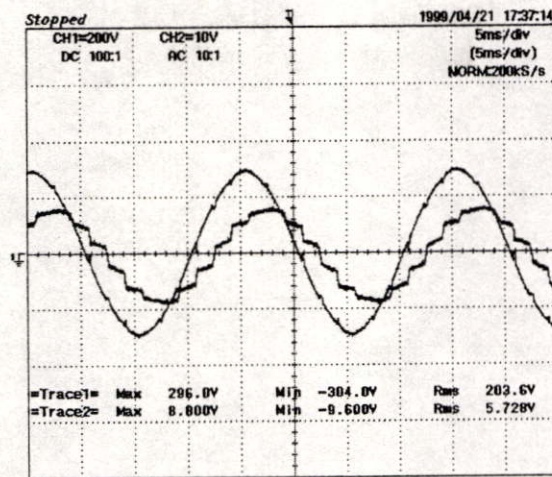
รูปที่ 5.22 แรงดันตกคร่อม SCR ในโหมคอินเวอร์เตอร์มุม $\gamma=150$ องศา



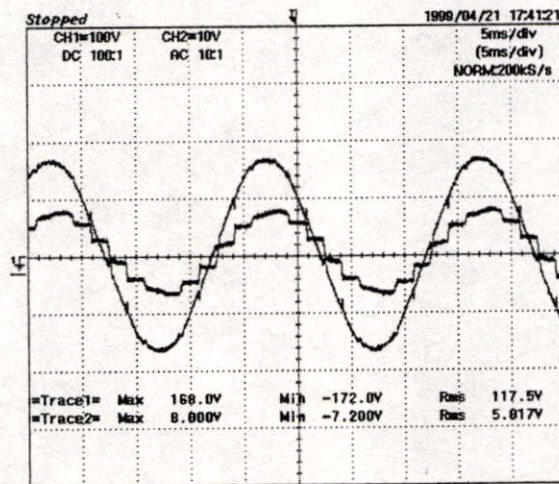
รูปที่ 5.23 แรงดันดีซีในสายส่งด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha=5$ องศา



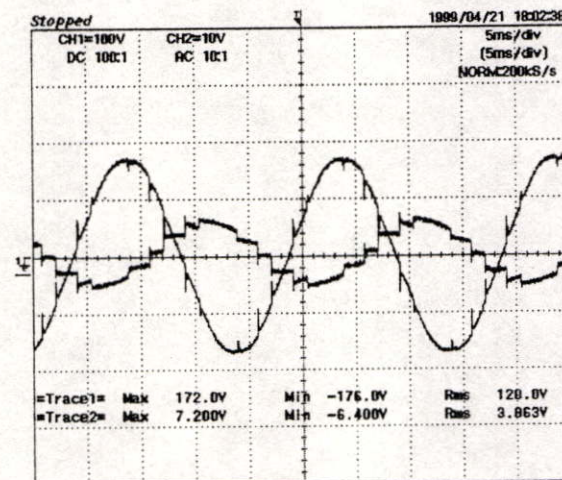
รูปที่ 5.24 แรงดันดีซีในสายส่งด้านรับกำลังไฟฟ้า $\gamma=150$ องศา



รูปที่ 5.25 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Line (V_{AB}) จุดที่ 1

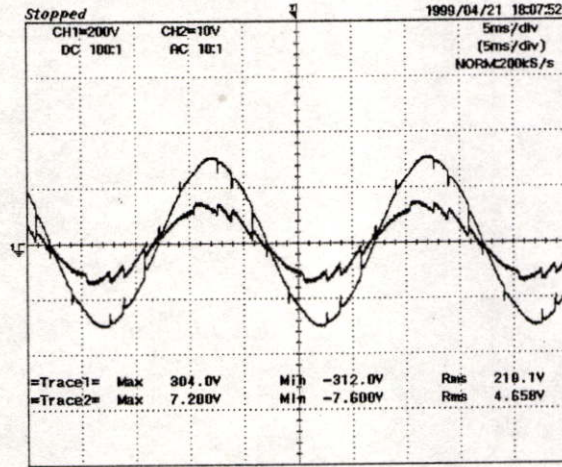


รูปที่ 5.26 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Phase (V_{AN}) จุดที่ 2

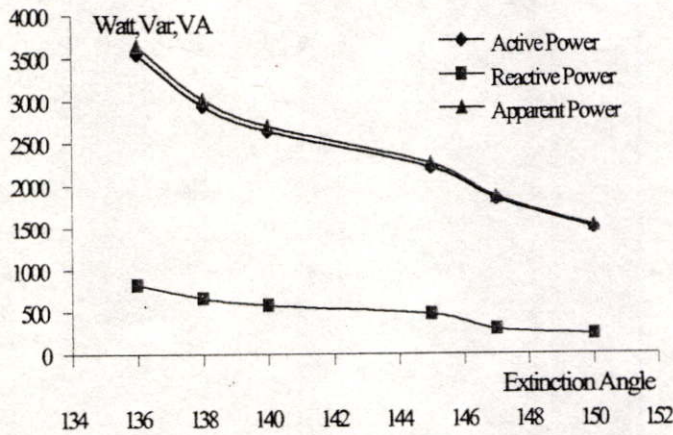


รูปที่ 5.27 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Phase (V_{AN}) จุดที่ 3

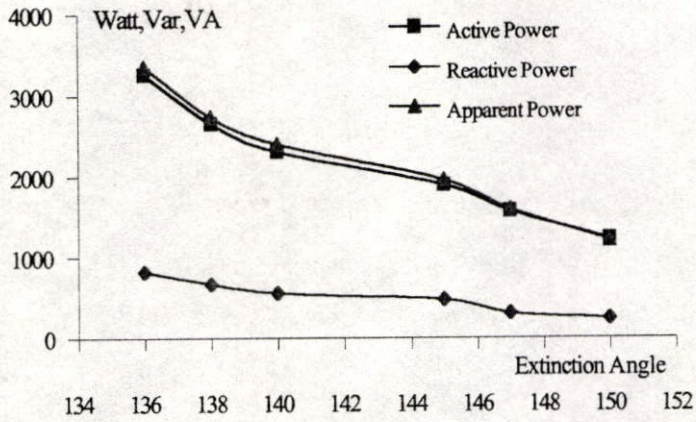
ในการควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์จะต้องกำหนดมุมนำกระแสของไทรสเตอร์ให้มีค่ามากกว่า 90 องศา จากทดสอบ รูปที่ 5.8 จะเห็นว่ามุมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันนั้นมากกว่า 90 องศา นั่นก็หมายความว่า ชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ขนานเข้ากับ Substation B ช่วยจ่ายภาระโหลด โดยไม่ต้องคำนึงถึง Phase Sequence และความถี่เนื่องจากชุดคอนเวอร์เตอร์ นี้มีการหยุดนำกระแสแบบ Line Commutate มีการ Synchronize กับระบบความถี่ของ Substation B



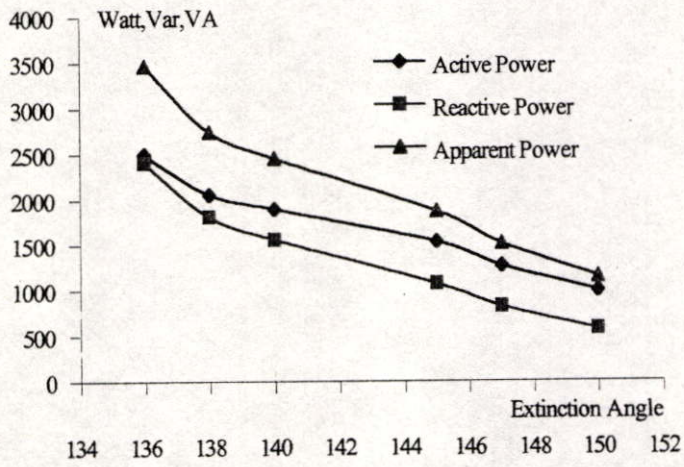
รูปที่ 5.28 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Line (V_{AB}) จุดที่ 4



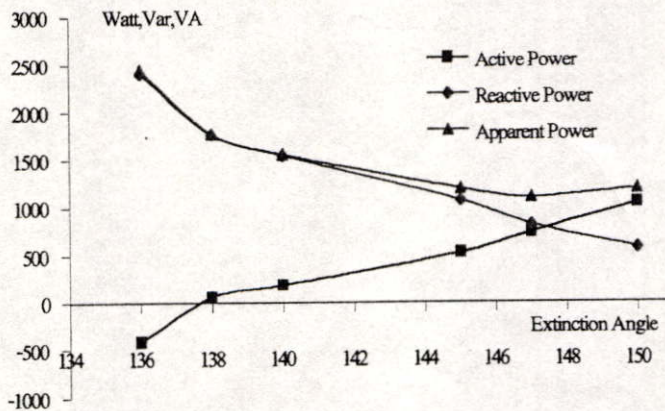
รูปที่ 5.29 กราฟกำลังไฟฟ้า P,Q,S ที่ Substation A ขณะส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1)



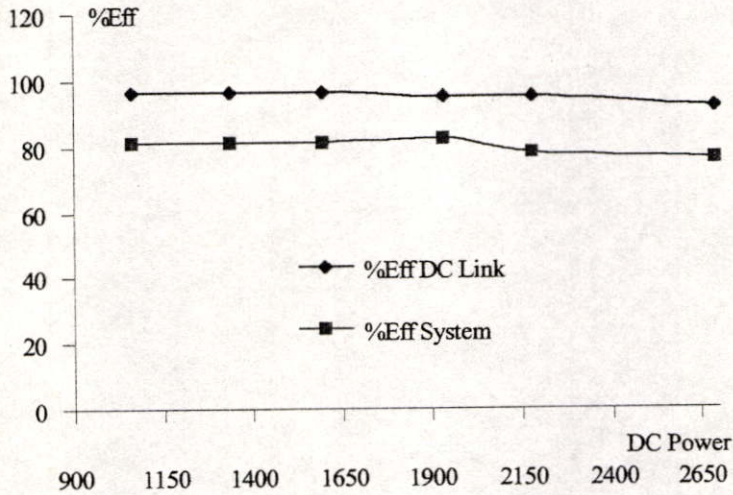
รูปที่ 5.30 กราฟกำลังไฟฟ้า P,Q,S ที่ไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ A ส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2)



รูปที่ 5.31 กราฟกำลังไฟฟ้า P,Q,S ที่ไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3)

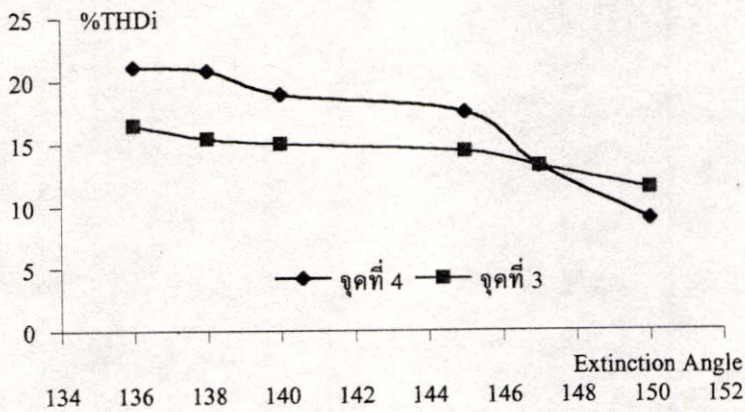


รูปที่ 5.32 กราฟกำลังไฟฟ้า P,Q,S ที่ Substation B ขณะรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 4)

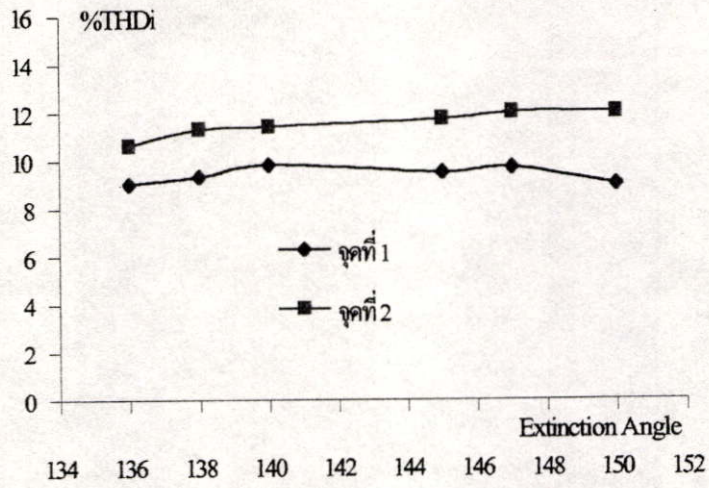


รูปที่ 5.33 ประสิทธิภาพของระบบและสายส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ $136^\circ < \gamma < 150^\circ$

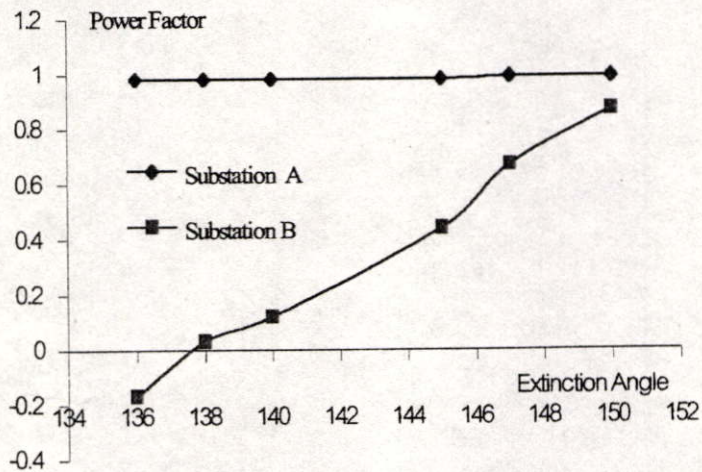
จากรูปที่ 5.33 เป็นกราฟแสดงประสิทธิภาพในสายส่งกำลังไฟฟ้าขณะทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า จะเห็นว่าเมื่อทำการปรับมุมนำกระแส γ ของคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันคิซึชของชุดคอนเวอร์เตอร์มีค่าต่ำลง กระแสที่ไหลในสายส่งกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นตามสมการที่ $Power\ Loss\ DC = I^2R$ เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของกำลังการส่งต่ำลง แต่กำลังงานที่ส่งจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าคิซึชเท่ากับแรงดันคิซึชคูณด้วยกระแสคิซึช



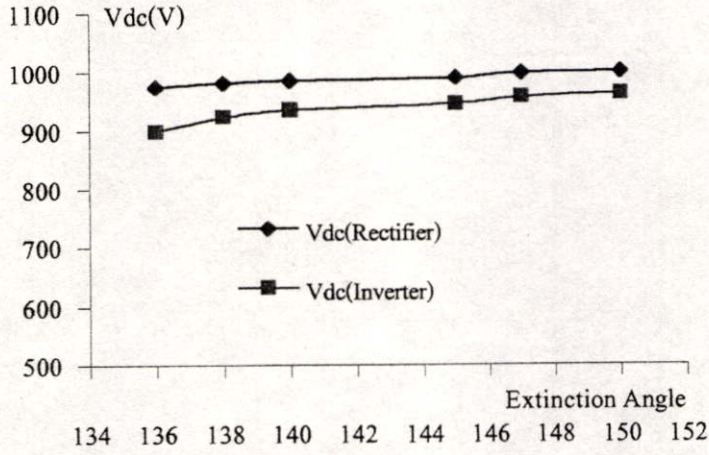
รูปที่ 5.34 การเปลี่ยนแปลง %THDi ทางด้านรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3,4)



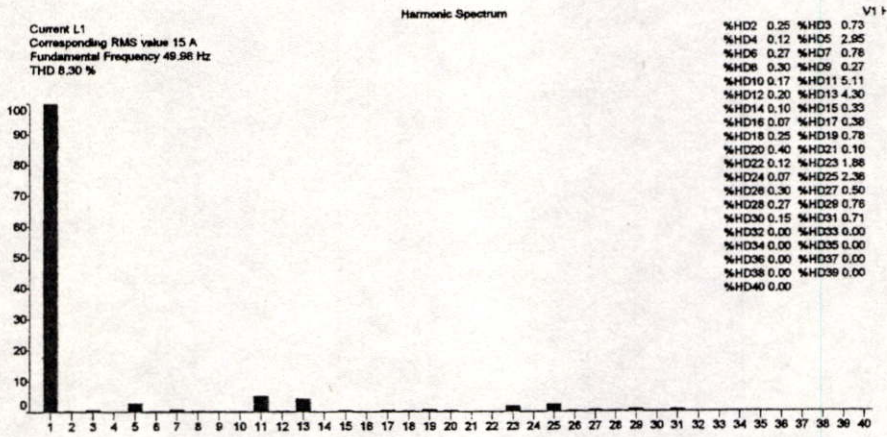
รูปที่ 5.35 การเปลี่ยนแปลง %THDi ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1 และ 2)



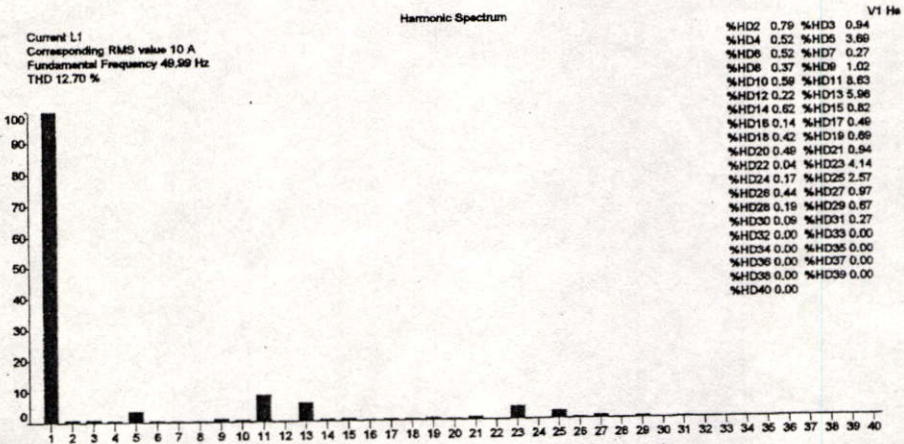
รูปที่ 5.36 Power Factor ด้านส่งและรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1 และ 4)



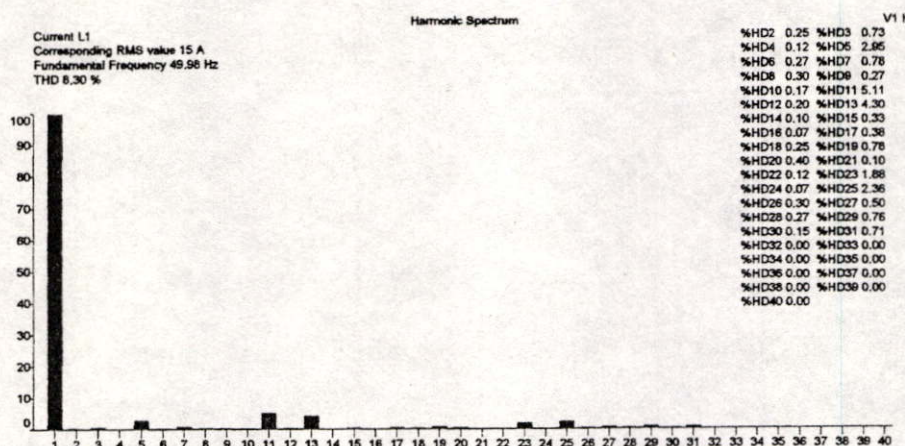
รูปที่ 5.37 แรงดันคิซี ด้านส่งและรับกำลังไฟฟ้า(จุดที่ 1 และ 4)



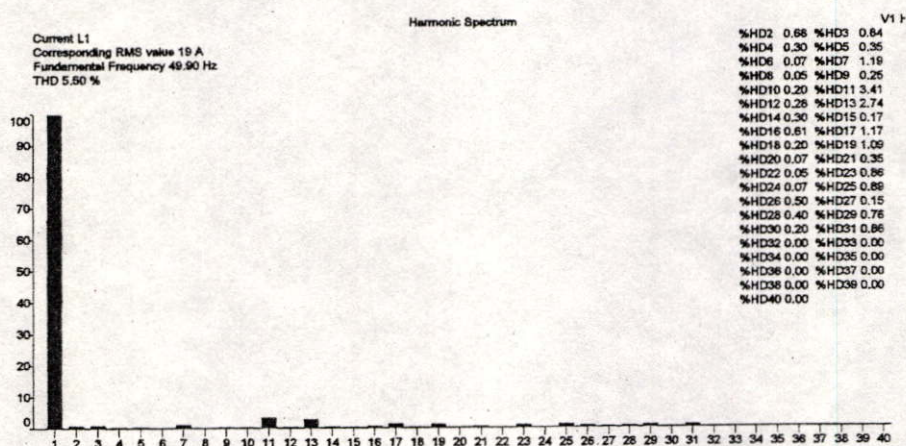
รูปที่ 5.38 Harmonic Spectrum ของกระแสที่ Substation A(I_A) จุดที่ 1



รูปที่ 5.39 Harmonic Spectrum ของกระแสที่ไหลเข้า Converter A(I_A) จุดที่ 2



รูปที่ 5.40 Harmonic Spectrum ของกระแสเอชซี Converter B(I_A), $\gamma=150^\circ$ จุดที่ 3



รูปที่ 5.41 Harmonic Spectrum ของกระแสเอชซี Substation B(I_A), $\gamma=150^\circ$ จุดที่ 4

5.3.2 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบเมื่อทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B โดยการปรับมุมนำกระแสทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า(α) ให้คงที่ และปรับมุมนำกระแสทางด้านรับกำลังไฟฟ้า(γ) ให้มีค่าต่ำลงระหว่าง $136^\circ < \gamma < 150^\circ$ จะสามารถทำให้เพิ่มพิคต์กำลังการส่งได้ เนื่องจากการปรับมุมนำกระแสทางด้านรับกำลังไฟฟ้า จะทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันด้านรับและด้านส่งในสายส่งคิซีมีค่ามาก กระแสในสายส่งจึงมีค่ามากตาม ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปมีค่ามากขึ้นตามสมการที่ 3.25

จากรูป 5.29 และ 5.30 เป็นกราฟแสดงการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าทางด้าน Substation A และด้านระบบเอชซีของชุดคอนเวอร์เตอร์ขณะส่งกำลังไฟฟ้า จะเห็นว่าเมื่อทำการปรับมุม γ ให้ลดต่ำลงจาก 150° กำลังไฟฟ้า P,Q และ S ก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์ต้องการค่า Reactive Power ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า จึงทำให้เกิดกำลังไฟฟ้า Reactive Power ขึ้นในระบบ

ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งก็มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากเนื่องจากมุมนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้ามียาค่า

โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 5.29 และ 5.30 ซึ่งเป็นกราฟของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่ Substation A ในจุดที่ 1 และกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ในจุดที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าเมื่อปรับมุมนำกระแส γ ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าให้มีค่าต่ำลง จะทำให้แรงดันคิซีทางด้านรับกำลังไฟฟ้าก็จะมีค่าลดต่ำลงซึ่งจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในสายส่งกำลังไฟฟ้ามากขึ้น เป็นผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยจากกราฟจะพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนทางด้านจุดที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันเนื่องมาจากโหลดที่ใช้เป็นค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียว โดยเมื่อพิจารณาการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณกระแสในรูปกราฟที่ 5.35 ในจุดที่ 1 และ 2 มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเนื่องมาจากสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกส์ 12 พัลส์ไหลรวมกับกระแสของโหลดจึงทำให้รูปสัญญาณกระแสใกล้เคียงรูปสัญญาณชายน

และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.31 และ 5.32 เป็นกราฟกำลังไฟฟ้าทางด้านระบบเอซี ของชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าที่ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์และกำลังไฟฟ้าที่ Substation B โดยจะเห็นว่าเมื่อทำการลดมุมนำกระแส γ ทำให้ Substation B จ่ายกำลังไฟฟ้าได้ต่ำกว่าที่ขณะไม่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าเนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าจาก Substation A มาช่วยจ่ายภาระโหลด แต่ในการทดสอบนี้เมื่อทำการลดค่ามุม γ ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้า Reactive Power จะไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าที่ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ เนื่องมาจากกระแสในระบบเพิ่มมากขึ้นและมุมมองศาลคต่ำลงดังสมการที่ 3.24 ทำให้ Substation B จะต้องจ่ายค่ากำลังไฟฟ้า Reactive Power เท่ากับที่ไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจะทำให้มุมค้างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันที่ Substation B มีค่าเพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้ Power Factor ใน Substation B ต่ำลงและกระแสที่จ่ายออกจาก Substation B มีค่าสูงขึ้นอีกด้วย

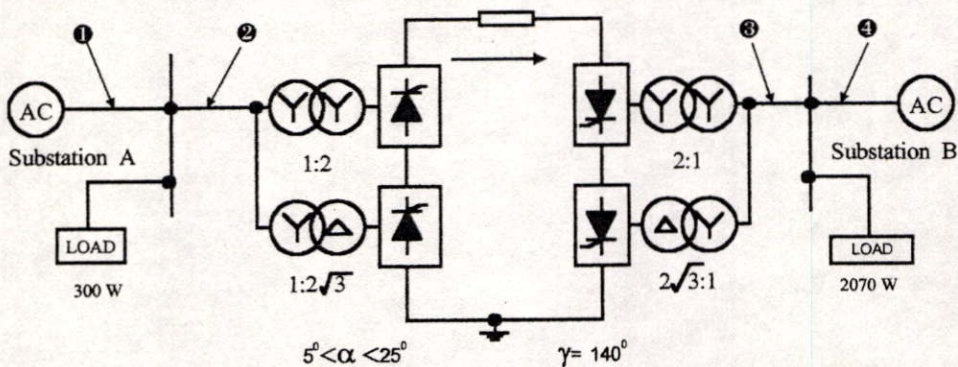
เมื่อพิจารณาการเรื่องของการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ (Harmonic Distortion) พบว่าในขณะที่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าตามรูปที่ 5.35 เมื่อปรับมุมนำกระแส (α) ด้านส่งกำลังไฟฟ้าให้คงที่ที่ 5 องศา และปรับมุมนำกระแส (γ) ด้านรับกำลังไฟฟ้าให้ต่ำกว่า 150 องศาเพื่อเพิ่มกำลังในการส่งกำลังไฟฟ้า ทำให้ %THDi ก่อนข้างคงที่เนื่องจากสัญญาณกระแสที่เป็น 12 Step รวมกับสัญญาณ Fundamental ของโหลดที่เป็นความต้านทาน และในส่วนของทางด้านรับกำลังไฟฟ้า ตามรูปที่ 5.34 %THDi มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณ 12 Step ที่ไหลออกจากชุดอินเวอร์เตอร์หักล้างกับสัญญาณกระแสที่โหลดความต้านทาน ทำให้สัญญาณกระแสที่ Substation B มี %THDi สูงขึ้น

5.4 แรงดันและความถี่ของระบบเท่ากันโดยปรับ $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ และ $\gamma = 140^\circ$

การทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าของระบบเอซิจีทั้งสองระบบเท่ากับ $200 V_{LL}$ ที่ความถี่ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยขณะที่ทำการส่งกำลังไฟฟ้าจะคงค่ามุมนำกระแสทางด้านรับกำลังไฟฟ้า γ เท่ากับ 140 องศา และทำการปรับมุมนำกระแสทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า α อยู่ระหว่าง 5-25 องศา ซึ่งในการทดสอบจะพิจารณาค่าของกำลังไฟฟ้าต่างๆเพื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบในหัวข้อ 5.3 ดังได้กล่าวมาแล้ว

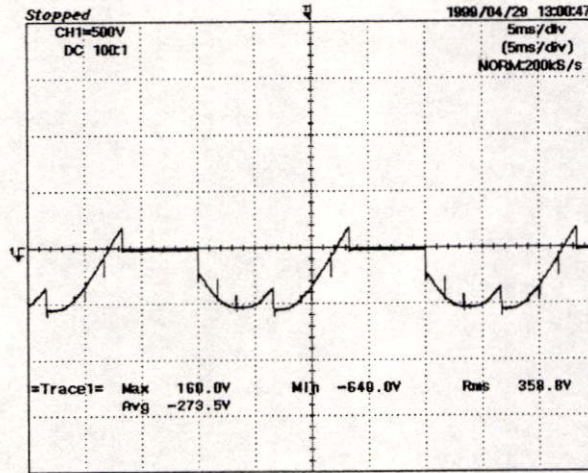
5.4.1 ลำดับขั้นการทดสอบ

1. เริ่มต้นการทดสอบปรับมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ด้านส่งกำลังไฟฟ้าที่ Substation A ให้ทำงานในโหมดเรกติฟายที่ มุม $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ องศา
2. ปรับมุมนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าที่ Substation B ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$ ตลอดการทดสอบ
3. บันทึกผลการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าและรูปสัญญาณต่างๆ
4. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

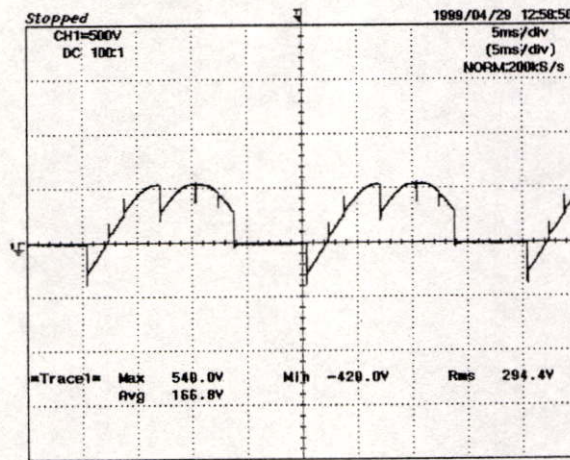


รูปที่ 5.42 จุดทดสอบและวัคสัญญาณไฟฟ้าโดยปรับ $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ และ $\gamma = 140^\circ$

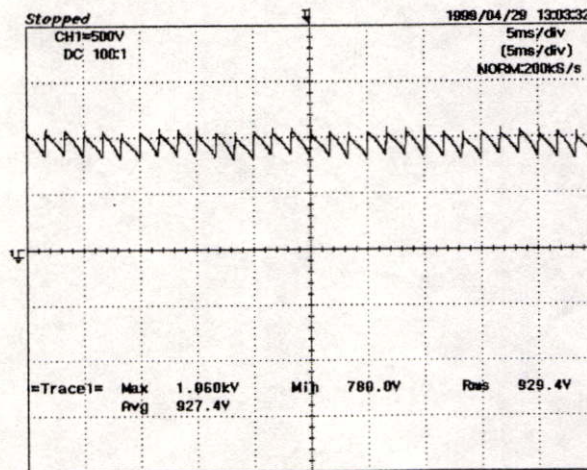
จากรูปที่ 5.43 เป็นสัญญาณแรงดันตกคร่อม SCR ที่ทำงานในโหมดเรกติฟายมุมนำกระแส $\alpha = 25^\circ$ ในการเริ่มทำการทดสอบ จะทำการปรับมุมนำกระแสชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในโหมดเรกติฟายที่มุม $\alpha = 25^\circ$ และชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$ คงที่ตลอดการทดสอบ หลังจากนั้นลดมุม α ลงจนถึง 5° เพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า ขดเซยกำลังไฟฟ้าให้กับ Substation B



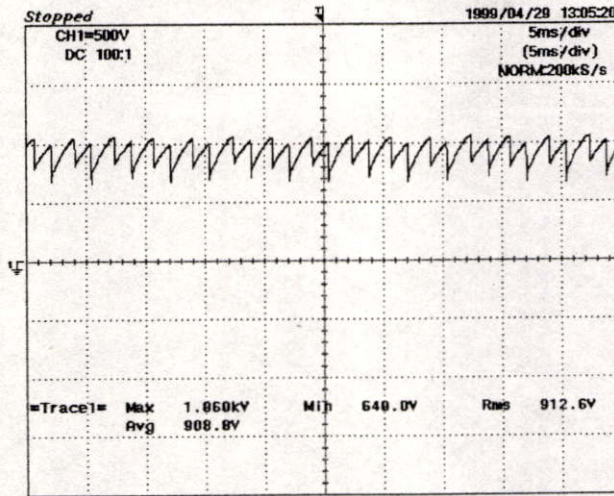
รูปที่ 5.43 แรงดันตกคร่อม SCR ทำงานในโหมดเรกติฟาย $\alpha=25^\circ$ องศา



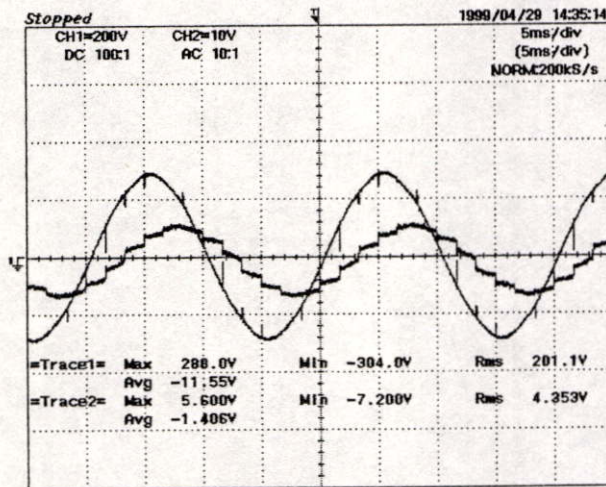
รูปที่ 5.44 แรงดันตกคร่อม SCR ทำงานในอินเวอร์เตอร์มูม $\gamma=140^\circ$



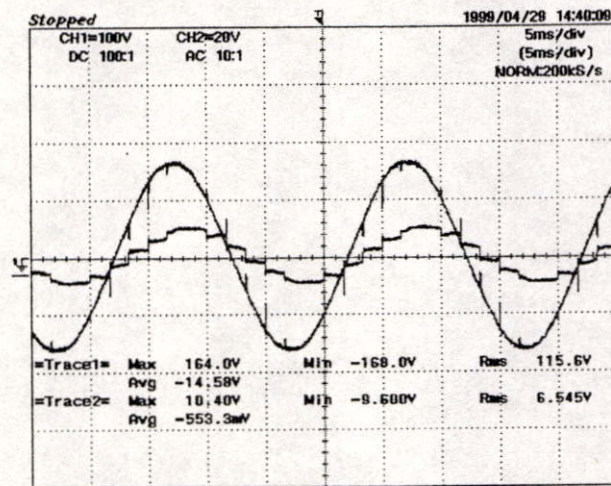
รูปที่ 5.45 แรงดันในสายส่งคิซิทิมูม $\alpha=25^\circ$



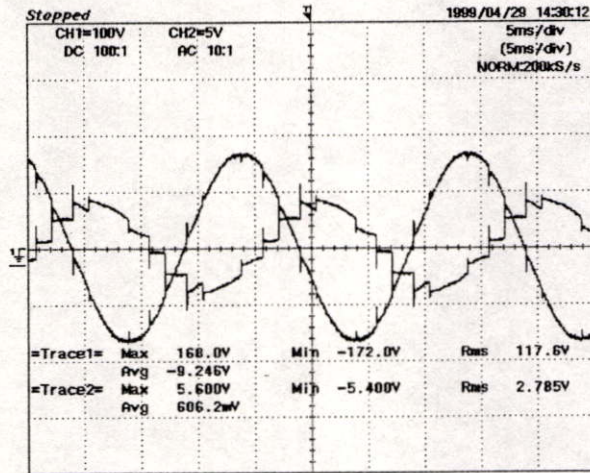
รูปที่ 5.46 แรงดันในสายส่งคี่ที่มีมุม $\gamma=140^\circ$



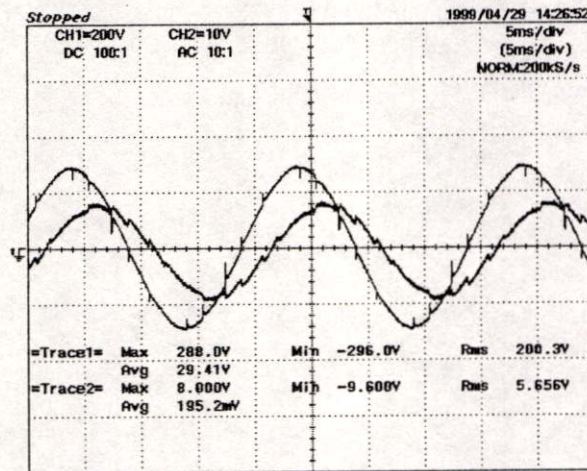
รูปที่ 5.47 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Line (V_{AB}) (จุดที่ 1)



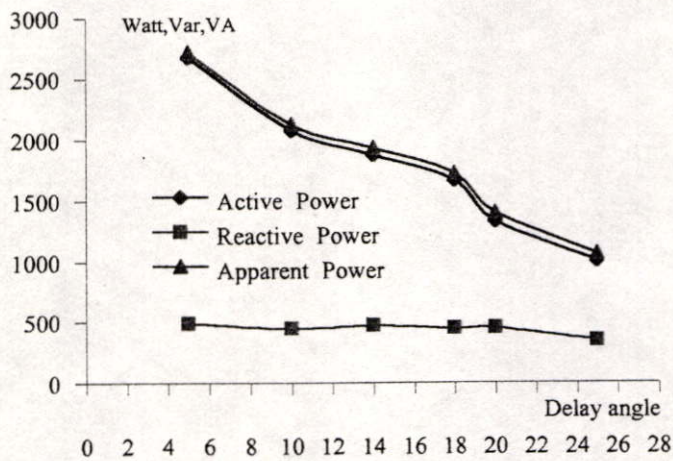
รูปที่ 5.48 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Phase (V_{AN}) (จุดที่ 2)



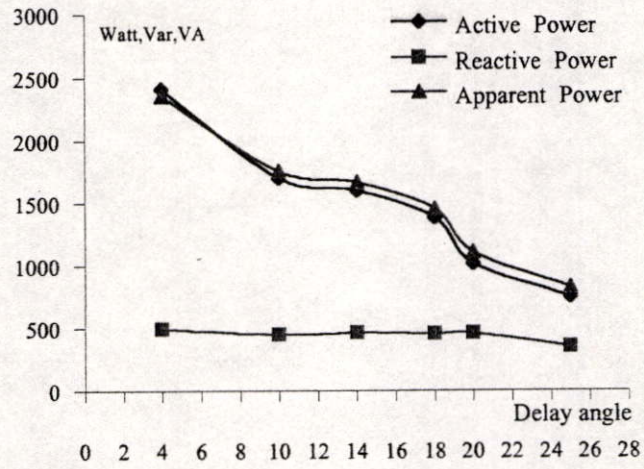
รูปที่ 5.49 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Phase (V_{AN}) (จุดที่ 3)



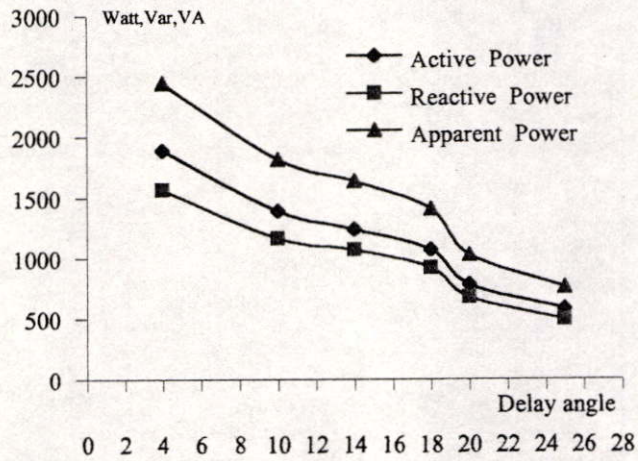
รูปที่ 5.50 สัญญาณกระแส Line (I_A) และแรงดัน Line (V_{AB}) (จุดที่ 4)



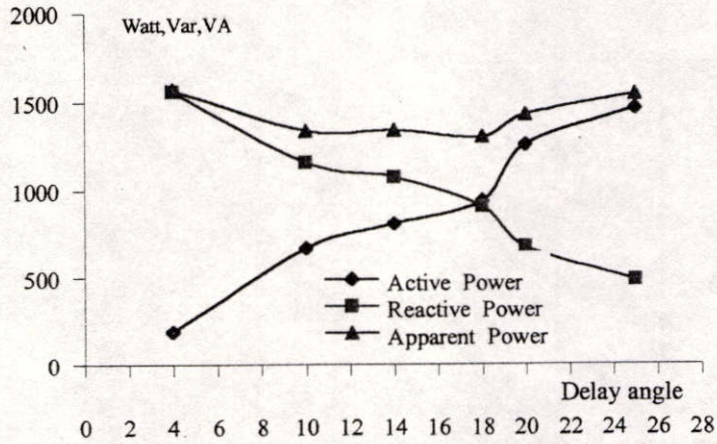
รูปที่ 5.51 กำลังไฟฟ้า P,Q,S ด้านส่งกำลังไฟฟ้า Substation A (จุดที่ 1)



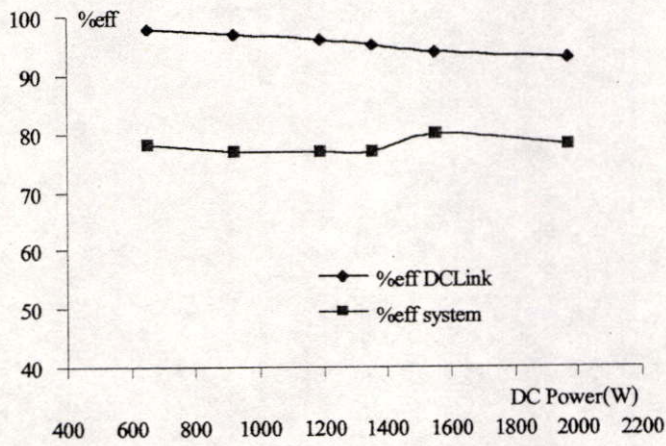
รูปที่ 5.52 กำลังไฟฟ้า P,Q,S ด้านส่งกำลังไฟฟ้า Converter A (จุดที่ 2)



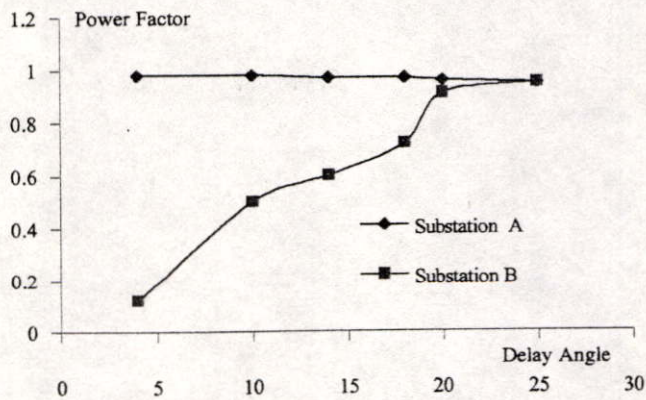
รูปที่ 5.53 กำลังไฟฟ้า P,Q,S ด้านรับกำลังไฟฟ้า Converter B (จุดที่ 3)



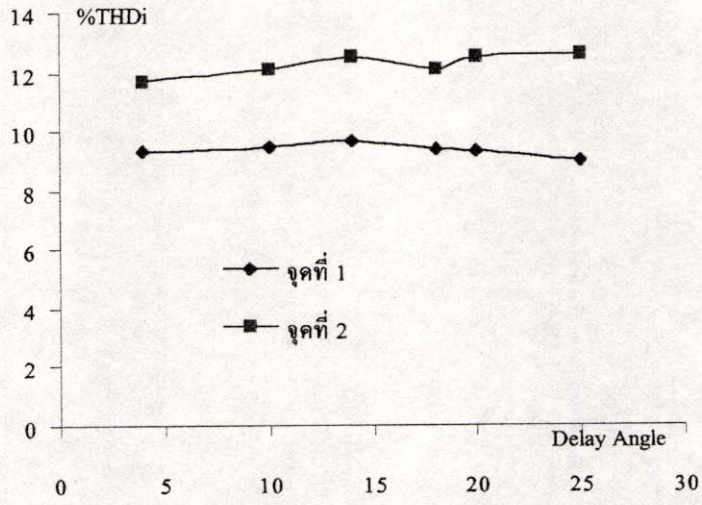
รูปที่ 5.54 กำลังไฟฟ้า P,Q,S ด้านรับกำลังไฟฟ้า Substation B (จุดที่ 4)



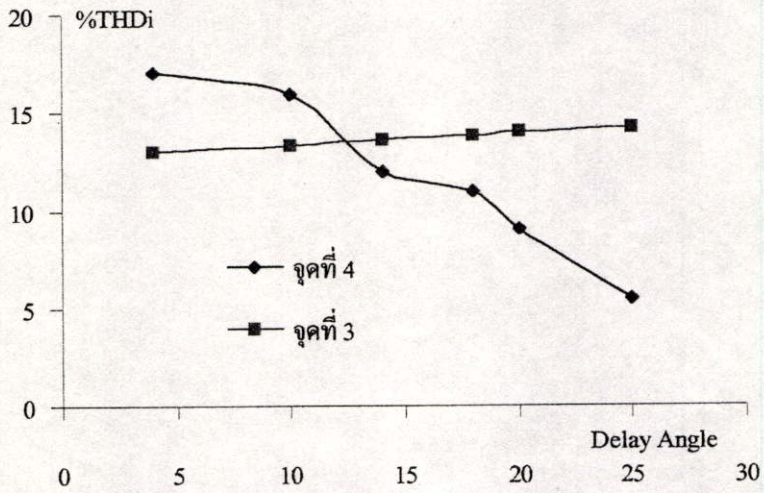
รูปที่ 5.55 ประสิทธิภาพของระบบและสายส่งกำลังไฟฟ้า



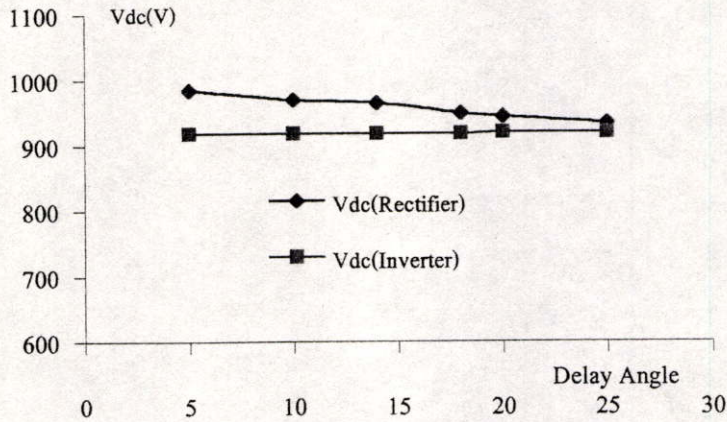
รูปที่ 5.56 Power Factor ด้านรับและส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5.57 %THDi ด้านส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5.58 %THDi ด้านรับกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5.59 แรงดันคิซีในสายส่งด้านส่งและรับกำลังไฟฟ้า

5.4.2 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าโดยการปรับมุมนำกระแส(α)ด้านส่งกำลังไฟฟ้าระหว่าง 5-25 องศา และด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส (γ) =140 องศา คงที่ตลอดการทดสอบ โดยการที่คงค่ามุมนำกระแสทางด้านรับกำลังไฟฟ้าสามารถจำกัดพิคของแรงดันไฟฟ้าในสายส่งไฟฟ้าได้ ในการทดสอบนี้จะควบคุมแรงดันในสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ 920 V_{DC} ตลอดการทดสอบตามตารางภาคผนวก ข. และในการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการปรับมุมนำกระแสทางซูดคอนเวอร์เตอร์ด้านส่งกำลังไฟฟ้าให้มีค่าลง ซึ่งจะเป็นผลทำให้แรงดันคิซีทางด้านส่งกำลังไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น กระแสในสายส่งกำลังไฟฟ้ามากขึ้นจึงจะสามารถเพิ่มขนาดกำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยัง Substation B เพื่อช่วยจ่ายโหลดได้ต่อไป

จากรูปที่ 5.51 และ 5.52 เป็นกราฟด้านส่งกำลังไฟฟ้าที่ Substation A พบว่าเมื่อปรับมุมนำกระแสทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้กำลังไฟฟ้า Active Power ไหลเข้าสู่ระบบคิซีฟายมากขึ้นแต่มุมนำกระแสต่ำลงทำให้ค่า Reactive Power มีค่าต่ำไม่มากนัก

และทางด้านรับกำลังไฟฟ้าที่ Substation B จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระโหลดได้ต่ำลงเนื่องมาจากมีกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งจากด้าน Substation A มาช่วย ตามรูปที่ 5.53 และ 5.54 จะเห็นว่าค่า Reactive Power ที่จ่ายออกจาก Substation B มีค่าสูงขึ้นมากเป็นผลมาจาก Reactive Power ไหลเข้าสู่คิซีอินเวอร์เตอร์ โดยค่า Reactive Power นี้ปริมาณขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ส่งเข้าไปช่วย Substation B ขณะที่จ่ายภาระโหลดโหลด

เมื่อพิจารณาในส่วนของ %THDi ในรูปที่ 5.57 จะเห็นว่า%THDi ของ Substation A จะมีค่าต่ำกว่า %THDi ที่ด้านเอชของซูดเรคคิฟาย เนื่องมาจากสัญญาณกระแสของ Substation A เกิดจากสัญญาณ 12 Step ที่ไหลเข้าสู่คิซีเรคคิฟายรวมกับสัญญาณกระแสไหลกลับความต้านทาน ทำให้กระแสที่ไหลออกจาก Substation A ใกล้เคียงสัญญาณชายน่มากขึ้น

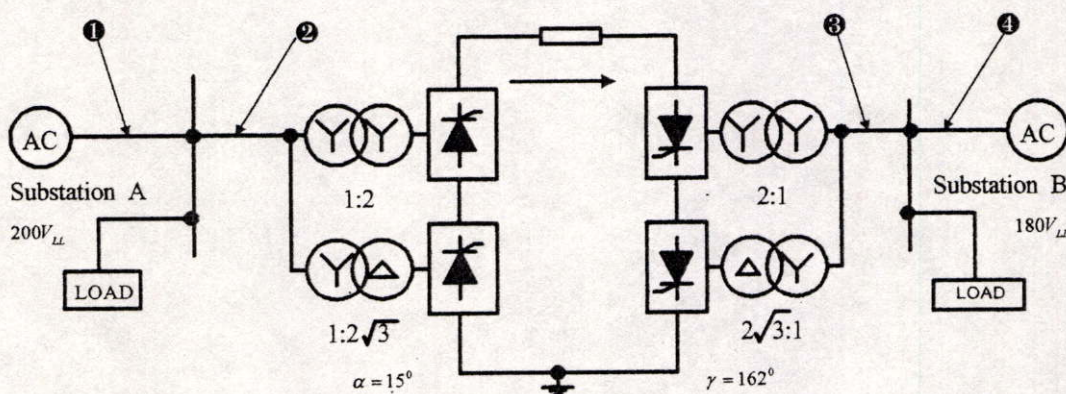
เมื่อพิจารณาในส่วนด้านรับกำลังไฟฟ้า Substation B ในรูปที่ 5.58 จะเห็นว่าค่า %THDi ทางด้านรับกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นมากเมื่อปรับมุมนำกระแสทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าต่ำลง เนื่องมาจากสัญญาณกระแสที่ Substation B เกิดจากสัญญาณ 12 Step ที่ไหลออกจากชุดอินเวอร์เตอร์ลบกับสัญญาณกระแส Fundamental ของโหลดความต้านทาน เป็นผลทำให้สัญญาณกระแสของ Substation B มีค่า %THDi มากขึ้นโดยขึ้นอยู่กับ ขนาดของกระแสที่ออกจากชุดอินเวอร์เตอร์ด้วย

5.5 การทดสอบที่แรงดันแตกต่างกันความถี่เท่ากัน

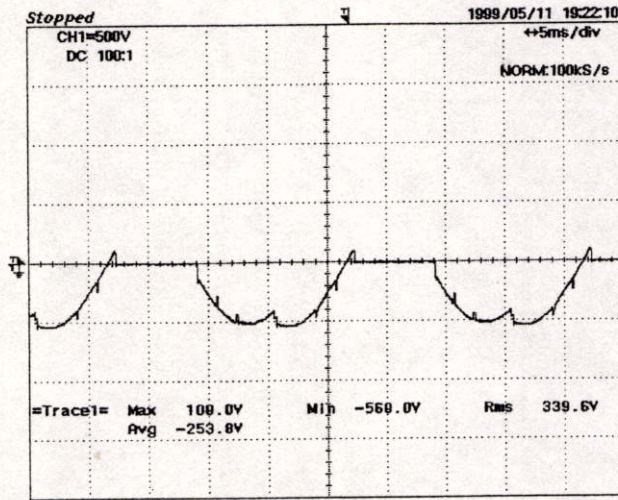
ในการทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าที่แรงดันแตกต่างกัน กำหนดให้แรงดันทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า (Substation A) มีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และแรงดันทางด้านรับกำลังไฟฟ้า (Substation B) มีค่าเท่ากับ $180 V_{LL}$ โดยขณะทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องปรับมุมนำกระแสชุกคอนเวอร์เตอร์ (α) ไว้ที่ 15 องศา เนื่องจากต้องการลดแรงดันคิซีให้ต่ำลงเพราะว่าด้านส่งกำลังไฟฟ้ามีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงกว่าด้านรับ แต่ถ้าหากปรับมุมนำกระแสไว้ที่มุม 5 องศา จะทำให้ความแตกต่างของแรงดันในสายส่งกำลังไฟฟ้ามีค่ามาก จากนั้นปรับมุมนำกระแสชุกคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้า (γ) ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ ที่มุม 162 องศา เพื่อทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B

5.5.1 ลำดับขั้นการทดสอบ

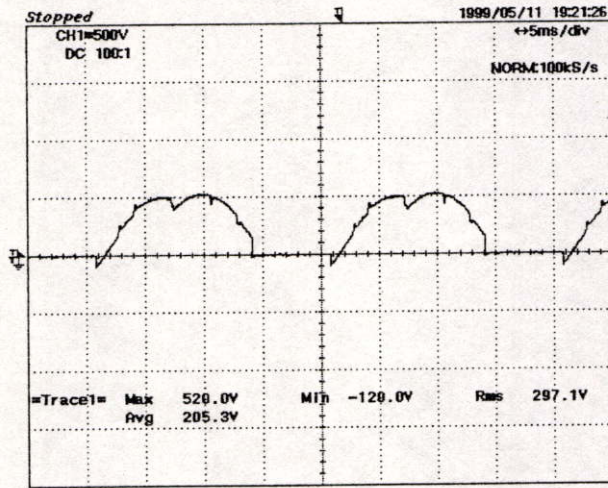
1. ปรับแรงดันที่ Substation A ให้มีแรงดัน $200 V_{LL}$ และ Substation B มีแรงดัน $180 V_{LL}$
2. ปรับมุมนำกระแสของชุกคอนเวอร์เตอร์ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าที่มุม 15 องศา และปรับมุมนำกระแสชุกคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้า (γ) ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ ที่มุม 162 องศา
3. บันทึกผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าและรูปสัญญาณต่างๆ
4. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ



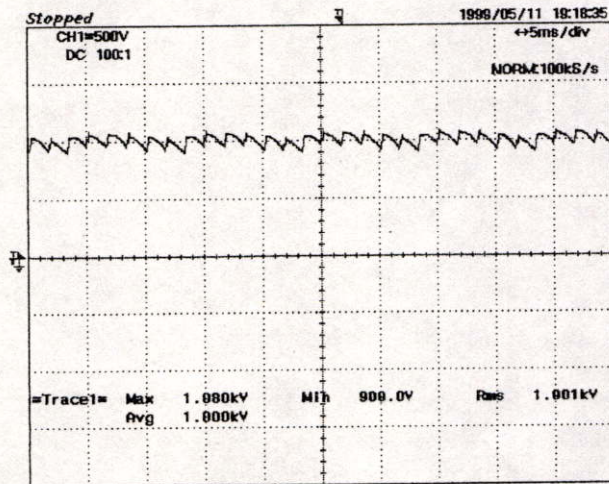
รูปที่ 5.60 จุดทดสอบและตำแหน่งต่างๆของการวัดรูปสัญญาณ



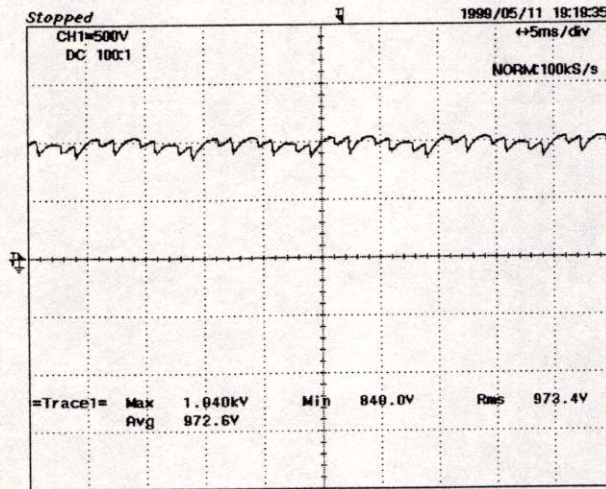
รูปที่ 5.61 แรงดันตกคร่อม SCR ในโหมดครกติฟาย $\alpha=15$ องศา



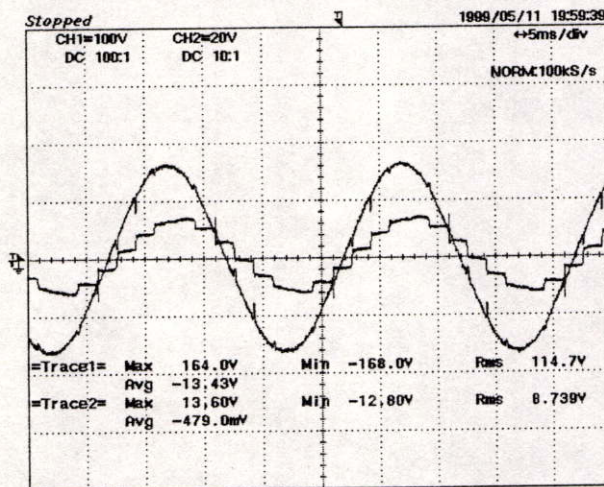
รูปที่ 5.62 แรงดันคร่อม SCR ในโหมดอินเวอร์เตอร์ $\gamma=162$ องศา



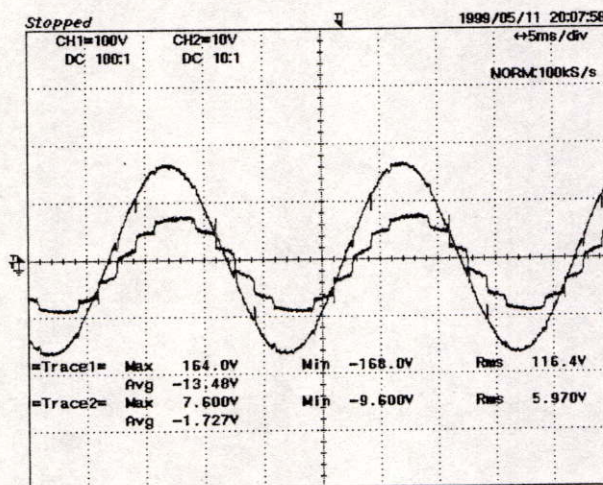
รูปที่ 5.63 แรงดันคิซึคิอันส่งกำลังไฟฟ้า



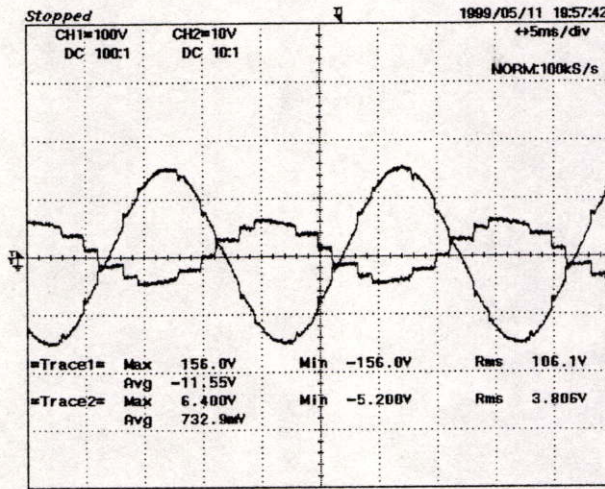
รูปที่ 5.64 แรงดันคิซีด้านรับกำลังไฟฟ้า



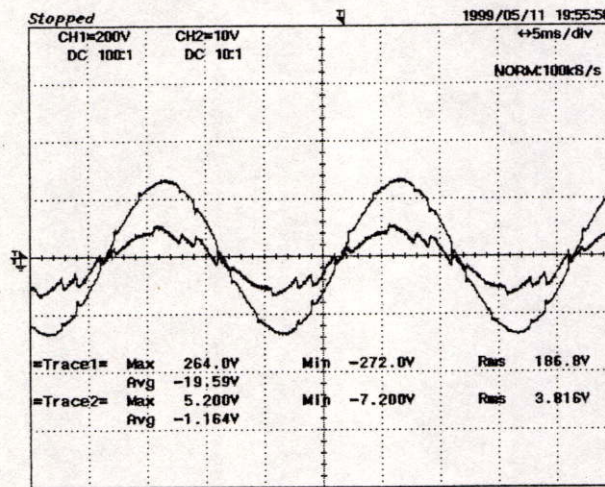
รูปที่ 5.65 แรงดันและกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1)



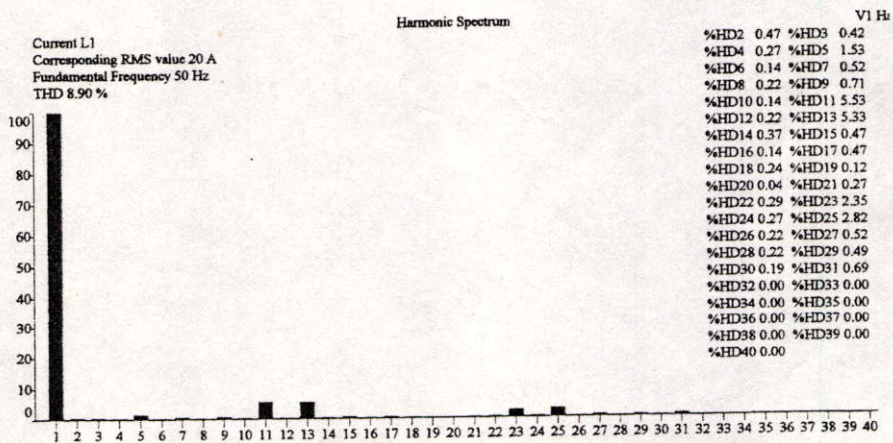
รูปที่ 5.66 แรงดันและกระแสด้านชุดคอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2)



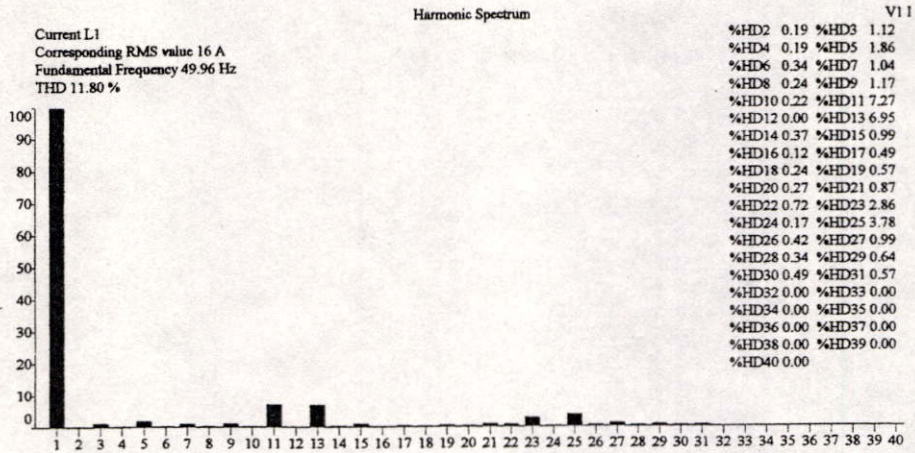
รูปที่ 5.67 แรงดันและกระแสด้านชุดคอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3)



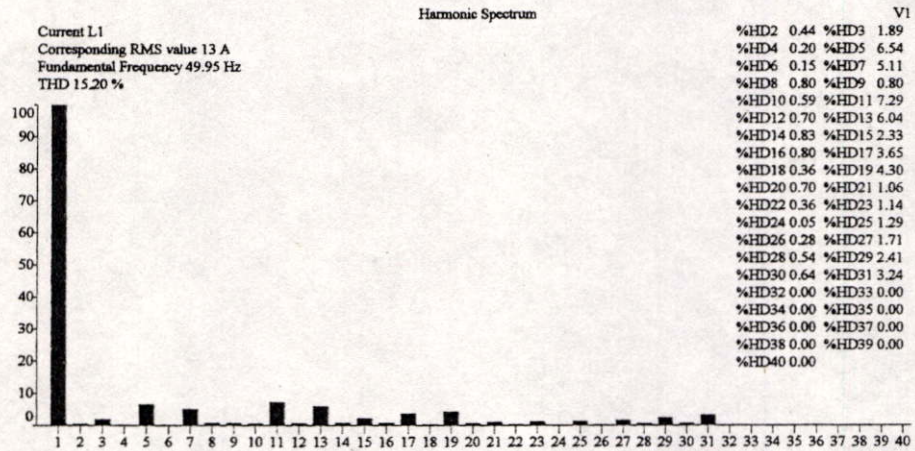
รูปที่ 5.68 แรงดันและกระแสระบบเอชี่ด้านรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 4)



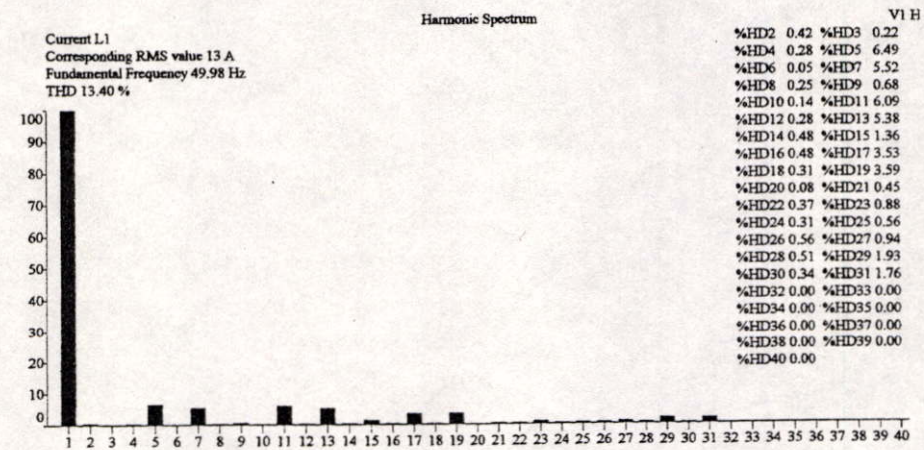
รูปที่ 5.69 Harmonic Spectrum กระแส ที่ Substation A ขณะส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 1)



รูปที่ 5.70 Harmonic Spectrum กระแส ที่ คอนเวอร์เตอร์ A ขณะส่งกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 2)



รูปที่ 5.71 Harmonic Spectrum กระแส ที่ คอนเวอร์เตอร์ B ขณะรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 3)



รูปที่ 5.72 Harmonic Spectrum กระแส ที่ Substation B ขณะรับกำลังไฟฟ้า (จุดที่ 4)

ตารางที่ 5.5 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันแตกต่างกันและ
ความถี่เท่ากัน

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I_L	4.9A	3.67A	3.2A	3.03A
V_{LL}	198V	198V	180V	180V
PF	0.99	0.94	0.91	0.94
P	1660W	1180W	920W	887W
Q	274VAR	423VAR	415VAR	318VAR
S	1690VA	1260VA	1000VA	940VA
%THDi	8.80%	11.80%	15.10%	13.40%
%THDv	3.70%	2.70%	4.10%	3.30%
DC Link				
I_{DC}	V_{DC1}	V_{DC2}	P_{DC}	
1.1A	990V	973V	1100W	

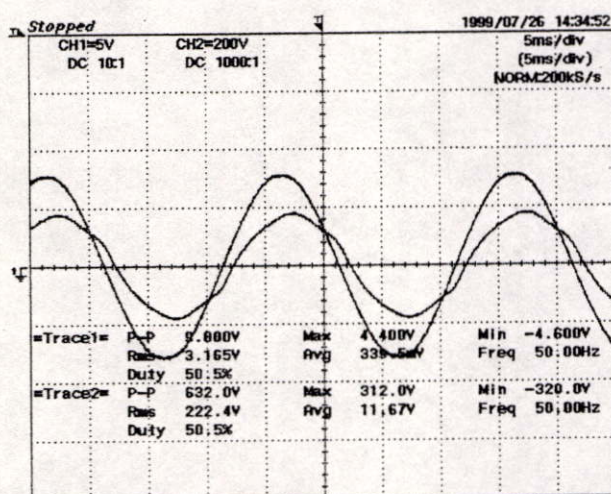
5.5.2 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทั้งด้านส่ง และด้านรับแตกต่างกัน โดยที่ระบบเอชดีด้านส่งกำลังไฟฟ้ามี่ค่า $200V_{LL}$ และด้านรับกำลังไฟฟ้ามี่ค่า $180V_{LL}$ จะพบว่าเมื่อปรับมุนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านส่งที่มุน 5 องศา จะทำให้แรงดันดีซีที่ออกจากชุดเรกติฟายมีค่าสูงมาก ดังนั้นเมื่อปรับมุนำกระแสของชุดอินเวอร์เตอร์ที่ 162 องศา จะเป็นผลทำให้เกิดค่าความแตกต่างของแรงดันดีซีมาก ทำให้กำลังไฟฟ้าที่สายส่งดีซีมีค่ามากเกินไปก็คิดที่ตั้งไว้คือ 3,000W ดังนั้นจึงต้องลดมุนำกระแสของชุดเรกติฟายให้มีค่าต่ำลง

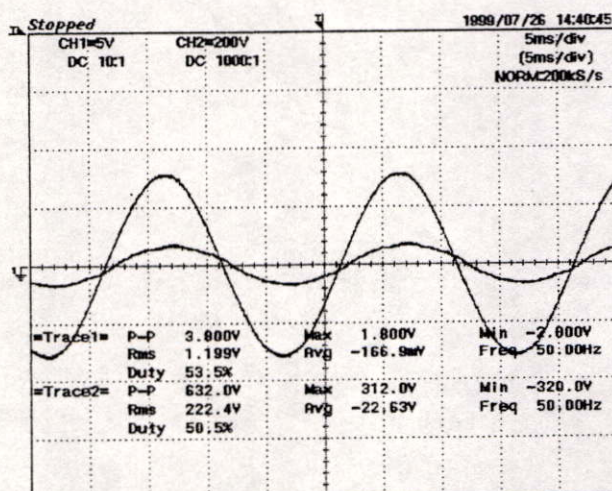
ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแตกต่างกันสามารถทำได้โดยกำหนดแรงดันดีซีด้านส่งกำลังไฟฟ้าให้มีค่าสูงกว่าด้านรับเสมอ โดยการปรับมุนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ทั้งทางด้านรับและส่งกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบขณะไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้า

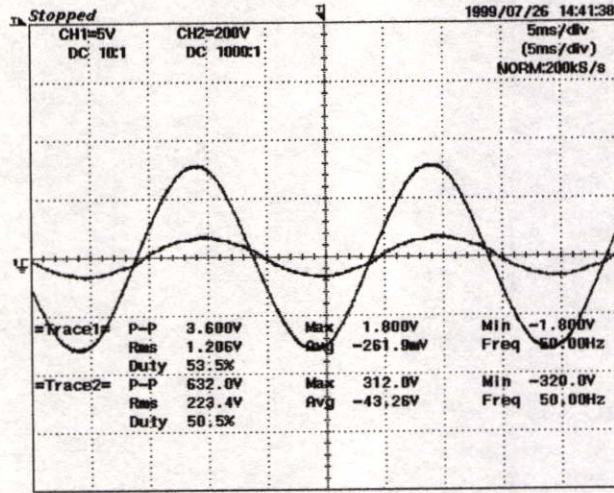
รายการ	จุดที่ 1	จุดที่ 3	จุดที่ 2	โหลด A	โหลด B
V_{LL}	390V	390V	390V	200V	200V
I_L	4.06A	0.6A	3.68A	0.89	5.89A
PF	0.97	0.74	0.98	1	1
P	2810W	320W	2530W	300W	2070W
Q	740Var	315Var	450Var	-	-
S	2890VA	450VA	2560VA	300VA	2070VA



รูปที่ 5.74 แรงดันและกระแส จุดที่ 1 ขณะไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5.75 แรงดันและกระแส จุดที่ 3 ขณะไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้า

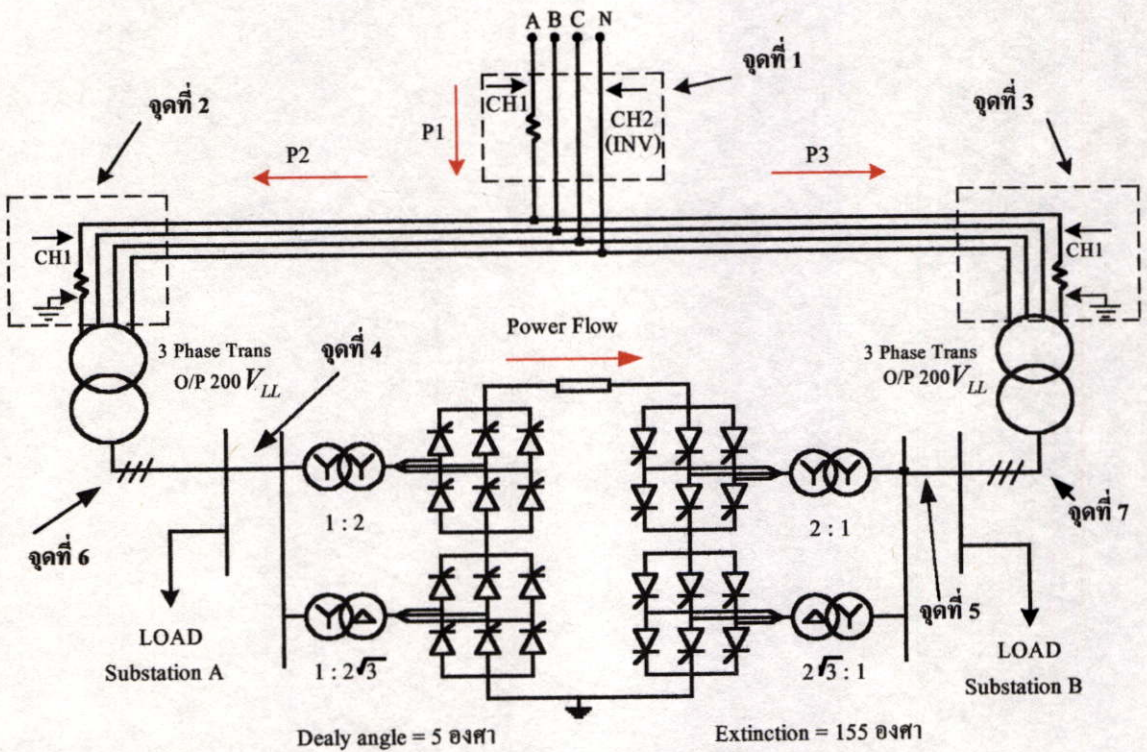


รูปที่ 5.76 แรงดันและกระแส จุดที่ 2 ขณะไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้า

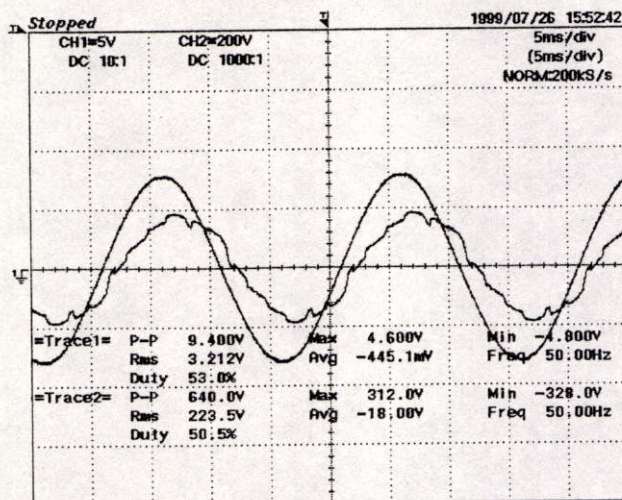
5.6.2 การทดสอบขณะส่งกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลด

ลำดับขั้นการทดสอบ

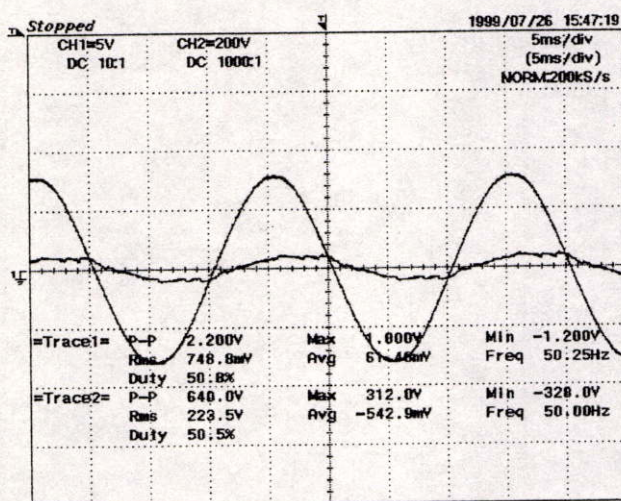
- ปรับมุนำกระแสทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 5 องศา
- ปรับมุนำกระแสทางด้านรับกำลังไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 155 องศา
- บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดต่างๆตามรูปที่ 5.78-5.80



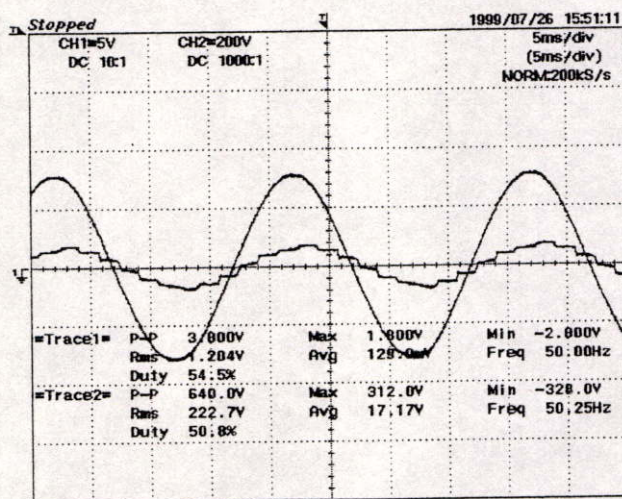
รูปที่ 5.77 วงจรการทดสอบรวมทั้งระบบขณะส่งกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลดทางด้านรับ



รูปที่ 5.78 แรงดันและกระแส จุดที่ 1 ขณะส่งกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลด



รูปที่ 5.79 แรงดันและกระแส จุดที่ 2 ขณะส่งกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลด



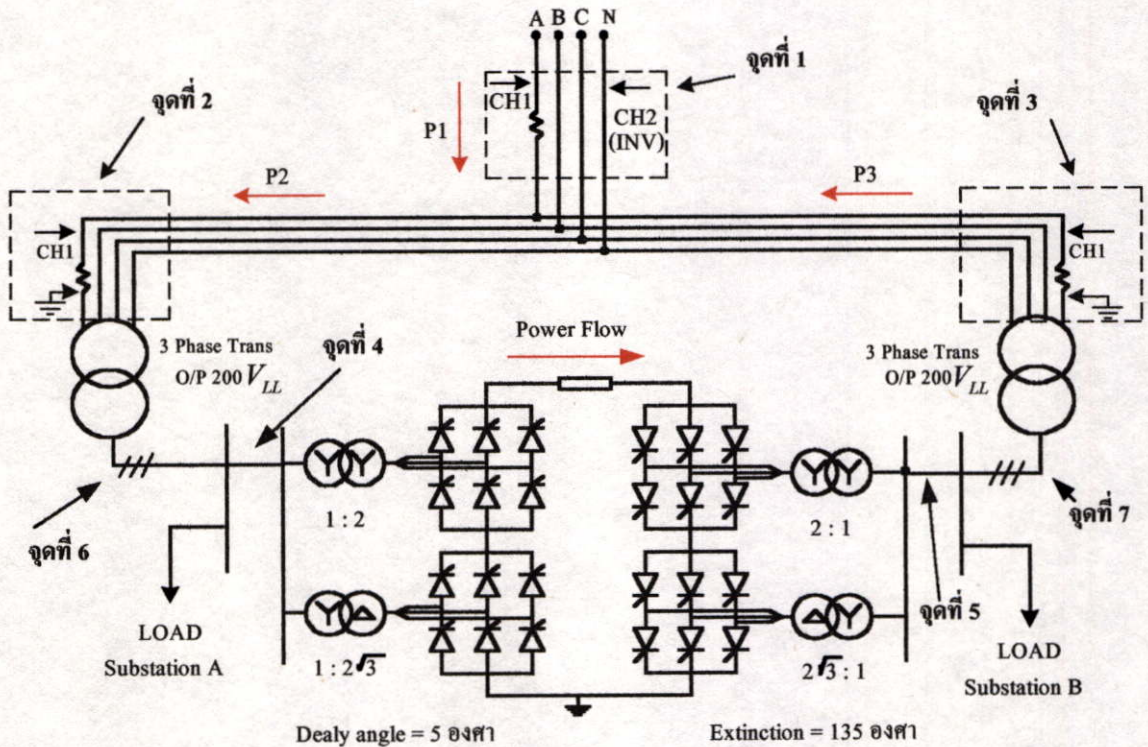
รูปที่ 5.80 แรงดันและกระแส จุดที่ 3 ขณะส่งกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลด

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบขณะส่งกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าโหลด

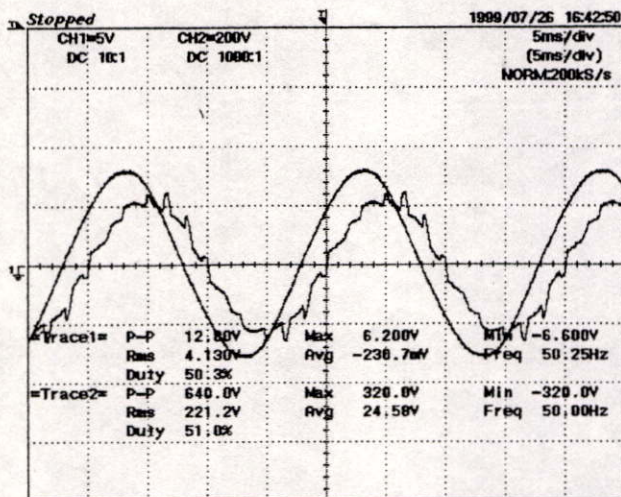
รายการ	จุดที่ 1	จุดที่ 3	จุดที่ 2	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	โหลด A	โหลด B
V_{LL}	390V	390V	390V	200V	200V	200V	200V	200V	200V
I_L	4.62A	2.23A	2.44A	4.1A	3.78A	4.33A	4.03	0.8	5.94A
PF	0.92	0.86	0.97	0.96	-0.81	0.96	0.87	0.99	0.99
P	3050W	1380W	1710W	1430W	1090W	1600W	1310W	290W	2120W
Q	1300Var	800Var	448Var	400Var	800Var	438Var	740Var	-	-
S	3300VA	1600VA	1760VA	1470VA	1350VA	1760	1500VA	290W	2120W

5.6.3 การทดสอบขณะส่งกำลังไฟฟ้ามากกว่าโหลดทางด้านรับ ลำดับขั้นการทดสอบ

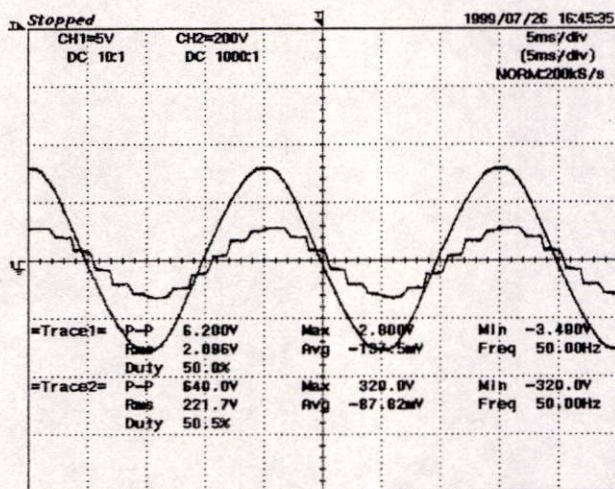
- ปรับมมำกระแสทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 5 องศา
- ปรับมมำกระแสทางด้านรับกำลังไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 135 องศา
- บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ตามรูปที่ 5.82-5.85



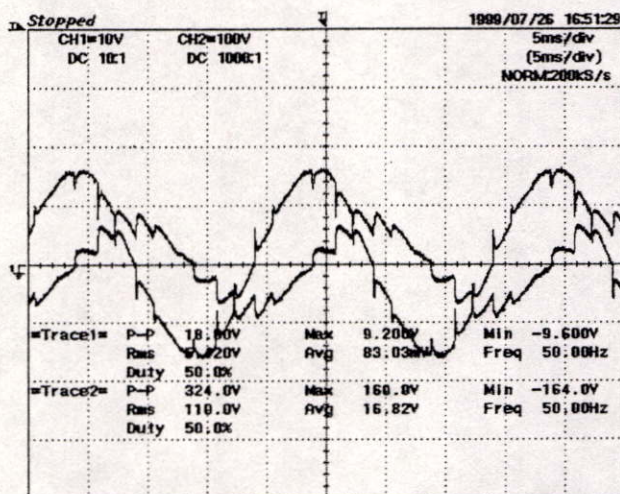
รูปที่ 5.81 วงจรการทดสอบรวมทั้งระบบขณะส่งกำลังไฟฟ้ามากกว่าโหลด



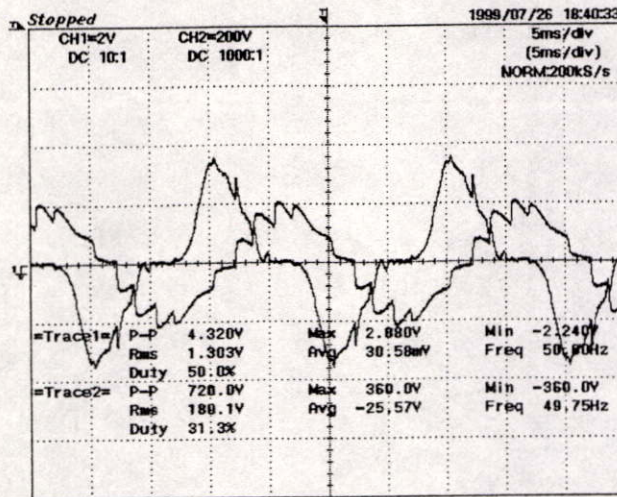
รูปที่ 5.82 แรงดันและกระแส จุดที่ 1 ขณะส่งกำลังไฟฟ้ามากกว่าโหลด



รูปที่ 5.83 แรงดันและกระแส จุดที่ 2 ขณะส่งกำลังไฟฟ้ามากกว่าโหลด



รูปที่ 5.84 แรงดันและกระแส จุดที่ 3 ขณะส่งกำลังไฟฟ้ามากกว่าโหลด



รูปที่ 5.85 แรงดันและกระแส จุดที่ 7 ขณะส่งกำลังไฟฟ้ามากกว่าโหลด

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบขณะส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ามากกว่าโหลด

รายการ	จุดที่ 1	จุดที่ 3	จุดที่ 2	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	โหลด A	โหลด B
V_{LL}	390V	390V	390V	200V	200V	200V	200V	200V	200V
I_L	7A	3.54A	6A	10.9A	10A	11.9A	7.16	0.85	5.89A
PF	0.75	-0.1	0.97	0.97	-0.72	0.98	-0.16	0.99	0.99
P	3728W	380W	4133W	3686W	2492W	4039W	400W	312W	2100W
Q	3287Var	2483Var	849Var	817Var	2406Var	821Var	2450Var	-	-
S	4970VA	2512VA	4260VA	3775VA	3464VA	4122VA	2482VA	312W	2100W

5.6.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ผลการทดสอบตามตารางที่ 5.7 พบว่าเมื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปช่วย Substation B จ่ายโหลด โดยที่เงื่อนไขแรกให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปต่ำกว่าโหลดที่ Substation B จะพบว่ากำลังไฟฟ้าจุดที่ 2 และจุดที่ 3 รวมกันจะได้ออกเท่ากับกำลังไฟฟ้าจุดที่ 1 เมื่อพิจารณาค่านส่งกำลังไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าจุดที่ 6 เมื่อหักล้างกับกำลังไฟฟ้าที่โหลด Substation A จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าจุดที่ 4 และเมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าด้านรับจะพบว่า กำลังไฟฟ้าจุดที่ 5 รวมกับกำลังไฟฟ้าจุดที่ 7 จะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลด Substation B แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่มาจาก Substation A สามารถช่วยจ่ายโหลดที่ Substation B ได้จริง

กรณีที่ทดสอบส่งกำลังไฟฟ้ามากกว่าโหลดที่ Substation B ตามผลการทดสอบตารางที่ 5.8 และ ตามรูปที่ 5.81 กำลังไฟฟ้าจุดที่ 2 จะเท่ากับกำลังไฟฟ้า จุดที่ 1 รวมกับจุดที่ 3 เมื่อพิจารณา

ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าจุดที่ 4 จะเท่ากับจุดที่ 6 หักล้างกับกำลังไฟฟ้าที่โหลด Substation A และทางด้านรับกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจุดที่ 7 จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าจุดที่ 5 หักล้างกับโหลดที่ Substation B

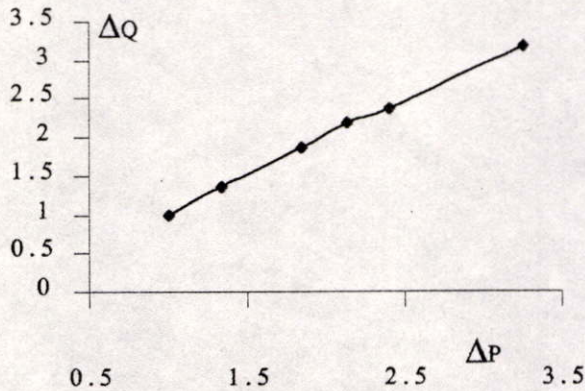
โดยเมื่อพิจารณาการส่งกำลังไฟฟ้าที่มากกว่าโหลดที่ Substation B จะทำให้มุมต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันมีค่ามากกว่า 90 องศาจึงทำให้สัญญาณกระแสในจุดที่ 3 และจุดที่ 7 กลับทิศทางการไหล ตามรูปที่ 5.84 และ 5.85 ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งมาจาก Substation A ไปช่วยจ่ายโหลดที่ Substation B และส่วนที่เหลือก็จะไหลผ่านหม้อแปลงที่จำลองเป็น Substation B

และเมื่อพิจารณาจุดที่ 1 กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 3728W ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากำลังไฟฟ้าในจุดที่ 2 โดยผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่โหลดของ Substation A และ substation B รวมกับ Loss ทั้งหมดในระบบจะพบว่า เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จุดที่ 1 นั้นหมายความว่ากำลังไฟฟ้าที่จุดที่ 1 จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดในระบบ ซึ่งในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่มากกว่าโหลดนี้ กำลังไฟฟ้าที่ส่งมาจาก Substation A ถ้ามีค่ามากกว่าที่โหลด Substation B จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าไหลวนอยู่ในระบบตามรูปที่ 5.81

จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อจำลองให้ Substation B เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ามากกว่าโหลดทางด้านรับกำลังไฟฟ้าจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนสถานะจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปเป็นมอเตอร์

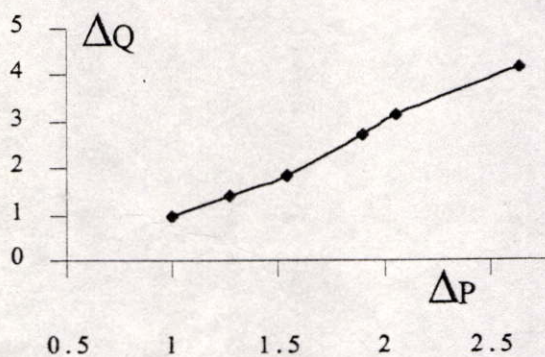
5.7 การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเสมือนในชุดอินเวอร์เตอร์

จากการทดสอบในหัวข้อ 5.3 และ 5.4 ที่ผ่านมาเป็น การทดสอบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า โดยไม่ติดตั้งชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนและชุดฟิลเตอร์ฮาร์โมนิกส์ เมื่อพิจารณาในเงื่อนไขการทดสอบโดยการปรับมุม α และมุม γ พบว่าการทดสอบที่ปรับมุมนำกระแส $5^\circ < \alpha < 25^\circ, \gamma = 140^\circ$ ทางด้านชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ จะมีอัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับกำลังไฟฟ้าเสมือนตามรูปที่ 5.86 มีอัตราการเพิ่มเท่ากัน



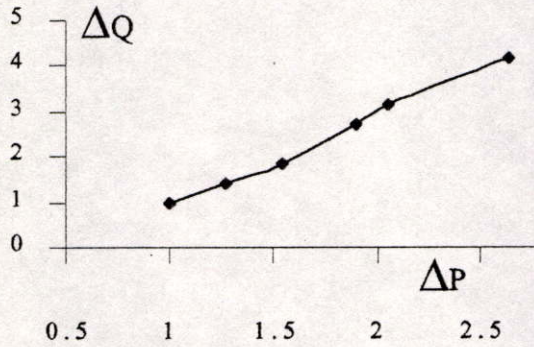
รูปที่ 5.86 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าเสมือนกรณี $5^\circ < \alpha < 25^\circ, \gamma = 140^\circ$ ด้านชุดอินเวอร์เตอร์ (จุดทดสอบที่ 3)

และทางด้านชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในสภาวะเรกติฟาย จะมีอัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับกำลังไฟฟ้าเสมือนตามรูปที่ 5.87 เมื่อทำการเพิ่มกำลังการส่งไฟฟ้า(P)มากขึ้นอัตราส่วนของการเพิ่มกำลังไฟฟ้าเสมือน(Q)จะค่อนข้างคงที่

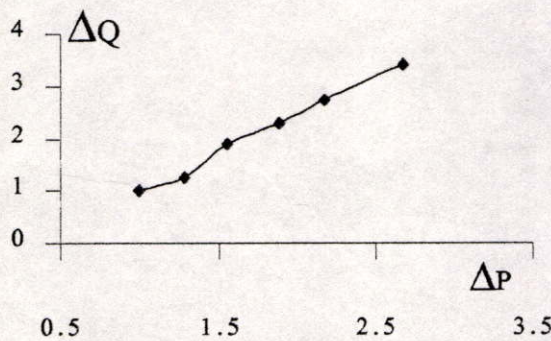


รูปที่ 5.87 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าเสมือนกรณี $5^\circ < \alpha < 25^\circ, \gamma = 140^\circ$ ด้านชุดเรกติฟาย (จุดทดสอบที่ 2)

และเมื่อทำการพิจารณาการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า แบบปรับมุมนำกระแส $\alpha=5^\circ, 136^\circ < \gamma < 150^\circ$ พบว่ากำลังไฟฟ้าทางด้านรับกำลังไฟฟ้า เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าจริง(P) ให้มีค่ามากขึ้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่ามากขึ้น เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนแล้วพบว่า กำลังไฟฟ้าเสมือนจะมีค่ามากกว่าการเพิ่มของค่ากำลังไฟฟ้าจริง



รูปที่ 5.88 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าเสมือนกรณี $\alpha=5^\circ, 136^\circ < \gamma < 150^\circ$ ด้านซูดอินเวอร์เตอร์ (จุดทดสอบที่ 3)



รูปที่ 5.89 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าเสมือนกรณี $\alpha=5^\circ, 136^\circ < \gamma < 150^\circ$ ด้านซูดเรคตีฟาย (จุดทดสอบที่ 2)

เมื่อพิจารณาทางซูดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าตามรูปที่ 5.89 อัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับกำลังไฟฟ้าเสมือน จะมีอัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่ามากกว่าการเพิ่มของค่ากำลังไฟฟ้าจริง

5.7.1 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่า การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่ควบคุมแบบ $5^{\circ} < \alpha < 25^{\circ}$, $\gamma = 140^{\circ}$ อัตราการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับกำลังไฟฟ้าเสมือนทางด้านรับกำลังไฟฟ้า (อินเวอร์เตอร์) จะเป็นสัดส่วนเดียวกัน ซึ่งจะสามารถออกแบบชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยให้มีสัดส่วนเดียวกันกับกำลังไฟฟ้าจริง และเมื่อพิจารณาทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า อัตราการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือนจะคงที่เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าจริง และเมื่อพิจารณาการควบคุมแบบ $\alpha = 5^{\circ}$, $136^{\circ} < \gamma < 150^{\circ}$ อัตราการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือนจะมีค่าสูงกว่าอัตราการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงทั้งทางด้านรับและด้านส่งกำลังไฟฟ้า

ดังนั้นในทางปฏิบัติควรจะมีการควบคุมแบบคงค่ามุมนำกระแส γ จะทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน และสามารถออกแบบชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ง่ายกว่า ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บทที่ 6

บทสรุปและวิเคราะห์ผล

ในการเชื่อมโยงระบบกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งที่อยู่ห่างไกลกัน โดยทั่วไปถ้าความถี่ของทั้งสองระบบเท่ากัน สามารถเชื่อมโยงได้ด้วยสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ถ้าหากความถี่ของทั้งสองระบบไม่เท่ากันก็ไม่สามารถเชื่อมโยงด้วยสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการเชื่อมโยงระบบกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่ง โดยใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรือแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปตามสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยในการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจะใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมมูนนำกระแสของชุดคอนเวอร์เตอร์ขณะส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถสรุปการทดสอบได้เป็นหัวข้อใหญ่ๆ ได้ดังนี้

6.1 การออกแบบชุดการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

ในการออกแบบชุดส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ามีส่วนสำคัญอยู่ 3 ส่วนคือ

- ชุดคอนเวอร์เตอร์ ชุดคอนเวอร์เตอร์นี้จะประกอบไปด้วย 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ 2 ชุด ต่ออนุกรมกันเป็น 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ ในการเลือกใช้ชุด 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์นี้ก็เพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นและลด %THDi ของระบบเอซีให้ต่ำลง เมื่อเทียบกับ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์
- ชุดหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ ในการนำเอาชุด 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์มาต่ออนุกรมกันเพื่อทำเป็น 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ จะต้องใช้หม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์เพื่อชัฟเฟิลของชุด 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ให้มีมุมแตกต่างกันอยู่ 30 องศาจึงจะสามารถสร้างเป็น 12 พัลส์ได้ โดยชุด 6 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ จะต่ออยู่กับหม้อแปลง สตาร์/สตาร์ และ 6 พัลส์ อีกชุดหนึ่งจะต่ออยู่กับหม้อแปลง สตาร์/เดลต้า ในการนำสัญญาณแรงดันมาสร้างชุดทริก SCR จะต้องนำสัญญาณ V_{LL} จากหม้อแปลงมาเข้าสู่ชุด TCA 785 มิฉะนั้นจะไม่สามารถควบคุมมูนนำกระแสของ ชุดคอนเวอร์เตอร์ให้นำกระแสที่มูน 180 องศาในโหมดอินเวอร์เตอร์ได้
- ชุดสมูทติงรีแอคเตอร์ เนื่องจากชุดรีแอคเตอร์นี้ต่ออยู่ทางด้านสายส่งกำลังไฟฟ้าดีซีของระบบ ดังนั้นการออกแบบควรจะให้ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำ เนื่องจากจะทำให้เกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กได้

6.2 การควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าโดยคอมพิวเตอรื

ในการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอรืนี้ จะเป็นเพียงการควบคุมมุมการนำกระแสของชุดไทรสเตอร์เท่านั้น ซึ่งในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องปรับมุมนำกระแสชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านส่งกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในสภาวะเรกติฟายและชุดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านรับกำลังไฟฟ้าให้ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ โดยในระหว่างการปรับมุมนำกระแสในสภาวะอินเวอร์เตอร์นี้จะมีขั้นตอนการทำงานอยู่ 3 ขั้นตอนคือขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้มุมนำกระแสเท่ากับ 150 องศา ระบบจะไม่มีกรส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจาก SCR แต่ละตัวได้รับแรงดัน Reverse Bias ขั้นตอนที่ 2 จะต้องทำการปรับมุมนำกระแสให้ต่ำลงอยู่ระหว่าง 90-120 องศาจึงจะทำให้ชุดคอนเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ได้ ซึ่งลักษณะการทำงานในแบบนี้จะทำให้เกิดมีกระแสไหลสูงในสายส่งกำลังไฟฟ้าขึ้นเนื่องมาจากผลต่างของแรงดันคิซีทางด้านรับและส่งกำลังไฟฟ้ามีค่ามาก และขั้นตอนที่ 3 จะต้องปรับมุมนำกระแสให้สูงขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 150 องศาเพื่อลดกระแสในสายส่งกำลัง ในการควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอรืนี้จะอาศัยความไวในการควบคุมการเปลี่ยนสภาวะโหมมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ ใน 3 ขั้นตอนดังกล่าวมา ซึ่งทำให้ระบบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าจุดทำงานได้อย่างรวดเร็ว และจะทำให้ระบบไม่เกิดความเสียหายขณะส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

6.3 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่แรงดันเอซีเท่ากัน และ ที่ความถี่แตกต่างกัน 50Hz และ 60Hz สามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ส่งถ่ายเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงไม่มีผลของความถี่เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยการควบคุมลำดับการทำงานของไทรสเตอร์ในชุดคอนเวอร์เตอร์ จะซิงโครไนซ์กับระบบเอซีที่ระบบ HVDC เชื่อมโยงอยู่

การทดสอบที่แรงดันระบบเอซีเท่ากันและความถี่เท่ากัน ไม่ว่าเงื่อนไขการทดสอบที่คองค่ามุม α หรือมุม γ จะพบว่าสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ส่งถ่ายได้ โดยขึ้นอยู่กับกรปรับแรงดันทางด้านคิซีทั้งทางด้านส่งกำลังไฟฟ้า และรับกำลังไฟฟ้า ให้มีค่าความแตกต่างกัน โดยแรงดันทางส่งกำลังไฟฟ้าจะต้องมีค่าสูงกว่าทางด้านรับกำลังไฟฟ้าเสมอ ซึ่งความแตกต่างนี้จะทำให้กระแสในสายส่งคิซีมีค่าสูงขึ้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ส่งถ่ายนี้จะขึ้นอยู่กับค่ากระแสในสายส่งกำลังไฟฟ้า

ในการทดสอบที่ 5.2 ,5.3 ,5.4 ,5.5 และ 5.6 สับสแตชัน B ที่อยู่ทางด้านรับกำลังไฟฟ้า โดยขณะที่ส่งกำลังไฟฟ้าจาก สับสแตชัน A ไปยัง สับสแตชัน B จะทำให้ สับสแตชัน B มีค่ากำลังไฟฟ้าจริงลดต่ำลง แต่กระแสในระบบมีค่ามากขึ้น เนื่องมาจากชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ มีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการควบคุมกระแสในสายส่งคิซีให้เพิ่มขึ้น ทำให้สับสแตชัน B ต้องจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเท่ากับชุดอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากภาวะโหมลที่ใช้ในการทดสอบเป็นตัวต้านทาน

และเมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับกำลังไฟฟ้าเสมือนในหัวข้อ 5.7 พบว่าในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าโดยการคงค่ามุม γ ไว้จะทำให้อัตราการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือนในชุดคอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่ำมาก เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าจริงในด้านเดียวกัน และเมื่อพิจารณาทางด้านรับกำลังไฟฟ้า เมื่อปรับมุมนำกระแส $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเสมือน เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าจริงเป็นสัดส่วนเดียวกัน

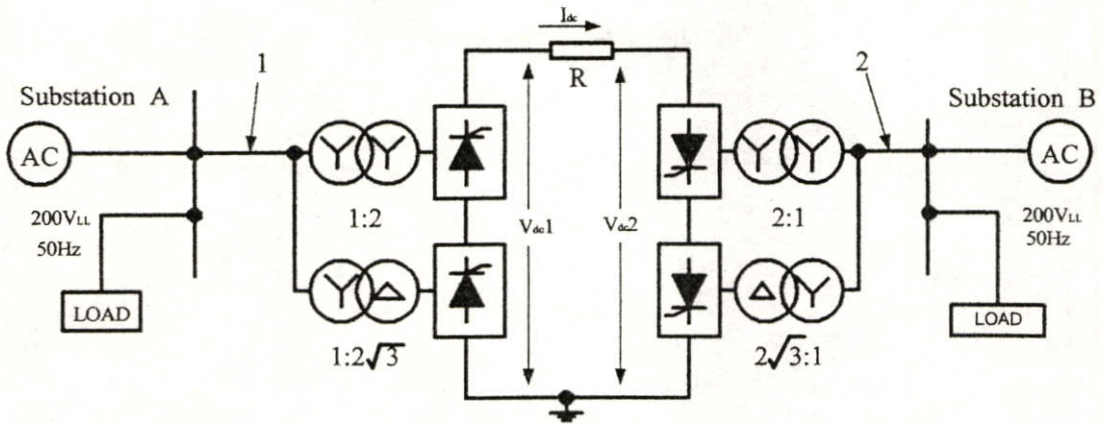
การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งที่อยู่ห่างไกลกัน โดยผ่านทางสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงนี้เมื่อพิจารณาเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบเอซี จะมีแฟคเตอร์อยู่สองส่วนคือการผิดเฟสของรูปสัญญาณกระแส และมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้า ตามสมการที่ 3.16 โดยทางด้าน สับสแตชัน B ซึ่งเป็นด้านรับกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะพบว่า ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าต่ำลงเมื่อมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องมาจากค่าการผิดเฟสของรูปสัญญาณกระแสมีค่าสูงขึ้นและมุมต่างเฟสระหว่างกระแสมีค่าสูงขึ้น

ดังนั้นระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน โดยต่ออยู่ในระบบเอซีทั้งทางด้านรับและด้านส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อลดกระแสที่เกิดในสับสแตชัน B ที่อยู่ทางด้านรับกำลังไฟฟ้า และชุดกรองฮาร์โมนิกส์ ซึ่งจะทำให้ระบบนี้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียอย่างมาก และอุปกรณ์ที่อยู่ทางด้าน สับสแตชัน B จะต้องออกแบบให้ทนพิกัดกระแสได้สูง

6.4 การคำนวณกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC

ในการคำนวณระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า ไม่สามารถคิดผลกระทบของมุม Over lap ที่เกิดขึ้นในชุดคอนเวอร์เตอร์ โดยผลของ Over lap นี้จะทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าลดต่ำลงตามสมการ 3.23 ซึ่งจะทำให้กระแสในสายส่งกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นขณะส่งกำลังไฟฟ้าที่พิกัดและเกิดความสูญเสียขึ้นในชุดคอนเวอร์เตอร์ตามเอกสารอ้างอิง[7] และในส่วนของ การปรับมุมนำกระแสทางด้านส่งและรับกำลังไฟฟ้า จากการทดสอบในบทที่ 3 จะพบว่าค่า %THDi จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามรูปที่ 3.12 ซึ่งทำให้การคำนวณนี้ไม่สามารถคิดผลกระทบจากค่า%THDi และ%THDv ได้

ดังนั้นในการคำนวณจึงไม่สามารถคิดผลกระทบต่างๆในชุดคอนเวอร์เตอร์ได้ แต่ในการคำนวณนี้จะใช้สูตรตามสมการที่ 3.24 และ 3.25 เพื่อที่จะหาค่าของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยสมการที่ใช้เป็นค่าโดยประมาณ ซึ่งไม่คิดค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในชุดคอนเวอร์เตอร์ และค่าของกระแสในสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบจริง เพื่อที่จะสามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ใกล้เคียงกับการทดสอบจริง



รูปที่ 6.1 ตำแหน่งต่างๆของผลการคำนวณ

6.4.1 การคำนวณ $\alpha = 5^\circ$ และ $135^\circ < \gamma < 150^\circ$

พิจารณาการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในเงื่อนไขการปรับมุมนำกระแส $\alpha = 5^\circ$ และ $\gamma = 150^\circ$ โดยให้ $V_{LL} = 400V$ โดยสมมุติให้ส่งกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไป Substation B

กำลังไฟฟ้านำส่งกำลังไฟฟ้าจุดที่ 1 (Rectifier) $\alpha = 5^\circ$ กระแส $I_{DC} = 1.1A$

$$P = 2.7V_{LL}I_{DC}\cos\alpha = 2.7 * 400 * 1.1 * \cos 5^\circ = 1,184W$$

$$Q = 2.7V_{LL}I_{DC}\sin\alpha = 2.7 * 400 * 1.1 * \sin 5^\circ = 103 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{1,184^2 + 103^2} = 1,188VA$$

กำลังไฟฟ้านำรับกำลังไฟฟ้าจุดที่ 2 (Inverter) $\gamma = 150^\circ$ กระแส $I_{DC} = 1.1A$

$$P = 2.7V_{LL}I_{DC}\cos\gamma = 2.7 * 400 * 1.1 * \cos 150^\circ = 1,028W$$

$$Q = 2.7V_{LL}I_{DC}\sin\gamma = 2.7 * 400 * 1.1 * \sin 150^\circ = 594 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{1,028^2 + 594^2} = 1,187VA$$

พิจารณาการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในเงื่อนไขการปรับมุมนำกระแส $\alpha=5^\circ$ และ $\gamma=147^\circ$

กำลังไฟฟ้านำส่งกำลังไฟฟ้าจุดที่ 1 (Rectifier) $\alpha=5^\circ$ $I_{DC}=1.4A$

$$P = 2.7V_{LL}I_{DC}\cos\alpha = 2.7 * 400 * 1.4 * \cos 5^\circ = 1,506W$$

$$Q = 2.7V_{LL}I_{DC}\sin\alpha = 2.7 * 400 * 1.4 * \sin 5^\circ = 132 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{1,506^2 + 132^2} = 1,512VA$$

กำลังไฟฟ้านำรับกำลังไฟฟ้าจุดที่ 2 (Inverter) $\gamma=145^\circ$ $I_{DC}=1.4A$

$$P = 2.7V_{LL}I_{DC}\cos\gamma = 2.7 * 400 * 1.4 * \cos 147^\circ = 1,268W$$

$$Q = 2.7V_{LL}I_{DC}\sin\gamma = 2.7 * 400 * 1.4 * \sin 147^\circ = 823 \text{ VAR}$$

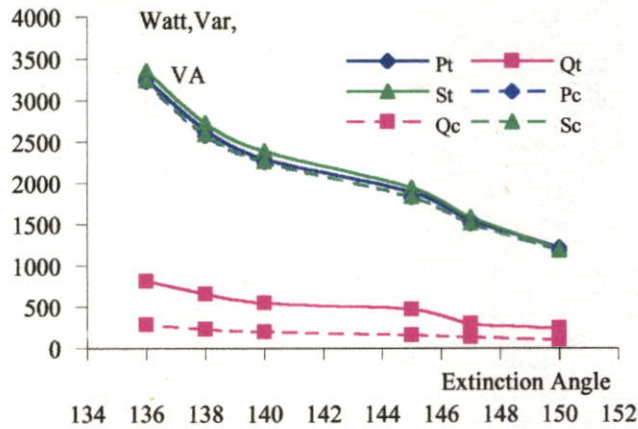
$$S = \sqrt{1,268^2 + 823^2} = 1,512VA$$

ซึ่งสามารถสรุปค่ากำลังไฟฟ้าของเงื่อนไขการปรับมุมนำกระแส $\alpha=5^\circ$ และ $135^\circ < \gamma < 150^\circ$ ตามตารางต่อไปนี้

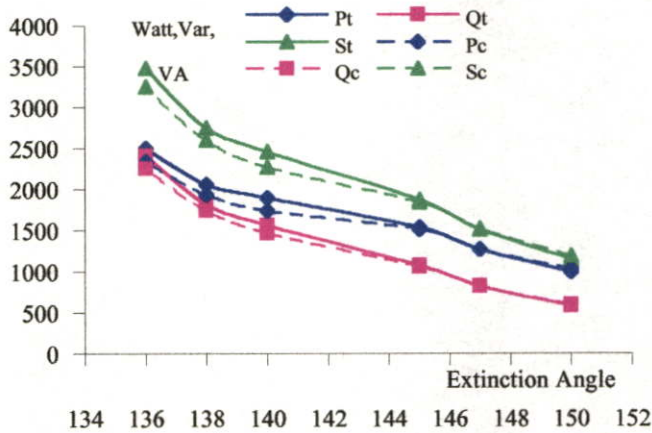
ตารางที่ 6.1 ผลการคำนวณในเงื่อนไข $\alpha=5^\circ$ และ $135^\circ < \gamma < 150^\circ$

มุม γ	RECTIFIER			INVERTER		
	P	Q	S	P	Q	S
150	1,300W	115Var	1,305VA	1,028W	594Var	1187VA
147	1,620W	140Var	1,626 VA	1,268W	823Var	1512VA
145	1,940W	170Var	1,950VA	1,504W	1,053Var	1836VA
140	2,400W	210Var	2,409VA	1,737W	1,458Var	2268VA
138	2,700W	240Var	2,711VA	1,926W	1,734Var	2592VA
136	3,228W	290Var	3,241VA	2,330W	2,250Var	3239VA

จากตารางที่ 6.1 สามารถนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟสรุปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.2 กำลังไฟฟ้าจุดที่ 1 (ด้านส่งกำลังไฟฟ้า)



รูปที่ 6.3 กำลังไฟฟ้าจุดที่ 2 (ด้านรับกำลังไฟฟ้า)

รูปที่ 6.2 เป็นการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่จุดที่ 1 คือกำลังไฟฟ้าด้านส่ง(Rectifier) โดยสามารถเทียบได้กับผลการทดสอบในบทที่ 5 หัวข้อ 5.3.1 รูปที่ 5.29 โดยกราฟเส้นทึบเป็นผลที่ได้จากการทดสอบและกราฟที่เป็นเส้นประเป็นผลที่ได้จากการคำนวณ และเมื่อพิจารณาที่กำลังไฟฟ้าจริง(Active Power) ค่าที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากในการคำนวณคิดกำลังไฟฟ้าทางด้านดิสซิ่งซึ่งโดยสมมุติว่าไม่คิดค่าสูญเสียในระบบจึงทำให้ค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบ และเมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือน(Reactive Power) พบว่ามีค่าเช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้าจริง โดยเหตุผลที่การเปลี่ยนแปลงของกราฟที่ได้จากการทดสอบ และการคำนวณมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากการคำนวณใช้ค่าของกระแส I_{DC} ที่ได้จากการทดสอบซึ่งจะมีผลกระทบของมุม Over lap และจากรูปที่ 6.3 เป็นผลการคำนวณในจุดที่ 2 คือด้านรับกำลังไฟฟ้า(Inverter) โดยสามารถเทียบผลการทดสอบ ในบทที่ 5 หัวข้อ 5.3.1 รูปที่ 5.31

ซึ่งจากผลการคำนวณเมื่อเทียบกับการทดสอบ พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าทางด้านส่งและรับกำลังไฟฟ้ามักเพิ่มขึ้น โดยมีผลมาจากการปรับมุมนำกระแส(γ)ด้านรับกำลังไฟฟ้าให้มีค่าลดต่ำลง เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าจริงจากการทดสอบจะมีค่ามากกว่าผลการคำนวณเนื่องมาจากขณะที่ทำการทดสอบโดยปรับมุมนำกระแสในสถานะอินเวอร์เตอร์ ผลเฉลี่ยของแรงดันดีซีมีค่าสูงกว่าการคำนวณจึงเป็นผลทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าผลของการคำนวณ

6.5 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้อุปกรณ์ไทรสเตอร์ (SCR) เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง พบว่าในขณะที่ทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า จะมีกำลังไฟฟ้าเสมือนเกิดขึ้นในชุดคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากการทำให้ชุดคอนเวอร์เตอร์ทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์จะต้องกำหนดมุมนำกระแส ให้อยู่ระหว่าง 90° - 180° เป็นผลทำให้มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสมีค่ามาก ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่ามากขึ้น ซึ่งถ้าทำการเปลี่ยนอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งเป็น IGBT ก็จะสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนลงได้ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่สามารถควบคุมให้หยุดนำกระแสได้

6.6 โครงการที่พัฒนาต่อไป

จากผลการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจำลอง ที่ผ่านมาพบว่าในขณะที่ทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจริงนั้น จะมีผลกระทบของกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบเอชทั้งทางด้านรับและด้านส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการจำกัดค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนให้มีค่าลดต่ำลงในขณะที่ทำการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า โดยวิธีดังต่อไปนี้

- จัดสร้างชุดกรองฮาร์โมนิกส์ทางด้านระบบเอช
- จัดสร้างชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน

และในระหว่างขั้นตอนการส่งถ่ายจะมีกระแสกระชากขณะช่วง คอมมิวเตจของอุปกรณ์ไทรสเตอร์ ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายขึ้นในระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ดังนั้นควรสร้างชุดควบคุมแบบรูปเปิดเพื่อที่จะสามารถควบคุมกระแสในสายส่งไม่ให้สูงเกินพิกัดที่ออกแบบไว้

เอกสารอ้างอิง

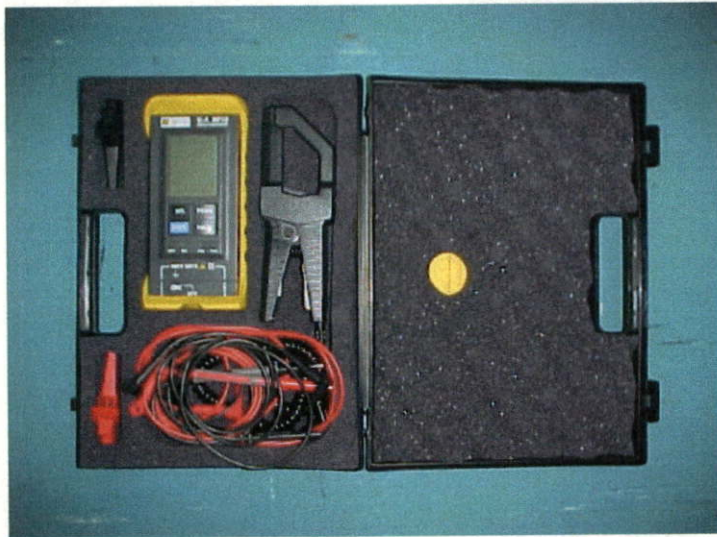
- [1] จักรพงษ์ จารุมิศรี, ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล, วิจิตร กิณเรศ . “ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, ปีที่ 19, พฤศจิกายน 2541. หน้า 86-89.
- [2] ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล. ระบบไฟฟ้ากำลัง เล่ม 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2536
- [3] ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล. ระบบไฟฟ้ากำลัง เล่ม 2 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2536
- [4] K.R.PADIYAR. **HVDC Power Transmission Systems**. 3rd. Delhi : Wiley Eastern Limited., 1993
- [5] M.H.Rashid. **Power Electronics circuit, Devices, and Application**. Second edition, Prentice Hall, U.S.A. 1993
- [6] Mohan, et. al. **Power Electronics**. 2nd. U.S.A. : John Wiley & Sons.1995
- [7] S.Rao. **EHV-AC & HVDC Transmission Engineering & Practece**. India : Khanna, 1996.
- [8] Lihua Hu,Robert Yacamini “**Harmonic Transfer through Converters**” IEEE Transactions on power electronics,vol.7.No.3 july 1992
- [9] Sarath B.Tennakoon, Michael L.Woodhouse “**Calculation of valve damping circuit losses in 12-pulse HVDC converters**” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No. 2, April 1992

ภาคผนวก ก.
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ ก-1 เครื่องมือวัด Harmonic Spectrum

SATEC Power meter system 290H , Power meter & Harmonic analyzer



รูปที่ ก-2 Power Meter

Chauvin Arnoux รุ่น C.A 8201 Made in France



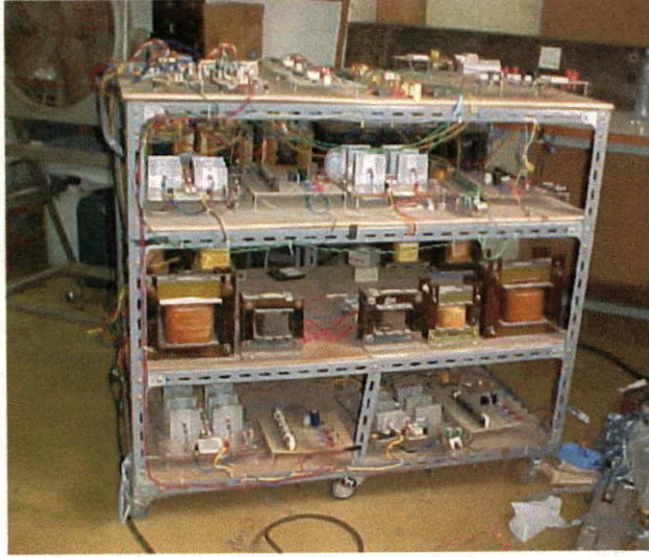
รูปที่ ก-3 Digital Oscilloscope

YOKOGAWA 8bits 200ms/S ,150MHz

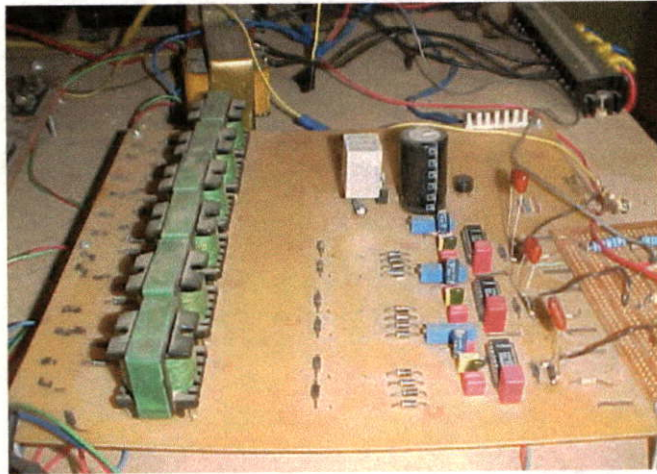


รูปที่ ก-4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

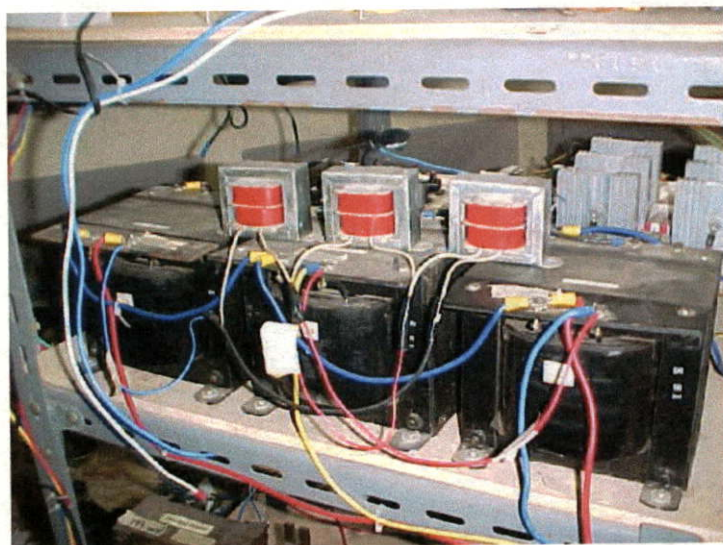
ITEM	AC GENERATOR	DC MOTOR
V	220	220
A	8.6	13.6
kW	3	3
COS ϕ	1	-
Tr/min	1,500	1,500
Ex	110	220



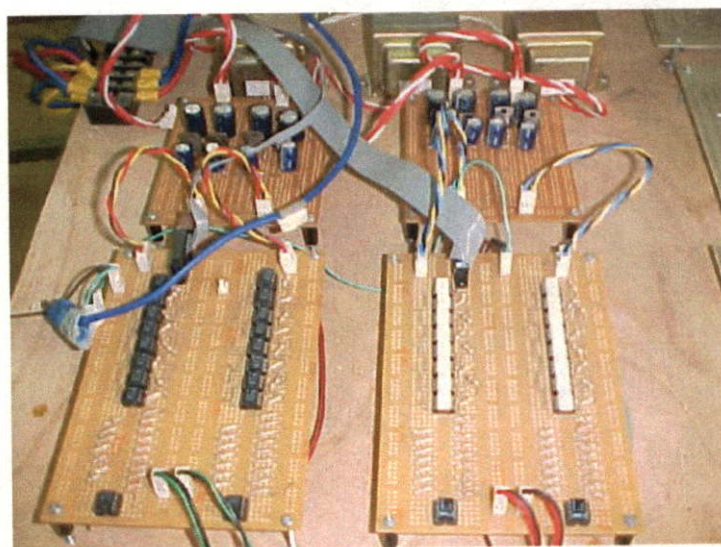
รูปที่ ก-5 ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง



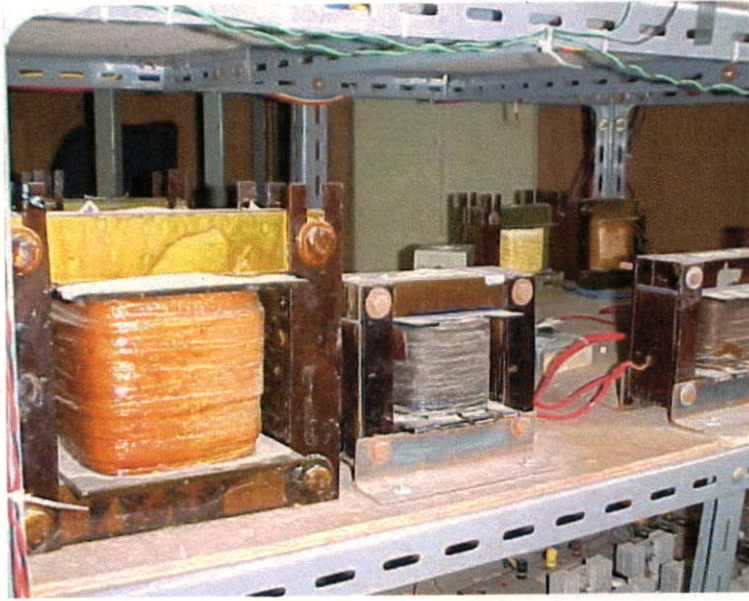
รูปที่ ก-6 ชุดกำเนิดสัญญาณนาฬิกากระแสอนุกรมทรานซิสเตอร์



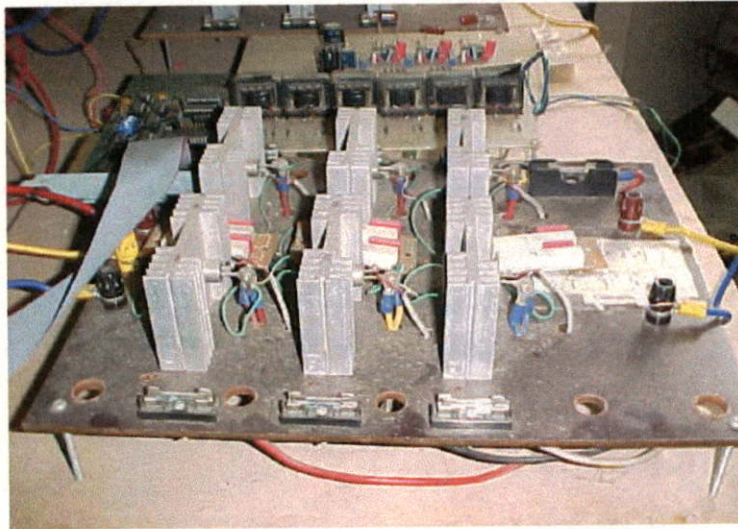
รูปที่ ก-7 หม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ ก-8 ชุดแยกสัญญาณกราวน์ และ ชุด DAC แบบ R-2R Ladder



รูปที่ ก-9 สมุดคังรีแอกเตอร์



รูปที่ ก-10 ชุดคอนเวอร์เตอร์

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลการทดสอบการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ ผ.3.1 ผลการทดสอบชุดคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะเรกติฟาย โดยปรับมุมนำกระแส (α) ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 5-90 องศา

α	P_{AC}	V_{DC}	I_{DC}	P_{DC}	% η	%THDi	%THDv	PF
5	1270W	1040V	1.1A	1144W	90%	11.8%	2.3%	0.97
18	1220W	1018V	1.06A	1080W	89%	12.2%	2.3%	0.94
27	1120W	978V	0.99A	974W	87%	12.8%	2.6%	0.88
36	1000W	860V	0.9A	774W	77%	13.9%	2.9%	0.8
45	855W	749V	0.8A	560W	70%	15.2%	2.7%	0.73
54	755W	651V	0.78A	508W	67%	16.3%	2.6%	0.66
63	647W	561V	0.75A	420W	65%	19%	2.8%	0.6
72	490W	329V	0.6A	197W	40%	25.8%	3%	0.56

ตารางที่ ผ.5.1 ตารางทดสอบขณะที่ยังไม่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ

Item	ขณะยังไม่ส่งกำลังไฟฟ้า		ขณะยังไม่รับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I_L	0.85A	-	-	5.89A
V_{LL}	200V	-	-	200V
PF	1	-	-	1
P	300W	-	-	2070W
Q	-	-	-	-
S	300	-	-	2070W
DC Link				
I_{DC}	V_{DC1}	V_{DC2}	P_{DC}	
-	-	-	-	

การทดสอบโดยปรับ $\alpha = 5^\circ$ และ $136^\circ < \gamma < 150^\circ$

ตารางที่ ผ.5.2 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ 200 V_{LL} และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha=5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 150^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I _L	4.3A	3.51A	3.32A	3.47A
V _{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.99	0.99	-0.86	0.87
P	1500W	1220W	994W	1048W
Q	233VAR	240VAR	577VAR	583VAR
S	1520VA	1200VA	1150VA	1199VA
%THDi	9.00%	12.00%	13.90%	9.00%
%THDv	2.90%	2.90%	3.10%	3.20%
DC Link				
I _{DC}	V _{DC1}	V _{DC2}	P _{DC}	
1.1A	1000V	963V	1060W	

ตารางที่ ผ.5.3 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 147^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I_L	5.65A	4.83A	4.42A	3.24
V_{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.99	0.98	-0.84	0.67
P	1843W	1557W	1267W	740W
Q	295VAR	300VAR	822VAR	821VAR
S	1865VA	1585VA	1510VA	1105VA
%THDi	9.70%	12.00%	13.20%	13.20%
%THDv	3.00%	3.80%	4.10%	4.10%
DC Link				
I_{DC}	V_{DC1}	V_{DC2}	P_{DC}	
1.4A	998V	957V	1340W	

ตารางที่ ผ.5.4 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 145^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I_L	6.5A	5.62A	5.4A	3.46A
V_{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.98	0.97	-0.82	0.44
P	2207W	1888W	1533W	527W
Q	475VAR	470VAR	1073VAR	1077VAR
S	2257VA	1945VA	1870VA	1199VA
%THDi	9.50%	11.70%	14.40%	17.50%
%THDv	3.50%	4.10%	5.10%	4.40%
DC Link				
I_{DC}	V_{DC1}	V_{DC2}	P_{DC}	
1.7A	990	945	1606W	

ตารางที่ ผ.5.5 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ 200 V_{LL} และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I _L	7.8A	7.06A	7A	4.5A
V _{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.98	0.97	-0.78	0.12
P	2634W	2300W	1891W	187W
Q	580VAR	550VAR	1558VAR	1547VAR
S	2699VA	2390VA	2450VA	1558VA
%THDi	9.80%	11.40%	15.00%	18.90%
%THDv	4%	4.60%	5.90%	5.40%
DC Link				
I _{DC}	V _{DC1}	V _{DC2}	P _{DC}	
2.1A	985	935	1963W	

ตารางที่ ผ.5.6 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอซซีของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 138^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I_L	8.7A	7.88A	7.81A	5.12A
V_{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.98	0.97	-0.76	0.03
P	2938W	2647W	2056W	53W
Q	657VAR	660VAR	1810VAR	1772VAR
S	3010VA	2728VA	2740VA	1773VA
%THDi	9.30%	11.30%	15.40%	20.80%
%THDv	4.90%	5.10%	5.50%	5.80%
DC Link				
I_{DC}	V_{DC1}	V_{DC2}	P_{DC}	
2.4A	980V	922V	2213W	

ตารางที่ ผ.5.7 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอซซีของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 136^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I_L	10.5A	9.69A	10A	6.09A
V_{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.98	0.97	-0.76	-0.17
P	3546W	3256W	2494W	416W
Q	818VAR	812VAR	2406VAR	2412VAR
S	3640VA	3356VA	3465VA	2448VA
%THDi	9.00%	10.60%	16.50%	21.10%
%THDv	4.80%	10.60%	6.80%	7.40%
DC Link				
I_{DC}	V_{DC1}	V_{DC2}	P_{DC}	
3	974	897	2691W	

การทดสอบโดยปรับ $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ และ $\gamma = 140^\circ$

ตารางที่ ผ.5.8 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ 200 V_{LL} และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 25^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I _L	3.06A	2.36A	2.2A	4.5A
V _{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.95	0.91	-0.76	0.95
P	1002W	745W	580W	1461W
Q	345VAR	346VAR	489VAR	485VAR
S	1060VA	821VA	759VA	1540 VA
%THDi	9.00%	12.6%	14.20%	5.50%
%THDv	3.00%	2.50%	2.40%	2.80%
DC Link				
I _{DC}	V _{DC1}	V _{DC2}	P _{DC}	
0.7A	935V	920V	644W	

ตารางที่ ผ.5.9 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ 200 V_{LL} และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 20^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I _L	4A	3.21A	2.95A	4.11A
V _{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.96	0.91	-0.76	0.91
P	1326W	1010W	778W	1255W
Q	449VAR	452VAR	670VAR	673VAR
S	1400VA	1100VA	1026VA	1424VA
%THDi	9.30%	12.5%	14%	9%
%THDv	3.40%	2.90%	3.30%	3.30%
DC Link				
I _{DC}	V _{DC1}	V _{DC2}	P _{DC}	
1A	945V	920V	920W	

ตารางที่ ผ.5.10 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอชี่ของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ $200 V_{LL}$ และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 18^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I_L	5A	4.19A	4.1A	3.75A
V_{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.97	0.95	-0.75	0.72
P	1663W	1379W	1065W	935W
Q	444VAR	448VAR	913VAR	902VAR
S	1721VA	1450VA	1403VA	1299VA
%THDi	9.40%	12.10%	13.80%	11%
%THDv	3.8%	3.90%	3.40%	3.70%
DC Link				
I_{DC}	V_{DC1}	V_{DC2}	P_{DC}	
1.3A	950V	918V	1193W	

ตารางที่ ผ.5.11 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอซซีของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ 200 V_{LL} และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 14^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I _L	5.57A	4.8A	4.7A	3.87A
V _{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.97	0.96	-0.76	0.6
P	1872W	1596W	1237W	804W
Q	466VAR	458VAR	1068VAR	1071VAR
S	1929VA	1661VA	1634VA	1339VA
%THDi	9.70%	12.50%	13.60%	12%
%THDv	3.70%	3.10%	3.90%	3.80%
DC Link				
I _{DC}	V _{DC1}	V _{DC2}	P _{DC}	
1.5A	965V	918V	1377W	

ตารางที่ ผ.5.12 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอซซีของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ 200 V_{LL} และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 10^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I _L	6.12A	5.3A	5.21A	3.85A
V _{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.98	0.97	-0.77	0.5
P	2073W	1700W	1389W	667W
Q	441VAR	444VAR	1160VAR	1155VAR
S	2120VA	1757VA	1810VA	1334VA
%THDi	9.50%	12.10%	13.30%	15.90%
%THDv	3.30%	3.50%	4.20%	4.30%
DC Link				
I _{DC}	V _{DC1}	V _{DC2}	P _{DC}	
1.65A	970V	918V	1552W	

ตารางที่ ผ.5.13 ตารางการทดสอบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก Substation A ไปยัง Substation B ที่แรงดันเอซซีของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ 200 V_{LL} และความถี่เท่ากับ 50 Hz เท่ากันทั้งสองระบบ โดยปรับมุมนำกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha = 5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส $\gamma = 140^\circ$

Item	ขณะกำลังส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า		ขณะกำลังรับกำลังไฟฟ้า	
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
I _L	7.89A	7.1A	7A	4.53A
V _{LL}	200V	200V	200V	200V
PF	0.98	0.98	-0.77	0.12
P	2678W	2410W	1885W	190W
Q	484VAR	490VAR	1558VAR	1558VAR
S	2721VA	2350A	2445VA	1570VA
%THDi	9.30%	11.70%	13.60%	17.10%
%THDv	4.20%	4.10%	4.40%	4.50%
DC Link				
I _{DC}	V _{DC1}	V _{DC2}	P _{DC}	
2.3A	985V	918V	2,111W	

ตารางที่ ผ.5.14 อัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับอัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือน
 ด้านระบบเอชของชุดคอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้า (เรคตีฟาย) กรณีที่ปรับมุมนำ
 กระแส ด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha=5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส
 $136^\circ < \gamma < 150^\circ$

มุมนำ กระแส (γ)	P เริ่มต้น	P ที่เพิ่มขึ้น	$\frac{P \text{ ที่เพิ่มขึ้น}}{P \text{ เริ่มต้น}}$	Q เริ่มต้น	Q ที่เพิ่มขึ้น	$\frac{Q \text{ ที่เพิ่มขึ้น}}{Q \text{ เริ่มต้น}}$
150°	1220W	1220W	1	240Var	240Var	1
147°	1220W	1557W	1.28	240Var	300Var	1.25
145°	1220W	1888W	1.55	240Var	470Var	1.9
140°	1220W	2300W	1.88	240Var	550Var	2.3
138°	1220W	2647W	2.17	240Var	660Var	2.75
136°	1220W	3256W	2.67	240Var	812Var	3.4

ตารางที่ ผ.5.15 อัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับอัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือน
 ด้านระบบเอชของชุดคอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (อินเวอร์เตอร์) กรณีที่ปรับมุมนำ
 กระแส ด้านส่งกำลังไฟฟ้า $\alpha=5^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส
 $136^\circ < \gamma < 150^\circ$

มุมนำ กระแส (γ)	P เริ่มต้น	P ที่เพิ่มขึ้น	$\frac{P \text{ ที่เพิ่มขึ้น}}{P \text{ เริ่มต้น}}$	Q เริ่มต้น	Q ที่เพิ่มขึ้น	$\frac{Q \text{ ที่เพิ่มขึ้น}}{Q \text{ เริ่มต้น}}$
150°	994W	1220W	1	577Var	577Var	1
147°	994W	1267W	1.27	577Var	822Var	1.4
145°	994W	1533W	1.54	577Var	1073Var	1.86
140°	994W	1891W	1.90	577Var	1558Var	2.70
138°	994W	2056W	2.06	577Var	1810Var	3.13
136°	994W	2494W	2.64	577Var	2406Var	4.17

ตารางที่ ผ.5.16 อัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับอัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือน
 ด้านระบบเอชของชุดคอนเวอร์เตอร์ส่งกำลังไฟฟ้า (เรกติไฟย) กรณีที่ปรับมุมนำ
 กระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส
 $\gamma = 140^\circ$

มุมนำ กระแส (γ)	P เริ่มต้น	P ที่เพิ่มขึ้น	$\frac{P \text{ ที่เพิ่มขึ้น}}{P \text{ เริ่มต้น}}$	Q เริ่มต้น	Q ที่เพิ่มขึ้น	$\frac{Q \text{ ที่เพิ่มขึ้น}}{Q \text{ เริ่มต้น}}$
25°	745W	745W	1	346Var	346Var	1
20°	745W	1010W	1.36	346Var	452Var	1.33
18°	745W	1379W	1.85	346Var	448Var	1.30
14°	745W	1596W	2.14	346Var	458Var	1.32
10°	745W	1700W	2.28	346Var	444Var	1.28
5°	745W	2410W	3.23	346Var	490Var	1.4

ตารางที่ ผ.5.17 อัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับอัตราส่วนการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าเสมือน
 ด้านระบบเอชของชุดคอนเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้า (อินเวอร์เตอร์) กรณีที่ปรับมุมนำ
 กระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า $5^\circ < \alpha < 25^\circ$ และ ด้านรับกำลังไฟฟ้าที่มุมนำกระแส
 $\gamma = 140^\circ$

มุมนำ กระแส (γ)	P เริ่มต้น	P ที่เพิ่มขึ้น	$\frac{P \text{ ที่เพิ่มขึ้น}}{P \text{ เริ่มต้น}}$	Q เริ่มต้น	Q ที่เพิ่มขึ้น	$\frac{Q \text{ ที่เพิ่มขึ้น}}{Q \text{ เริ่มต้น}}$
25°	580W	580W	1	489Var	489Var	1
20°	580W	778W	1.34	489Var	670Var	1.37
18°	580W	1065W	1.84	489Var	913Var	1.87
14°	580W	1237W	2.13	489Var	1068Var	2.18
10°	580W	1389W	2.4	489Var	1160Var	2.37
5°	580W	1885W	3.25	489Var	1558Var	3.18

โปรแกรมการควบคุมม่านกระแสน้ำของโทรทัศน์

unit variable;

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 = 'D:\test\program_v2\image.bmp';

A_To_B_Map = 'D:\test\program_v2\atob.bmp';

B_To_A_Map = 'D:\test\program_v2\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.

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;

procedure ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;

 var ScrollPos: Integer);

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 ,variable;
  {$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);
  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
            PortWriteByte(Port1_B,170); {180}
            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;
procedure TForm3.Timer1Timer(Sender: TObject);
begin
if RadioButton1.Checked = true then
begin
PortWriteByte(Port1_A,90);{42} {Port1_A,78 at 200 V Line}
ScrollBar1.Position := 165 ;
Timer1.Enabled := false ;
Label4.Caption := '90';
end
else
begin
PortWriteByte(Port1_B,73);{42} {Port1_A,78 at 200 V Line}
ScrollBar2.Position := 182 ;
Timer1.Enabled := false ;
Label5.Caption := '73';
end;
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.

.....

it 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

xchg AX,DX

out DX,AX

end;

end.

ภาคผนวก ก.
เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

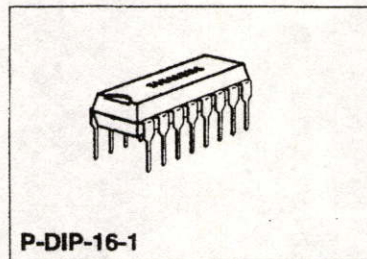
SIEMENS

Phase Control IC

TCA 785
Bipolar IC

Features

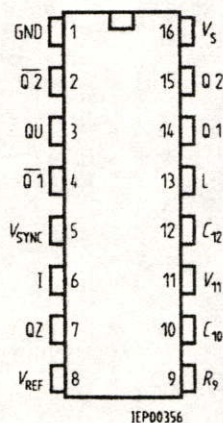
- Reliable recognition of zero passage
- Large application scope
- May be used as zero point switch
- LSL compatible
- Three-phase operation possible (3 ICs)
- Output current 250 mA
- Large ramp current range
- Wide temperature range



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	QU	Output U
4	$\overline{Q1}$	Output 1 inverted
5	V_{SYNC}	Synchronous voltage
6	I	Inhibit
7	QZ	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

Functional Description

The synchronization signal is obtained via a high-ohmic resistance from the line voltage (voltage V_s). 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. $30 \mu\text{s}$ 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.

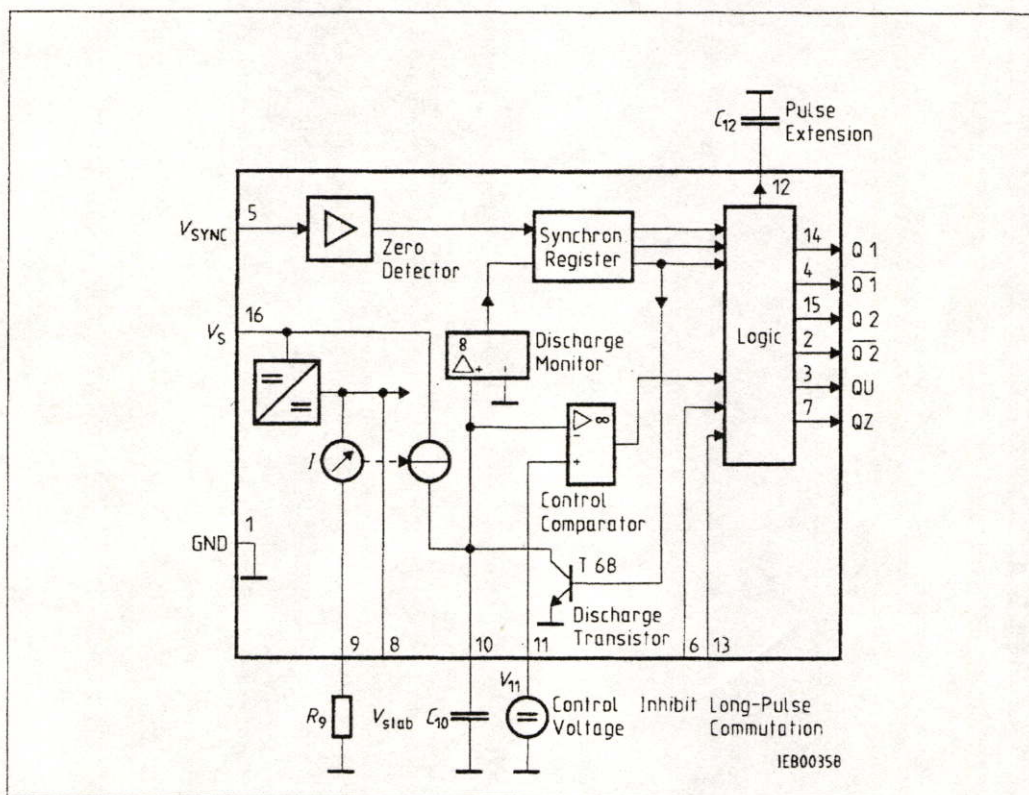
Outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ supply the inverse signals of Q 1 and Q 2.

A signal of $\varphi + 180^\circ$ which can be used for controlling an external logic, is available at pin 3.

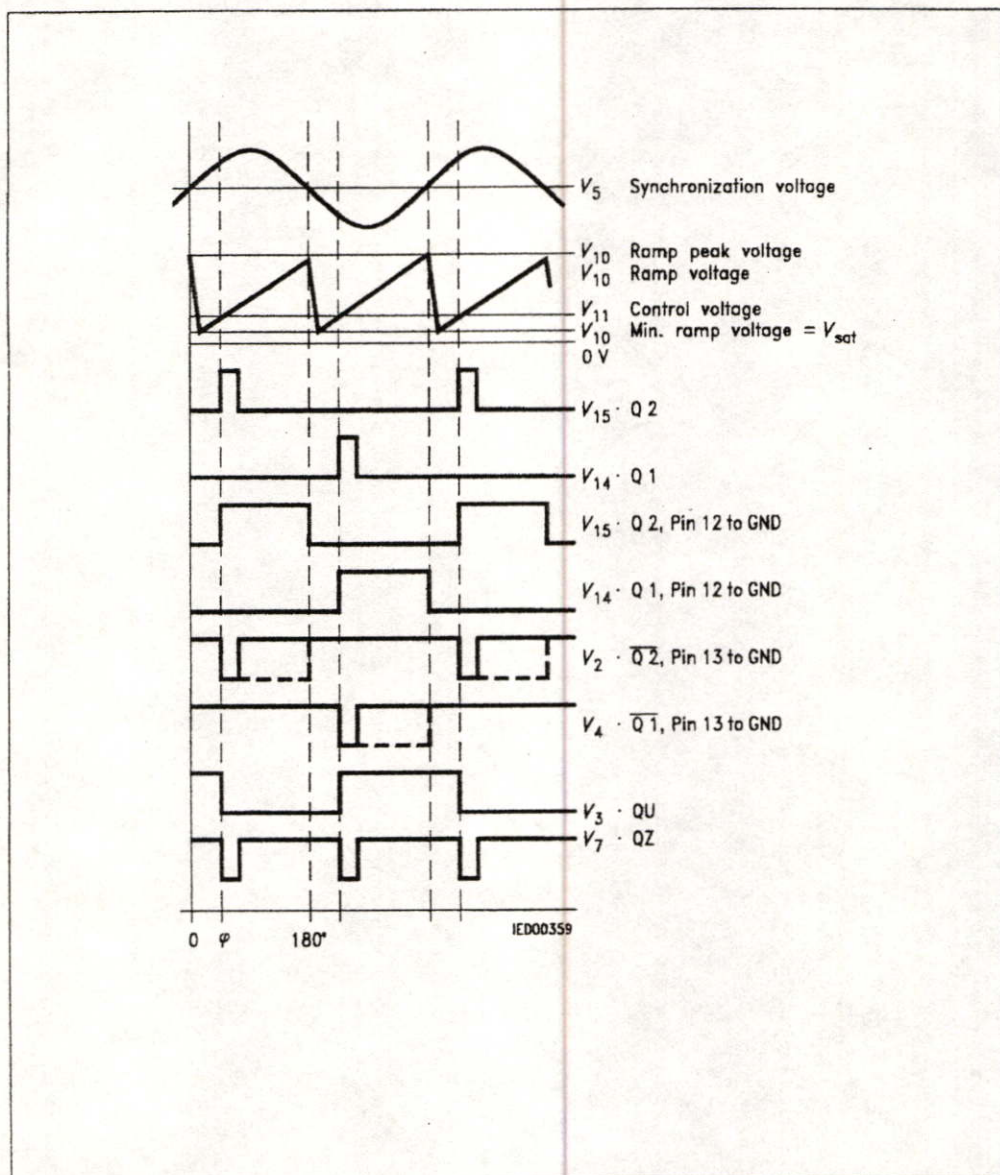
A signal which corresponds to the NOR link of Q 1 and Q 2 is available at output Q Z (pin 7).

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

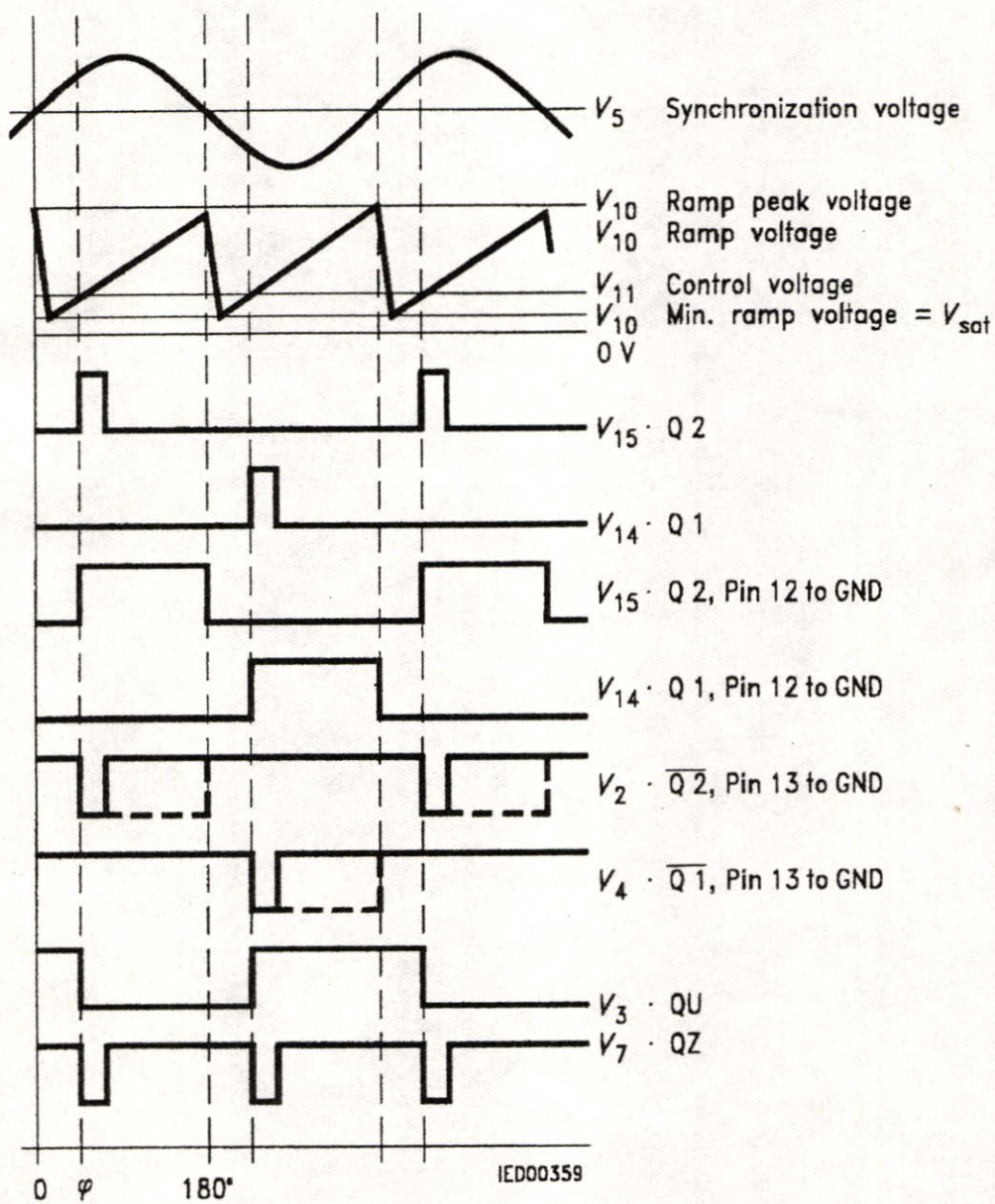
Pin 13 can be used to extend the outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ to full pulse length ($180^\circ - \varphi$).



Block Diagram



Pulse Diagram



MOTOROLA
SEMICONDUCTOR
 TECHNICAL DATA

6-Pin DIP Optoisolators Logic Output

... gallium arsenide IRED optically coupled to a high-speed integrated detector with Schmitt trigger output. Designed for applications requiring electrical isolation, fast response time, noise immunity and digital logic compatibility such as interfacing computer terminals to peripheral equipment, digital control of power supplies, motors and other servo machine applications.

- High Isolation Voltage — $V_{ISO} = 7500$ Vac pk Min
- Guaranteed Switching Times — $t_{on}, t_{off} < 4 \mu s$
- Built-in ON/OFF Threshold Hysteresis
- Economical, Standard Dual-In-Line Plastic Package
- UL Recognized, File No. E54915

H11L1
 H11L2

6-PIN DIP
 OPTOISOLATORS
 LOGIC OUTPUT



CASE 730A-02
 PLASTIC

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ C$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
INPUT LED			
Reverse Voltage	V_R	6	Volts
Forward Current — Continuous	I_F	60	mA
— Peak		1.2	Amp
Pulse Width: = 300 μs , 2% Duty Cycle			
LED Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ C$	P_D	120	mW
Derate above $25^\circ C$		1.41	mW/ $^\circ C$
OUTPUT DETECTOR			
Output Voltage Range	V_O	0-16	Volts
Supply Voltage Range	V_{CC}	3-16	Volts
Output Current	I_O	50	mA
Detector Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ C$	P_D	150	mW
Derate above $25^\circ C$		1.76	mW/ $^\circ C$
TOTAL DEVICE			
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ C$	P_D	250	mW
Derate above $25^\circ C$		2.94	mW/ $^\circ C$
Maximum Operating Temperature	T_A	-40 to +85	$^\circ C$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to +150	$^\circ C$
Soldering Temperature (10 s)		260	$^\circ C$
Isolation Surge Voltage (Pk at Voltage, 60 Hz, 1 Second Duration) (1)	V_{ISO}	7500	Volts

(1) Isolation surge voltage is an internal device dielectric breakdown rating

H11L1, H11L2

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 0$ to 70°C)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	
INPUT LED						
Reverse Leakage Current ($V_R = 3\text{ V}$, $R_L = 1\text{ M}\Omega$)	I_R	—	0.05	10	μA	
Forward Voltage ($I_F = 10\text{ mA}$) ($I_F = 0.3\text{ mA}$)	V_F	— 0.75	1.2 0.95	1.5	Volts	
Capacitance ($V_R = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$)	C	—	18	—	pF	
OUTPUT DETECTOR						
Operating Voltage	V_{CC}	3	—	15	Volts	
Supply Current ($I_F = 0$, $V_{CC} = 5\text{ V}$)	$I_{CC(\text{off})}$	—	1	5	mA	
Output Current, High ($I_F = 0$, $V_{CC} = V_O = 15\text{ V}$)	I_{OH}	—	—	100	μA	
COUPLED						
Supply Current ($I_F = I_{F(\text{on})}$, $V_{CC} = 5\text{ V}$)	$I_{CC(\text{on})}$	—	1.6	5	mA	
Output Voltage, Low ($R_L = 270\ \Omega$, $V_{CC} = 5\text{ V}$, $I_F = I_{F(\text{on})}$)	V_{OL}	—	0.2	0.4	Volts	
Threshold Current, ON ($R_L = 270\ \Omega$, $V_{CC} = 5\text{ V}$)	H11L1 H11L2 $I_{F(\text{on})}$	— —	1 —	1.6 10	mA	
Threshold Current, OFF ($R_L = 270\ \Omega$, $V_{CC} = 5\text{ V}$)	H11L1 H11L2 $I_{F(\text{off})}$	0.3 0.3	0.75 —	—	mA	
Hysteresis Ratio ($R_L = 270\ \Omega$, $V_{CC} = 5\text{ V}$)	$I_{F(\text{off})}$ / $I_{F(\text{on})}$	0.5	0.75	0.9		
Isolation Voltage (1) 60 Hz, AC Peak, 1 second, $T_A = 25^\circ\text{C}$	V_{ISO}	7500	—	—	$\text{Vac}(\text{pk})$	
Turn-On Time	$R_L = 270\ \Omega$ $V_{CC} = 5\text{ V}$, $I_F = I_{F(\text{on})}$ $T_A = 25^\circ\text{C}$	t_{on}	—	1.2	4	μs
Fall Time		t_f	—	0.1	—	
Turn-Off Time		t_{off}	—	1.2	4	
Rise Time		t_r	—	0.1	—	

(1) For this test IRED Pins 1 and 2 are common and Output Gate Pins 4, 5, 6 are common.

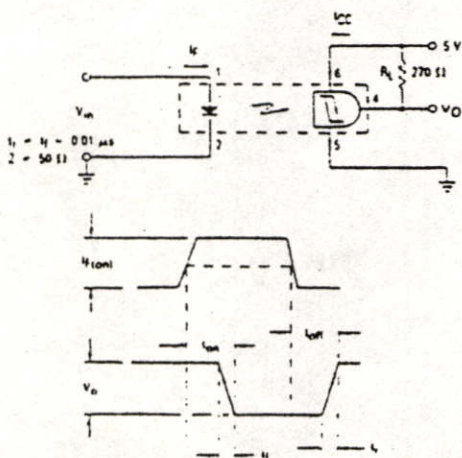
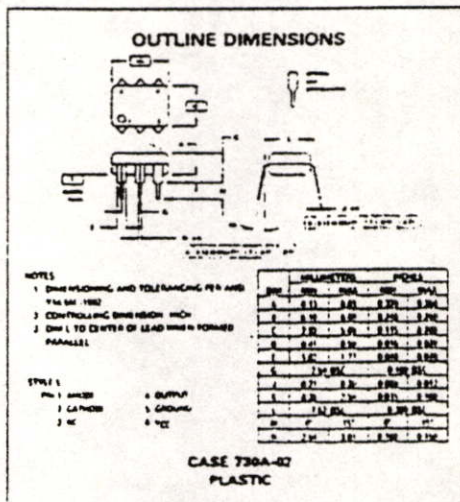


Figure 1. Switching Test Circuit



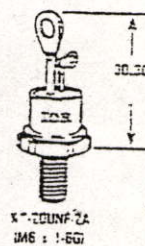
Part Number	VRRM V	I(TAV) A	θ TC °C	I _{TSM} (1)		I ² t (1)		V _{GT} (2) V	I _{GT} (2) mA	d _{width} (3) V/us	R _{thJC} DC K/W	Package
				50Hz A	60Hz A	50Hz A ² s	50Hz A ² s					
1QRIA10 1QRIA20 1QRIA40 1QRIA60 1QRIA80 1QRIA100 1QRIA120	100 200 400 600 800 1000 1200	10	85	190	200	180	165	2.0	60	300	1.85	TO-208AA (5)
1ERIA10 1ERIA20 1ERIA40 1ERIA60 1ERIA80 1ERIA100 1ERIA120	100 200 400 600 800 1000 1200	16	85	285	300	405	375	2.0	60	300	1.15	TO-208AA (5)
2ERIA10 2ERIA20 2ERIA40 2ERIA60 2ERIA80 2ERIA100 2ERIA120	100 200 400 600 800 1000 1200	22	85	335	355	560	515	2.0	60	300	0.85	TO-208AA (5)
2SRIA10 2SRIA20 2SRIA40 2SRIA60 2SRIA80 2SRIA100 2SRIA120	100 200 400 600 800 1000 1200			350	370	615	550	2.0	60	300	0.75	TO-208AA (5)
5ORIA10 5ORIA20 5ORIA40 5ORIA60 5ORIA80 5ORIA100 5ORIA120	100 200 400 600 800 1000 1200	50	94	1200	1255	7200	6560	2.0	100	500	0.35	TO-208AC (4) (5)

Notes

- (1) T_J = 125°C, 100% VRRM.
- (2) T_J = 25°C.
- (3) Exponential to 0.67V_{DRM}, T_J = 125°C.
Also available to 1000V/us.
- (4) Available with flexible leads 200mm long.
To specify change '50' to '51' in Part Number. e.g. 51RIA80 etc.
- (5) Available with metric stud. To specify add 'M' to end of Part Number.
e.g. 5ORIA120M etc.

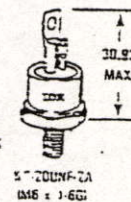
TO-208AA
(TO-49)

14.3 MAX.
ACROSS FLATS

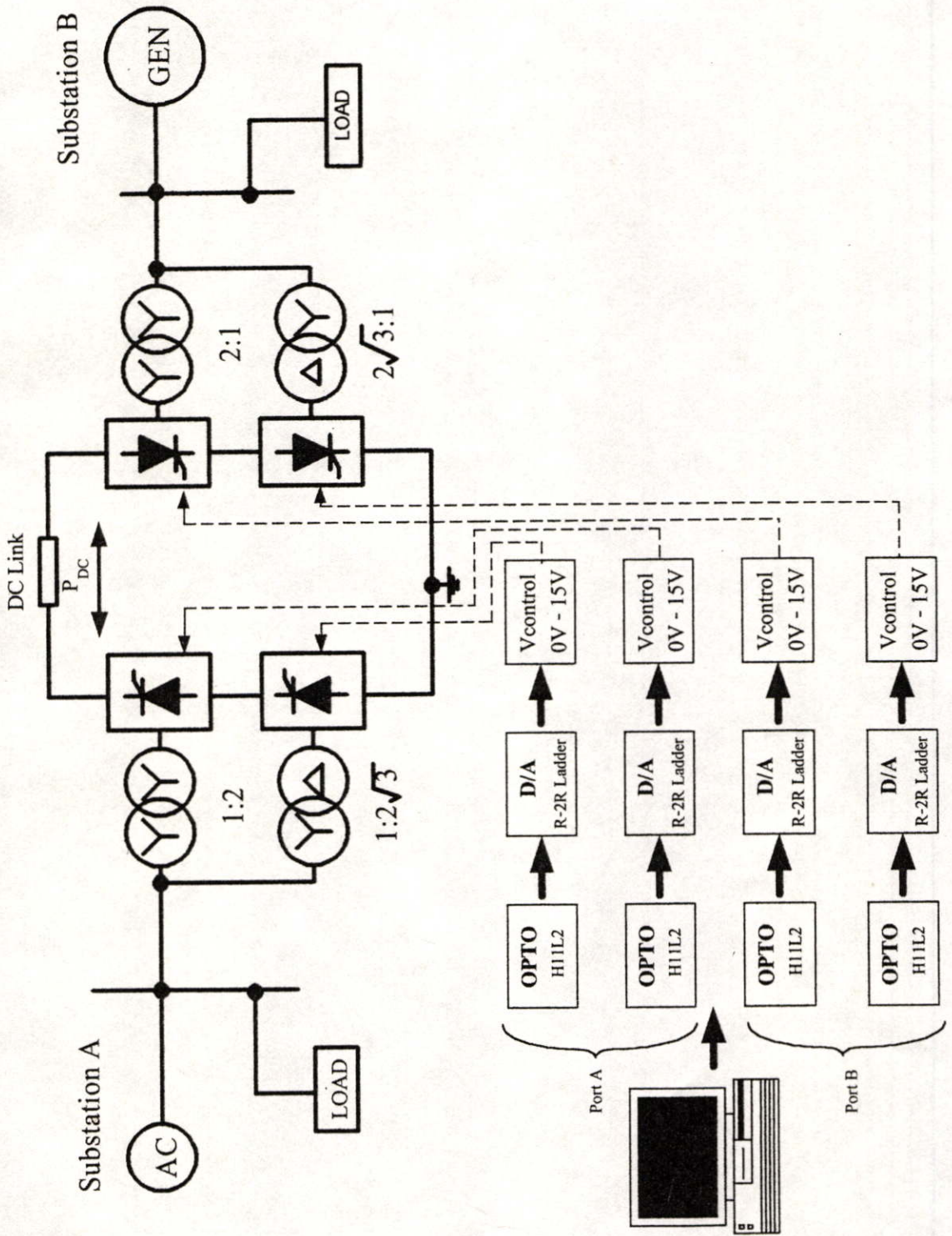


TO-208AC
(TO-65)

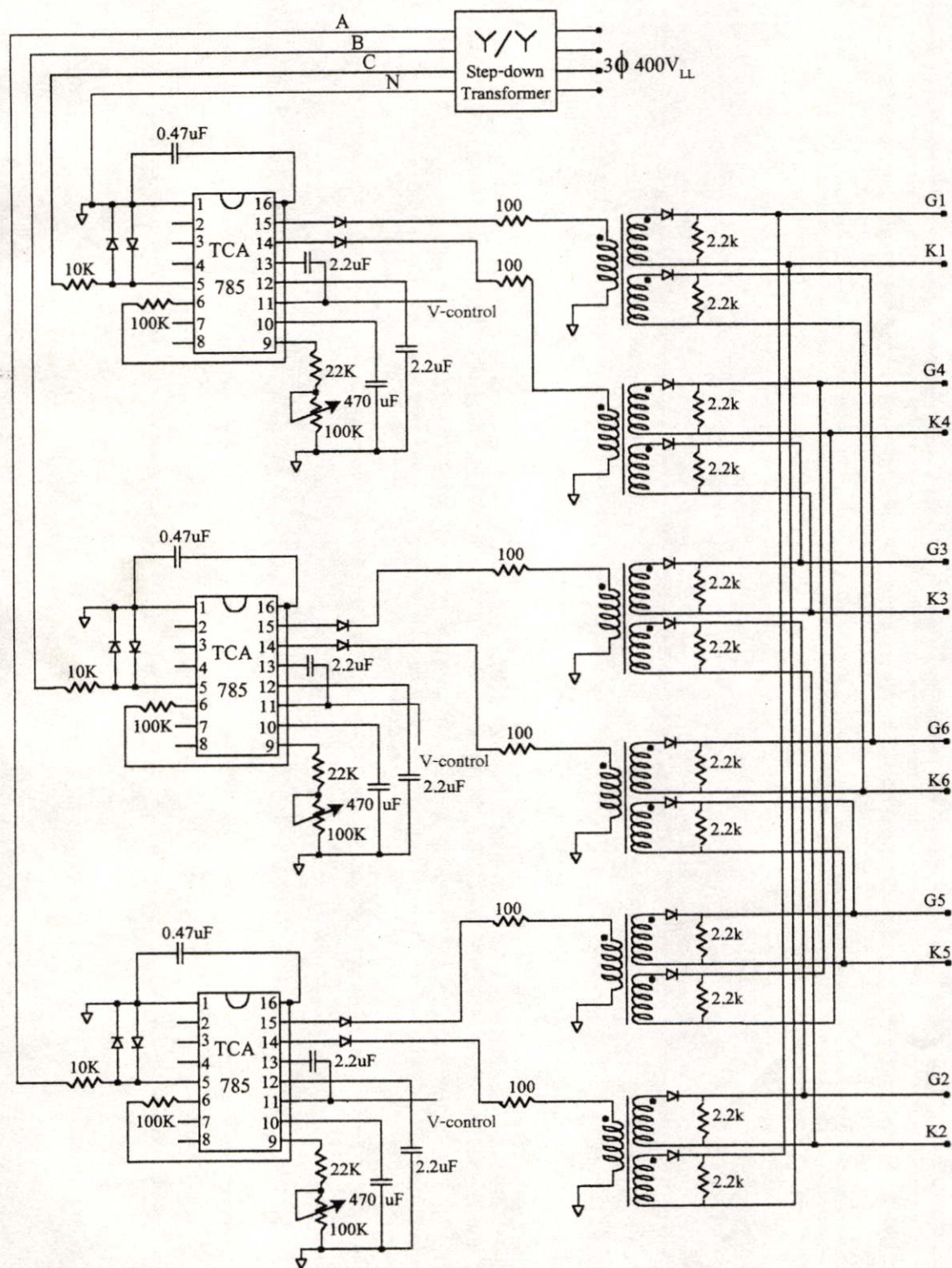
17.25 MAX.
ACROSS FLATS



ภาคผนวก ง.
รายละเอียดวงจรต่างๆในระบบ HVDC



รูปที่ ง-1 วงจรรวมของชุดควบคุมมูนนำกระแสโดยใช้คอมพิวเตอร์



รูปที่ ง-2 วงจรรวมของชุดกำเนิดสัญญาณนำกระแสของไทรสเตอร์

ภาคผนวก จ.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 21

ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

12-13 พฤศจิกายน 2541




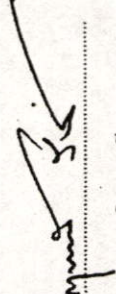
ประกาศนียบัตรนี้ ให้เป็นเกียรติสำหรับ

บทความดีเด่น

ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยคอมพิวเตอร์ 12 พัลส์

นายจักรพงษ์ อารุมิตร
นายศิริวัฒน์ โพธิ์วงกุล
นายวิจิตร กิมเรศ


ประธานจัดการประชุม
รศ.ดร.บุญเจริญ ศรีเนาวกุล


อธิการบดี
ดร. กฤษณพงษ์ กีระติกร

การประชุมวิชาการ
ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21



21st Electrical Engineering Conference
(EECON-21)

วันที่ 12-13 พฤศจิกายน 2541

ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.สุขสวัสดิ์ 43 เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร

ดำเนินการจัดการประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์

12 - PULSE CONVERTER FOR HVDC TRANSMISSION SYSTEM SIMULATOR

จักรพงษ์ จารุมิทร์ ศิริวัฒน์ โพธิ์เวทกุล วิจิตร กิมรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. (02)3266052-6101 ต่อ 2619 E-Mail : s9061097@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการพัฒนาชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง [4] จากคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ เป็นคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากระแสตรงสองแหล่งโดยผ่านทางสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และศึกษาผลกระทบของกระแสรีโวลต์ที่เกิดทางด้านระบบเอซีของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพและการใช้ประโยชน์ของระบบผลิตและระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลง ในการทดสอบการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสองแหล่งจะใช้หลักการควบคุมเฟสในทริสเตอร์ให้ทำงานในโหมดเรกติไฟเออร์และโหมดอินเวอร์เตอร์ โดยแบ่งเงื่อนไขการทดสอบคือ การส่งจ่ายเมื่อสองแหล่งจ่ายมีแรงดันเท่ากันและความถี่แตกต่างกัน และการส่งจ่ายเมื่อสองแหล่งจ่ายมีแรงดันแตกต่างกันและความถี่เท่ากัน ซึ่งในการส่งกำลังไฟฟ้านี้สามารถถอยทิศทางการส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยกระแสไหลในสายส่งสามารถไหลได้ทิศทางเดียว

Abstract

This paper presents a HVDC transmission simulator using 12 pulse converters which is developed from the previous one using 6 pulse converter[4]. This is for studying characteristics of the power flow between two AC sources via HVDC transmission link and the effect of harmonic current of converter which causes the reduction of the system efficiency. Tests of power transfer between two AC sources were performed based on the phase control of thyristor, in rectifying and inverting modes. The conditions of such tests are the power transfer between two AC sources having the same voltage level but different frequencies and different voltage level but the same frequencies. This system is capable of bidirectional power flow.

1. บทนำ

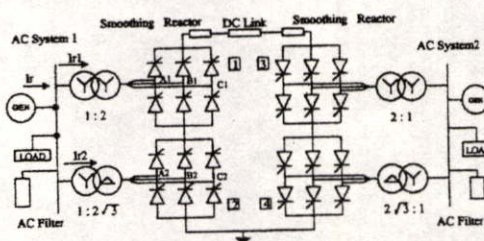
เนื่องจากกรณีฉุกเฉินใตทางด้านอุตสาหกรรมและการขยายตัวของชุมชนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงจะทำให้ระบบผลิตและ

ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจำเป็นต้องแบกรับภาระที่สูงขึ้น ในอดีตจะทำการส่งจ่ายด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับแต่ยังมีจุดคืออยู่หลายประการ เช่น ค่าการสูญเสียขณะส่งจ่ายด้วยระยะทางไกลๆ ประสิทธิภาพและการเชื่อมโยงระบบเอชไอของระบบที่มีความถี่แตกต่างกัน[3]จึงได้มีการพัฒนาระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นมาใช้งาน ในบทความนี้เป็นนันทนาการทดสอบระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 12 พัลส์ แบบขั้วเดียว (MONOPOLAR) [5]

2. หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

เราสามารถเชื่อมต่อบริเวณไฟฟ้ากระแสตรงสองแหล่งที่อยู่ห่างไกลกันเข้าด้วยกันโดยผ่านทางสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งมีชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ปลายด้านหนึ่งของสายส่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (AC/DC Converter) เพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เรียกว่า เรกติไฟเออร์ ในขณะที่มีคอนเวอร์เตอร์อีกชุดหนึ่งที่อยู่ทางด้านปลายสายส่ง ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงกลับไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (DC/AC Converter) เพื่อนำไฟฟ้ากระแสสลับไปใช้งานต่อไป เรียกว่า อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.1 วงจรระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

จากรูป 2.1 แสดงให้เห็นลักษณะของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงโดยหากต้องการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากโครงข่าย 1 ไปยังโครงข่าย 2 จะต้องปรับมุมทริกทริสเตอร์ทางด้านส่งให้ทำงานในโหมดเรกติไฟเออร์ ซึ่งประกอบด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ 2 ชุดต่ออนุกรมกัน

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

โดยคอนเวอร์เตอร์ซุกที่ 2 จะมีแรงดันเอาต์พุตที่ค่าดังคอนเวอร์เตอร์ซุกที่ 1 อยู่ 30° เนื่องจากหม้อแปลงทางดัดแปลงของคอนเวอร์เตอร์ซุกที่ 2 ต่อแบบววดที่ 11 ตามรูปที่ 4.4 ซึ่งจะเปลี่ยนให้แรงดันเอาต์พุตที่สายส่งมีรีปิลิด ความถี่ 12 เท่าของระบบเอช และกำลังไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะถูกส่งผ่านไปโดยระบบสายส่งสองเส้นจากนั้นจะต้องปรับมุมทริกไทรสเตอร์ทางด้านรับให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะทำการเปลี่ยนกลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเชื่อมต่อกับโครงข่าย 2 จะเห็นได้ว่าการเชื่อมโงระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งสามารถมีความถี่ที่แตกต่างกันได้ ทิศทางการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสามารถกลับทางการส่งได้โดยเปลี่ยนลักษณะการควบคุมมุมทริกของไทรสเตอร์

2.2 คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์

คอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ แบบบริดจ์ ได้นำเอาคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ แบบบริดจ์ 2 ชุดมาค่ออนุกรมกัน โดยที่หม้อแปลงแรงดันขึ้นชุดแรกมีการต่อขดลวดแบบสตาร์/สตาร์ รูปสัญญาณกระแสทางด้านแรงดันของหม้อแปลง (I_{r1}) จะเป็น Quasi Pulse ส่วนหม้อแปลงแรงดันขึ้นชุดที่สองมีการต่อแบบสตาร์/เดลต้า รูปสัญญาณกระแสทางด้านแรงดันของหม้อแปลง (I_{r2}) จะเป็น Six Pulse ตามรูปที่ 2.1 และ 4.3 เมื่อทำการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ แบบบริดจ์ [1] จะพบว่ากระแสฮาร์โมนิกส์จะมีเฉพาะลำดับที่ $12K \pm 1$ เมื่อ K เป็นจำนวนเต็มบวกใดๆ ($K=1,2,3,\dots$) ดังนั้น ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นเป็นฮาร์โมนิกส์เลขที่ 11,13,23,25,...

สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์/สตาร์

$$I_{r1} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} Id(\cos\omega t - \frac{1}{5}\cos 5\omega t + \frac{1}{7}\cos 7\omega t \dots) \quad (1)$$

สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์/เดลต้า

$$I_{r2} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} Id(\cos\omega t + \frac{1}{5}\cos 5\omega t - \frac{1}{7}\cos 7\omega t \dots) \quad (2)$$

กระแสรวม

$$I_r = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} Id(\cos\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t \dots) \quad (3)$$

2.3 การทำงานในโหมดแรงดันไฟฟ้าเออร์

ในการทำงานในโหมดแรงดันไฟฟ้าเออร์นี้จะต้องปรับมุมทริกไทรสเตอร์(α) อยู่ระหว่าง $0^\circ - 90^\circ$ ซึ่งจะได้สมการแรงดัน

$$V_{a1} = V_{a2} = 1.35V_{LL} \cos\alpha \quad (4)$$

และ
$$V_{dc} = V_{a1} + V_{a2} \quad (5)$$

เมื่อ α : มุมทริกไทรสเตอร์ ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$)

V_{dc} : แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงบนสายส่ง

V_{a1}, V_{a2} : แรงดันคร่อมคอนเวอร์เตอร์ซุก 1 และซุก 2

2.4 การทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์

ในการทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์จะต้องปรับมุมทริกไทรสเตอร์ให้อยู่ระหว่าง $90^\circ - 180^\circ$ ซึ่งจะได้สมการแรงดัน

$$V_{a1} = V_{a2} = 1.35V_{LL} \cos\gamma \quad (6)$$

เมื่อ γ : มุมการนำกระแสของไทรสเตอร์ ($180^\circ - \alpha$)

α : มุมทริกของอินเวอร์เตอร์

3. ส่วนประกอบของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

3.1 หม้อแปลง

หม้อแปลงที่ใช้มีพิกัด 1 kVA 1 เฟส ต่อแบบสตาร์/สตาร์ อัตราส่วน 1:2 และต่อแบบสตาร์/เดลต้า อัตราส่วน 1:2 $\sqrt{3}$

3.2 สมูทติง รีแอคเตอร์

ลดอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสในขณะทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์และจำกัดค่าของกระแสในวงจรแรงดันไฟฟ้าเออร์ที่เกิดจากการลัดวงจรในสายส่งในการออกแบบเลือกใช้ 400mH

3.3 คีชี ฟิลเตอร์

ทำหน้าที่กรองฮาร์โมนิกส์โวลเตจในสายส่งกระแสตรงโดยอาศัยหลักการรีโซแนนซ์จูนความถี่ที่ไม่ต้องการออกจากระบบค่าของกราวด์ ซึ่งจะมีฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 12 K เมื่อ K เป็นจำนวนเต็มบวก ในการแก้ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 12 เลือกใช้ $C=20\mu F$, $L=3.52mH$

3.4 เอช ฟิลเตอร์

จุดประสงค์ป้องกันการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นฮาร์โมนิก โดยการกำจัดฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 11 และ 13 ใช้หลักการรีโซแนนซ์จูนความถี่ได้ $C=20\mu F$, $L_{11}=4.54mH$, $L_{13}=3.25mH$

3.5 ไฮพาส ฟิลเตอร์

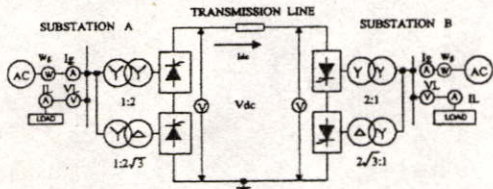
จุดประสงค์เพื่อลดจำนวนฟิลเตอร์ความถี่เดียวที่ต้องใช้ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ค่าที่ความถี่สูงจึงต้องรับกระแสที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดทำให้ฟิลเตอร์มีขนาดใหญ่มาก ในการออกแบบไฮพาสฟิลเตอร์จะใช้กับฮาร์โมนิกส์อันดับสูงๆและเป็นแบบ Second order เพราะมีค่าสูญเสียต่ำ

4. ผลการทดสอบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

4.1 การส่งกำลังไฟฟ้าด้วยคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์

การประจักษ์วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

4.1.1 เมื่อแรงดันเท่ากันและความถี่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์

1. ให้ออกได้ทรานส์ฟอร์มเมอร์ 3 เฟส 100 V_{LL} ความถี่ 50 Hz เป็นสับสเตชัน A และเครื่องกั้นนิโคไฟฟ้า 3 เฟส 100 V_{LL} ความถี่ 60 Hz เป็นสับสเตชัน B
2. ปรับมุมทริก SCR ส่งกำลังจากสับสเตชัน B ไป A

ตาราง 4.1 ผลการส่งกำลังไฟฟ้าจากสับสเตชัน B ไป A

	Substation B, 60 Hz		Substation A, 50Hz	
	ยังไม่ส่งกำลังไฟฟ้า	ขณะส่งกำลังไฟฟ้า	ยังไม่รับกำลังไฟฟ้า	ขณะรับกำลังไฟฟ้า
I _s	2.34	3.15	4.15	3.6
I (โหลด)	2	2	4	4
PF	0.88	0.86	0.89	0.9
W _s	325	480	660	530
V _{dc}	0	400	0	377
I _{dc}	0	0.36	0	0.36

จากตารางสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าได้จาก

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \quad (7)$$

กำลังไฟฟ้าส่งจากสับสเตชัน B = 480-325 = 155W
 กำลังไฟฟ้ารับด้านสับสเตชัน A = 660-530 = 130W
 ประสิทธิภาพของการส่งกำลังไฟฟ้า = 84%

4.1.2 เมื่อแรงดันแตกต่างกันและความถี่เท่ากัน

ตาราง 4.2 ผลการส่งกำลังไฟฟ้าจากสับสเตชัน A ไป B

	Substation A, V _{LL} =110V		Substation B, V _{LL} =100V	
	ยังไม่ส่งกำลังไฟฟ้า	ขณะส่งกำลังไฟฟ้า	ยังไม่รับกำลังไฟฟ้า	ขณะรับกำลังไฟฟ้า
I _s	2.3	3	4.25	3.75
I (โหลด)	2	2	4	4
PF	0.89	0.84	0.85	0.9
W _s	370	520	665	535
V _{dc}	0	438	0	406
I _{dc}	0	0.33	0	0.33

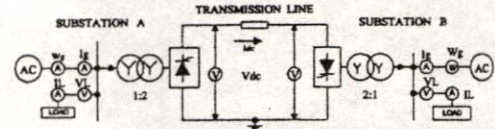
1. ให้ออกได้ทรานส์ฟอร์มเมอร์ 3 เฟส 110V_{LL} ความถี่ 50Hz เป็นสับสเตชัน A และให้ออกได้ทรานส์ฟอร์มเมอร์ 3 เฟส 100V_{LL} เป็นสับสเตชัน B
2. ปรับมุมทริก SCR ส่งกำลังจาก สับสเตชัน A ไป B

กำลังไฟฟ้าส่งจากสับสเตชัน A = 520-370 = 150W

กำลังไฟฟ้ารับด้านสับสเตชัน B = 665-535 = 130W

ประสิทธิภาพของการส่งกำลังไฟฟ้า = 86%

4.2 การส่งกำลังไฟฟ้าด้วยคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์



รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์

4.2.1 เมื่อแรงดันต่างกันความถี่เท่ากัน

1. ทำการทดสอบเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1

ตาราง 4.3 ผลการส่งกำลังจากสับสเตชัน A ไป B

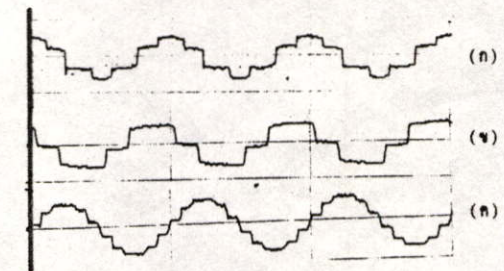
	Substation A, V _{LL} =110V		Substation B, V _{LL} =100V	
	ยังไม่ส่งกำลังไฟฟ้า	ขณะส่งกำลังไฟฟ้า	ยังไม่รับกำลังไฟฟ้า	ขณะรับกำลังไฟฟ้า
I _s	2.35	3.3	4.1	3.6
I (โหลด)	2	2	4	4
PF	0.8	0.75	0.96	0.98
W _s	370	506	700	598
V _{dc}	0	160	0	145
I _{dc}	0	0.8	0	0.8

กำลังไฟฟ้าส่งจากสับสเตชัน A = 506-370 = 136W

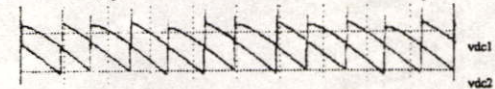
กำลังไฟฟ้าที่รับด้านสับสเตชัน B = 700-598 = 102W

ประสิทธิภาพของการส่งกำลังไฟฟ้า = 75%

ผลจากการทดสอบสามารถให้เครื่อง HARMONIC ANALYZER แสดงรูปสัญญาณต่างๆดังนี้

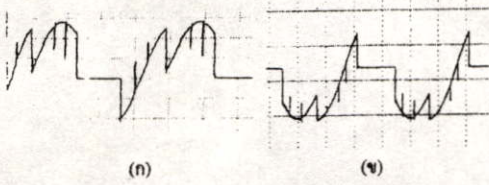


รูปที่ 4.3 ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงค้อแบบสแตร์/คดด้
 ข) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงค้อแบบสแตร์/สแตร์
 ค) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ารวมของระบบ 12 พัลส์ (I_g)

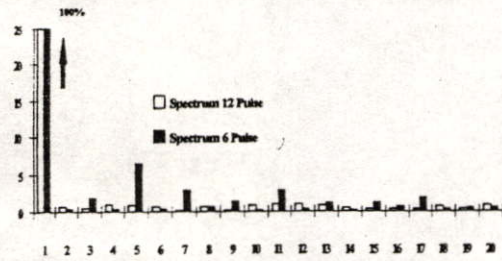


รูปที่ 4.4 สัญญาณ V_{dc1} และ V_{dc2} มุมทริก 30 องศาต้นส่งกำลังไฟฟ้า

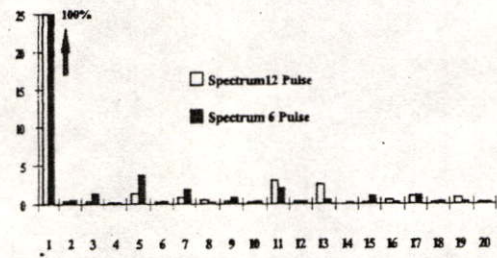
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541



รูปที่ 4.5 แรงดันคร่อมSCR (ก) โหมดคอนเวอเตอร์(ข) โหมดครกติไฟเออร์



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบ Spectrum ของกระแสต้านรับกำลังไฟฟ้า
%THDi 12 พัลส์ = 3.80% , %THDi 6 พัลส์ = 8.80%



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบ Spectrum ของกระแสต้านส่งกำลังไฟฟ้า
%THDi 12พัลส์ = 5.20% , %THDi 6 พัลส์ = 7.60 %

4.3 วิเคราะห์การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ก่อนที่จะเริ่มส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สับสแตชัน A และ B จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดของแต่ละสับสแตชันซึ่งขณะนี้บริเวณที่แต่ละกระแสในสายส่งมีค่าเป็นศูนย์และเมื่อเริ่มส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากสับสแตชัน A ไป B จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งเท่ากับกำลังไฟฟ้าทั้งหมดของสับสแตชัน A ลบด้วยกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลด และกำลังไฟฟ้าทางด้านรับเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดลบด้วยกำลังไฟฟ้าที่สับสแตชัน B ซึ่งโดยส่วนใหญ่ประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับ การสูญเสียในขดลวดคอนเวอเตอร์และสายส่ง ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัดจะต้องปรับมุมทริกไทรสเตอร์ในโหมดครกติไฟเออร์คืออยู่ที่ 0 องศา และโหมดคอนเวอเตอร์จะปรับที่ 180 องศา หรือที่โหมดครกติไฟเออร์คืออยู่ที่ 30 องศา และโหมดคอนเวอเตอร์จะปรับที่ 150 องศา ตามรูปที่ 4.5 ซึ่งจะต้องปรับมุมทริกทั้งสองโหมดให้เท่ากัน มิฉะนั้นจะเกิดความแตกต่างของแรงดันในสายส่งทำ

ให้ประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าในการส่งจ่ายกำลัง ในการควบคุมปริมาณกำลังไฟฟ้าทำได้โดยการควบคุมแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าในสายส่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การควบคุมมุมทริกของไทรสเตอร์ทางด้านรับและด้านส่ง และจากผลที่ได้จากการทดสอบ กรณีปรับให้คอนเวอเตอร์ทำงานในโหมดคอนเวอเตอร์จะมีค่าเพนอร์แฟกเตอร์สูงขึ้น เนื่องมาจากมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน(Reactive Power) ให้กับระบบทางด้านรับกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการเปรียบเทียบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านี้ไม่ได้คิดถึงชุดฟิลเตอร์เนื่องจากต้องการนำเสนองานของTHDในสภาวะต่างๆ จากการทดสอบจะเห็นว่าคอนเวอเตอร์12พัลส์ มีเปอร์เซ็นต์การผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณกระแส (THDi) ต่ำกว่า6 พัลส์ แสดงตามรูปที่ 4.6และ4.7 เมื่อพิจารณาทางด้านระบบเอชอี(ด้านรับกำลังไฟฟ้า)ขณะส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยคอนเวอเตอร์ 6 พัลส์ มีค่าเท่ากับ 8.80% แต่ในคอนเวอเตอร์ 12 พัลส์ มีค่าเท่ากับ 3.80% เนื่องจากสัญญาณกระแสทางด้านรับพลังงานในรูปสัญญาณชายนามากขึ้น

5. สรุป

วัตถุประสงค์ในการทำ HVDC โดยใช้คอนเวอเตอร์ 12 พัลส์ ก็เพื่อที่จะเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งที่มีความถี่แตกต่างกันและยังสามารถเพิ่มแรงดันในการส่งให้สูงขึ้น เป็นผลทำให้กระแสในสายส่งมีขนาดต่ำลงซึ่งก็จะสามารถลดค่าความสูญเสียในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าลงได้ ส่วนในเรื่องของฮาร์โมนิกส์ ก็สามารถลดค่า THDi ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและยังสามารถลดขนาดฟิลเตอร์ในระบบได้อีกด้วยการพัฒนาต่อไปจะใช้ PWM Converter ในการสวิตซ์ซึ่ง ในระบบนี้จะสามารถควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้งายและมีฮาร์โมนิกส์THDiในระบบเอชอีน้อยกว่า

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.Rashid, "Power Electronic Circuits, Devices, And Application" second edition, Prentice Hall, U.S.A., 1993
- [2] N.Mohan, T.M.Undeland and W.P.Robbins, "Power Electronics" John Wiley & Sons, INC., 1995
- [3] K.R.Padiyar, "HVDC Power Transmission systems", Wiley Eastern Limited, 1993
- [4] วันชัย แสงแพร และศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล "ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจ่ายส่ง", การประชุมวิชาการครั้งที่ 20, 2540
- [5] นรเศรษฐ พัฒนคช, ธวัชชัย ศิริจันทร์พร และศักดิ์ชาย แก้วตฤณ, "ชุดจ่ายส่งระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง", ปรวิญญานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540
- [6] ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล, "ระบบไฟฟ้ากำลังถ่ม 2", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536

ประวัติผู้เขียน

นายจักรพงษ์ จารุมิทร์ เกิดเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน พ.ศ.2513 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2537 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาไฟฟ้าอุตสาหกรรม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ และประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์

ปี พ.ศ.2537 ทำงานในตำแหน่งวิศวกรงานระบบ ที่ FEDERAL CONSULTING ENGINEERS CO., LTD.

ปี พ.ศ.2540 ทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จนถึงปัจจุบัน